

MTK 22.

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

Armuth Miklós(Budapest)
Bitay Enikő (Kolozsvár/Marosvásárhely)
Buzetzki Dóra (Debrecen)
Czigány Tibor (Budapest)
Csavdári Alexandra (Kolozsvár)
Dávid László (Marosvásárhely)
Diószegi Attila (Jönköping, Sweden)
Dobránszky János (Budapest)
Domokos József (Marosvásárhely)
Dulf Éva Henriett (Kolozsvár)
Dusza János (Kassa)
Erdei Timotei István (Debrecen)
Forgó Zoltán (Marosvásárhely)
Gobesz Ferdinánd-Zsongor (Kolozsvár)
Gyurika István Gábor (Veszprém)
Horváth Richárd (Budapest)
Ilyés Szilárd (Marosvásárhely)
Keresztes Róbert Zsolt (Debrecen)
Kovács Tünde Anna (Budapest)
Kovács Zsolt Ferenc (Kecskemét)
Máté Márton (Marosvásárhely)
Mikó Balázs (Budapest)
Pokorádi László (Budapest)
Réger Mihály (Budapest)
Réti Tamás (Budapest)
Rígó Petra Renáta (Budapest)
Roósz András (Budapest)
Sikolya László (Nyíregyháza)
Talpas János (Kolozsvár)
Virág Zoltán (Miskolc)
Tóth László (Budapest)

ISSN 2393 – 1280

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

22.

Szerkesztette / Edited by
BITAY ENIKŐ – MÁTÉ MÁRTON



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2025

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 2025

*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-2024.22

DOI: 10.33894/mtk-2024.22

TARTALOM

Bakos Levente, Bakos István-Csongor

A mesterséges intelligencia lehetséges alkalmazásának lehetőségei műszaki projektek tervezésében 1

Borbély Bálint, Szántó Attila, Diós Szabolcs Sándor, Husi Géza

Fék- és fékrásegítő rendszer tervezése elektromos versenyautóhoz 10

Burai István György, Czifra György

Az MI és a CNC-technológia kapcsolata 17

Damó Gergely, Jakab-Farkas László, Egyed-Faluvégi Erzsébet

Kúpos alkatrészek mérésére szolgáló berendezés 23

Darvay Zsolt, Máthé Edina

Magfüggvényen alapuló belsőpontos algoritmus megvalósítása súlyozott lineáris komplementaritási feladatokra 27

Dósa János, Tomus Ovidiu Bogdan

A hűtőközeg típusának hatása a hőszivattyúk szerkezetére és teljesítményigényére 32

Fehér Dominik, Ravai-Nagy Sándor, Szigeti Ferenc

Időzítőfékes prés tervezése 40

Kári-Horváth Attila, Lantos Zsolt, Kristóf Gábor

Tengerjáró hajókon keletkező szennyvíziszap szárítására szolgáló, modulrendszerű berendezés bemutatása 46

Kiss Virág, Izbékiné Szabolcsik Andrea, Bellér Gábor

Vízitorma mint gyógynövény termesztése hidropóniás rendszerben 52

Kolcsár Levente, Bakó László

Interdiszciplináris MI-kutatási módszertan 59

Márton Péter, Varga Kristóf Renátó, Köllő Gábor

Fa tartószerkezeti elemek 3PHV60-típusú műgyantával való helyreállításának vége-sele-mes modellezése 65

Nagy Balázs Ákos, Kovács Tünde Anna*A lézersugár veszélyei 72***Nagy Zsolt, Kelemen Andrea, Sánduly Annabella***Acélszerkezetek a műemlék épületek felújításában 79***Páczelt István***A numerikus mechanika szerepe napjainkban 85***Papp Klaudia, Piros István Attila, Deák Bálint***Fogpótlások nagy pontosságú modellezése és szilárdságtani analízise 93***Pásztor Judit, Tolvaly-Roşca Ferenc***Tárcsás boronával való talajmegmunkálás eredményének szemléltetése számítógépes szimulációval 98***Popa-Müller Izolda, Lőrincz Norbert***Berendezés tervezése és validációja kenőanyagok terhelhetőségének vizsgálatára 102***Sütő Abigail-Bethsabé, Urszuly Nóra, Lőrincz Barnabás-Attila, Nagy Zsolt, Buru Marius-Ştefan***Acéloszlop és acélgerenda közötti homloklemezkes kapcsolatok viselkedésének analitikus és numerikus vizsgálata 106***Taskó Dániel, Szántó Attila, Pettendi Dávid, Diós Szabolcs Sándor, Husi Géza***Hátó légtérelő tervezése és vizsgálata elektromos versenyautóra 110***Varga Csaba, Szántó Attila, Asztalos Tamás Gergő, Diós Szabolcs Sándor, Husi Géza***ZETOR 10245-típusú, mezőgazdasági vontató kiegyensúlyozótengelye forgácsolástechnológiájának tervezése és végeelem-szimulációja 116***SZERZŐK JEGYZÉKE 123**

CONTENT

Levente BAKOS, István-Csongor BAKOS

A Case Study for Possible Applications of Artificial Intelligence Tools in the Design of Engineering Projects 1

Bálint BORBÉLY, Attila SZÁNTÓ, Szabolcs Sándor DIÓS, Géza HUSI

Design of a Brake And Brake Assist System for an Electric Race Car 10

István György BURAI, György CZIFRA

The Relationship Between AI and CNC Technology 17

Gergely DAMÓ, László JAKAB-FARKAS, Erzsébet EGYED-FALUVÉGI

Equipment for Measuring Conical Parts 23

Zsolt DARVAY, Edina MÁTHÉ

Implementation of an Interior-Point Algorithm Based on a Kernel Function for Weighted Linear Complementarity Problems 27

János DÓSA, Ovidiu Bogdan TOMUS

Influence of Cooling Agent Type on the Design and Power Demand of Heat Pumps 32

Dominik FEHÉR, Sándor RAVAI-NAGY, Ferenc SZIGETI

Design of a Timer-Brake Press 40

Attila KÁRI-HORVÁTH, Zsolt LANTOS, Gábor KRISTÓF

Presentation of a Modular System for Drying Sewage Sludge from Seagoing Vessels 46

Virág KISS, Andrea IZBÉKINÉ SZABOLCSIK, Gábor BELLÉR

Watercress as a Medicinal Herb Grown in a Hydroponic System 52

Levente KOLCSÁR, László BAKÓ

Interdisciplinary AI Research Methodology 59

Péter MÁRTON, Kristóf Renátó VARGA, Gábor KÖLLŐ

Finite Element Modelling of the Restoration Of Wooden Structural Elements with 3PHV60 Type Epoxy Resin 65

Balázs Ákos NAGY, Tünde Anna KOVÁCS	
<i>Hazards of Laser Beam</i>	72
Zsolt NAGY, Andrea KELEMEN, Annabella SÁNDULY	
<i>Steel in Architectural Heritage Protection</i>	79
István PÁCZELT	
<i>The Role of Computational Mechanics Today</i>	85
Klaudia PAPP, István Attila PIROS, Bálint DEÁK	
<i>High Precision Modelling and Strength Analysis of Tooth Implants</i>	93
Judit PÁSZTOR, Ferenc TOLVALY-ROSCA	
<i>Computer Simulation to Visualize the Results of Soil Tillage With Disc Harrow</i>	98
Izolda POPA-MÜLLER, Norbert LŐRINCZ	
<i>Design and Validation of Equipment for Testing the Load Capacity of Lubricants</i>	102
Abigail-Bethsabé SÜTŐ, Nóra URSZULY, Barnabás-Attila LŐRINCZ, Zsolt NAGY, Marius-Ştefan BURU	
<i>Analytical and Numerical Study on the Behavior of Steel Flush End Plate (FEP) Connections</i>	106
Dániel TASKÓ, Attila SZÁNTÓ, Dávid PETTENDI, Szabolcs Sándor DIÓS, Géza HUSI	
<i>Design and Examination of a Rear Spoiler for an Electric Race Car</i>	110
Csaba VARGA, Attila SZÁNTÓ, Tamás Gergő ASZTALOS, Szabolcs Sándor DIÓS, Géza HUSI	
<i>Design and Finite Element Simulation of ZETOR 10245 Type Agricultural Tractor Balancer Axle Turning Technology</i>	116
LIST OF AUTHORS	123



A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA LEHETSÉGES ALKALMAZÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI MŰSZAKI PROJEKTEK TERVEZÉSÉBEN

A CASE STUDY FOR POSSIBLE APPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS IN THE DESIGN OF ENGINEERING PROJECTS

Bakos Levente,¹ Bakos István-Csongor²

¹ Sapiientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, bakos@ms.sapiientia.ro

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Ipari Gépészmérnöki Kar, bakosistvancsongor@yahoo.com

Abstract

In our paper we study the potential application of artificial intelligence in the scheduling of engineering projects. We are focusing on a very small slice of project management topic, namely, shaping the major tasks and starting managing risks in the design phase. By design, here, we are not referring to the technological sense of the word, but rather on conceiving the entire technical project. We intend to study the use of AI in the case of engineering projects that are not software-based at all and in which AI is a working tool, not a goal or a constituent element. In our research, we investigated how the best-known Large Language Models respond to the same request. In examining the results, we found that the AI environments made meaningful suggestions, most of them showing in the same time a high degree of similarity. It was also confirmed that the data provided by AI in both scientific and practical contexts should be treated with caution. Still, we prove that AI can be considered a real and powerful, day-to-day tool in project management.

Keywords: *industrial projects, Artificial Intelligence, Large Language Models.*

Összefoglalás

Dolgozatunkban a projektmenedzsment egy igen kis szeletét vizsgáljuk, nevezetesen a mesterséges intelligencia lehetséges alkalmazásának lehetőségét egyes műszaki projektek ütemezésénél, különös tekintettel a tervezés fázisában jelentkező kockázatok kezelésében. Tervezés alatt itt most elsősorban nem a technológiai értelemben vett tervezést elemezzük, hanem a teljes műszaki projektét. A kutatás középpontjában azok a műszaki projektek ütemezése, tervezése áll, amelyek egyáltalán nem szoftveralapúak, és amelyekben az MI egy munkaeszköz, tehát nem cél vagy alkotóelem. Kutatásunk során azt vizsgáltuk, hogy milyen válaszokat adnak a legismertebb MI-alkalmazások ugyanarra a feladatra. Az eredmények vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy azok az MI-környezetek, amelyek értelmezhető javaslatokat fogalmaztak meg, nagymértékben hasonlóságot mutatnak. Az is igazolódott, hogy az MI által szolgáltatott adatokat a tudományban és a gyakorlati kontextusban is a megfelelő óvatossággal kell kezelni, bár az MI immár a projektmenedzsmentben (is) egy valós, erőteljes napi szinten használható, nehezen megkerülhető eszköz.

Kulcsszavak: *mesterséges intelligencia, műszaki projektmenedzsment, nyelvi modellek.*

1. Bevezetés

A mesterséges intelligencia felhasználásának lehetősége, illetve ennek az adott területre gyakorolt, várható kedvező vagy kedvezőtlen hatása,

egyaránt tudományos kihívás és egyben közbeszéd tárgya is. Valószínűleg kevés olyan téma van, amely a tinédzserektől, nyugdíjasokon át, politikusokig világszerte mindenkit érdekelne, és egy-

ben tudósok számára is még mindig csak a kísérleti fejlesztés stádiumában levő kutatási eszköz. Napjaink egyik legjobban mediatizált, tudományos vívmánya, az MI (mesterséges intelligencia) lehetőségek sorozatát vonultatja fel a projektek vezetésénél és menedzselésénél is. Dolgozatunkban a projektmenedzsment egy igen kis szeletét vizsgáljuk, nevezetesen a mesterséges intelligencia lehetséges alkalmazásának lehetőségét egyes műszaki projektek ütemezésénél, különös tekintettel a tervezés fázisában jelentkező kockázatok kezelésében. Tervezés alatt itt most elsősorban nem a technológiai értelemben vett tervezést elemezzük, hanem a teljes műszaki projektét, tehát beleértve egyebek mellett a teljes ellátási, logisztikai láncsal kapcsolatos kérdéseket, gyártásszervezést, minőségmenedzsmentet, esetleg a vevői logisztikát is. Ugyanakkor fontos megjegyeznünk, hogy napjainkban a szigorúan műszaki értelemben vett tervezésben is a fejlesztő mérnökök – különösen ott, ahol szoftverkomponens is van – ismerik, folyamatosan keresik a mesterséges intelligencia (MI) által kínált újabbnál újabb megoldásokat. A műszaki értelemben vett tervezés során használt alkalmazások nagyon nagy mértékben területspecifikusak is lehetnek, mi ezáltal a legismertebb, általános platformok használhatóságát vizsgáltuk, lényegesen a műszaki tervezés előtti fázisban, akkor, amikor a teljes műszaki projekt (legyen az egy gyártósor-beüzemelés, gépvásárlás, szerszámkészítés, technológiai fejlesztés) még koncepció fázisában van, adott esetben még a projekt elindítása is kérdéses. Számunkra az érdeklődés középpontjában azon műszaki projektek ütemezése, tervezése áll, amelyek egyáltalán nem szoftveralapúak, és amelyekben az MI egy munkaeszköz, tehát nem cél vagy alkotóelem. Már a dolgozatunk elején megemlítjük azonban, hogy bár a legelterjedtebb MI-alkalmazások gyorsan tanulnak, az ipari projektek esetén nem mindig használhatók megbízhatóan. Részben azért, mert a legtöbb fejlesztéshez még ezek a platformok sem férnek hozzá – tehát a tanulási folyamat korlátozott –, részben azért, mert az, amit a MI felkínál, lehet szabadalmi vagy egyéb jogvédelem alatt áll. Az MI területén még igen hézagos a jogi keret [1], a legnagyobb előrelépést talán az 2024. augusztus 1-én életbe lépett AI Act néven ismert uniós jogszabály jelenti [2]. A magyar hivatalos megnevezése: Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2024/1689 rendelete a mesterséges intelligenciára vonatkozó harmonizált szabályok megállapításáról. Az említett jogszabály alapján véve ösztönzi az EU-ban az MI használatát, első-

sorban versenyképességi okok miatt, azonban egy olyan jogi keret biztosít, amely megpróbálja kezelni a mesterséges intelligencia kockázatait. Az említett jogszabály a 4. cikkben megállapítja, hogy „az MI használata kulcsfontosságú versenyelőnyt biztosíthat a vállalkozások számára, és társadalmi és környezeti szempontból kedvező eredményeket hozhat, például (...) az infrastruktúra-működtetés, az energia, a közlekedés és a logisztika (...) terén”. Tekintettel arra, hogy a felsorolásban műszaki jellegű területeket azonosítottunk, úgy gondoltuk, érdemes kutatni a műszaki projektek menedzsmentjének területén, az MI felhasználási lehetőségeinek elemzésével. Az elemzésünk során elsősorban nagy nyelvi modell (LLM – Large Language Model, [3, 4]) vagy multimodális típusú, generatív funkciókat ellátó mesterségesintelligencia-platformokat használtunk [5]. Az ezek által kínált lehetőségeket vizsgáltuk a tervezés, ütemezés és kockázatkezelés kiemelt alterületeken.

2. Tervezés, ütemezés, kockázatkezelés és MI, a projektmenedzsment

A projektmenedzsment mint szakterület kifejezetten jól kidolgozott módszertannal rendelkezik a tervezésben, ütemezésben és a kockázatkezelésben. A projektek gyakorlatában talán a PM-BOK [6] jelenti az egyik legismertebb szakmai útmutatót. Az innen vett meghatározás alapján a projekt „egy időben behatárolt erőfeszítés egy egyedi termék, szolgáltatás vagy eredmény létrehozása céljából”. A projekt tehát olyan egyedi (nem szokványos), egyszeri (nem rendszeresen végzett), összetett tevékenységek összességét jelenti, melyek jól körülhatárolt, érthető, konkrét céllal, rögzített határidőkkel és előre meghatározott erőforrásigénnyel rendelkeznek. Ebből a meghatározásból is kiderül, hogy a projektek egyedi, egyszeri, tehát nem vagy csak igen ritkán megismételhető tevékenységsort tartalmaznak, az ötlet megfogalmazásától, a tervezési fázison át egészen a kivitelezésig számtalan kockázati tényezőt jeleníthetünk meg. Ezek jelentős része már a projekt tervezési fázisában megjelenik [7]. A nem műszaki értelemben vett tervezésben (is) számtalan olyan változóval kell számolni, amelyek értéke kockázatot jelent a projekt sikerére vonatkozóan. Itt elsősorban a projekt ütemtervének, tevékenységeinek az azonosítására, ezek időtartamának becslésére gondolunk. A meglevő ismertebb MI-környezetek, illetve a témában lehetőséget látó gyakorlati szakemberek és akadé-

miai környezetben tevékenykedő kutatók [8, 9, 10] immár számtalan lehetőséget vetítenek elő. Kockázatelemzés során proaktívan azonosíthatja és rangsorolhatja a kockázatokat, összetett kockázatokat is elemezni képes [11]. Az MI fontos eszköz lehet a prediktív projekttervezésben is, tehát a kockázatokat nemcsak azonosítja, hanem ezeknek a tükrében a projektek kimenetelének előrejelzésére is alkalmas lehet, különböző forgatókönyveket is előrevehet. Így például a gépi tanulási algoritmusok olyan mintákat és trendeket azonosítanak, amelyeket az emberi gondolkodás nehezen vagy egyáltalán nem képes felismerni [12]. A gépi tanulás által a szakemberek immár képesek a projektteljesítmény előrejelzésére. A mesterséges intelligencia hatékony megoldásokat kínál, mivel hatalmas mennyiségű adatot elemez. A hasonló projektek múltbeli adatait felhasználva és kielemezve, a gépi tanulás képes előrevetíteni a jelenlegi projekt várható teljesítményét. Ez a becslés olyan támpontokat szolgáltat, mint a költségek becslése, az ütemtervezés és ennek megvalósíthatósága, illetve az erőforrások szűk keresztmetszeteinek behatárolása [13]. A gépi tanulási algoritmusok forradalmasíthatják a projektmenedzsmentet azáltal, hogy képesek hatalmas mennyiségű, korábbi projektadatokat elemezni [14]. Emberileg szinte elképzelhetetlen nagyságú adatbázist elemeznek, költségvetésekkel, határidőkkel, forráselosztással, technikai és műszaki standardokkal, illetve korábbi projektek eredményeivel [15]. Egyértelműen adottak a lehetőségek és az adatok, hogy a saját projektünkkel kapcsolatba hozható információk gyűjteményéhez hozzáférhessünk és ezt feldolgozhassuk. A gépi tanulás és az erre kifejlesztett eszközök szinte azonnal tudnak már a kezdeti fázisban segíteni a gyakorló szakembereknek [16, 17, 18]. Az MI-környezet alkalmazásával bővül a projektmenedzsment eszköztára, hatása lehet a humán erőforrásra is, csökkenhet a munkahelyi stressz, növelhetjük a csapatunk morálját, és több sikerélményben lehet a csapatnak része az egyes feladatok gyorsabb megoldása által. Adatmegosztásról, átláthatóságról és egyéb lehetőségekről is beszélhetnénk. A mesterséges intelligencia megkönnyíti a kommunikációt és az együttműködést a projekt-csapatokon belül és a külső érdekeltekkel [19].

Az MI képes valós idejű – napra, hétre vagy hónapra lebontott – jelentések készítésére, az adatmegosztás megkönnyítésével elősegítheti az átláthatóságot, és racionalizálhatja a projekt végrehajtását. Az erőforrás-kihasználtságra vonatkozó múltbeli adatok lehetővé teszik a gépi

tanulási modellek számára, hogy közel optimális javaslatot tegyenek az aktuális projekt esetén az erőforrások, a személyzet, a berendezések és a költségvetés elosztására. Ez biztosítja az erőforrások hatékony elosztását és a projektcélok elérését. Ezeknek a problémáknak az előrejelzése lehetővé teszi a projektmenedzserek számára, hogy proaktívan kiigazítsák az ütemterveket, és minimalizálják a fennakadásokat [8, 9]. A projekt-forgatókönyvek szimulálásakor lehetőség van arra, hogy a projektvezetők azonosítsák a lehetséges zavarokat. Lényegesen jobban megalapozott ütemezési döntések születhetnek, mivel a gépi tanulás képes elemezni a múltbeli projektadatokat, ezáltal azonosítja a hasonló projektek során keletkezett csúszásokat vagy az egyes folyamatok szűk keresztmetszeteit [20].

Természetesen az MI használata nem csak előnyökkel jár. Mind a projektmenedzsment területén, mind bármilyen más területen, veszélyeket is hordozhat magában. Az MI-környezet a kockázatok menedzselésében kell, hogy támogatást nyújtson a projektek tervezésében, és nem szabad önmagukban egy kockázatot jelenteniük [21]. Emiatt alkalmazásuk megfelelő körülményekkel kell, hogy történjen. A továbbiakban elemzünk néhány MI-platformot és rendszert a műszaki projekteken belüli alkalmazhatóságuk alapján.

3. A legismertebb generatív MI-környezetek és alkalmazási lehetőségek a műszaki projektek terén

A ChatGPT [22], a Google Gemini [23], a Microsoft Copilot [24] és a Claude [25] minden bizonnyal a legnépszerűbb generatív típusú mesterséges intelligencia-környezetek, a felhasználóbázisuk igen nagy méretű. Ezek közös jellemzője, hogy kivétel nélkül promptalapúak. Magyarán utasításokat követnek, egy adatbázis használatával, amelyet folyamatosan lehet bővíteni. Ezek elég jól használhatók műszaki projektek tervezés során is. Ezen mesterséges intelligenciára épülő alkalmazások mögött komoly fejlesztői csapatok állnak, nevezetesen olyan informatikai óriások, mint például a Google vagy éppen a Microsoft. Napjaink egyik legnépszerűbb mesterséges intelligencia-applikációját, a ChatGPT-t, az Open AI platform fejlesztői csoport működteti [26]. Ezek mellett léteznek egyetlen vagy kisebb területekre specializálódott, de a projektmenedzsmentben használható, specifikusabb MI-k is, mint pl. Ayanza [27] (a munkafolyamatok racionalizálására, a csoportok jobb koordinálását elősegítő

eszköz), Stepsize [28] (szoftverfejlesztéshez és más technikai projektekhez való tevékenység összefoglaló eszköze), Zapier AI [29] (automatizálási projektekbe integrált munkafolyamat-kezelő eszköz), Kuki Chatbot [30] (gyakori kérdésekért felelős, mesterséges intelligencia által vezényelt chatbot), Taskade [31] (feladatkövető, a ChatGPT egyik legújabb adatbázisához fér hozzá, amely összefoglalókat, munkafolyamatokat és egyéb szakmabeli tevékenységeket képes generálni). Meg kell említenünk, hogy ezek az alkalmazások nem felétlenül a felhasználóktól tanulnak, szükség van egy „tanító” fejlesztőbázisra, amelyben különböző tanulási modellek által fejlődik a rendszer. A tanuláshoz több folyamata van, de leggyakrabban hatalmas mennyiségű adatot adagolnak be a tanítási folyamatokba... már ha ezek az adatok rendelkezésre állnak. Konkrét műszaki fejlesztések esetén ez gyakran igen nagy kihívás. A tanulás lehet felügyelt (eleinte címkézett adatokból tanul a rendszer), nem felügyelt tanulás (itt a rendszer mintákat keres, és ezáltal tanul), megerősített tanulás (a rendszer a megerősítés által tanul), félig felügyelt tanulás (az előző két kombinációja, az adatok részben címkézettek, és ezek alapján alakulnak ki az új minták) és az átvitelalapú tanulás (egy már megtanult, bevált modellt finomít egy új feladatra). Amennyiben a tanulási folyamat során elég pontos a rendszer, tesztelesek és terhelés alá helyezik azt MI-t, majd a hibahatárok megvizsgálása után megállapítható, hogy eléggé pontosan működik a rendszer. A gyakorlatban általában ezeket a tanulási módszereket felváltva használják, közös bennük a következő tevékenységsor: (1) adat-előkészítés, (2) adatosztás, (3) modellépítés, (4) tanítás és hangolás (5), értékelés és tesztelés. Felhasználói szinten mindezeknek nincs kiemelt jelentősége, mind az öt ismert tanulási folyamat közül lehet használható eredményhez jutni. Ha csak eszközként használjuk az MI-t, legfeljebb az utasításokat kell megtanulni, illetve azt, hogy miként érhetünk el vele eredményeket. Az utasítás minősége, milyensége nagy vonalakban befolyásolja a mesterséges intelligencia választát, eredményét.

Az MI-modellek rendszerint nagy adatbázisból táplálkoznak, mégsem tudnak megoldást adni minden problémára. Még a korábban említett népszerű chatbotok sem. Minél általánosabb az adatok forrása, annál nagyobb a valószínűsége, hogy „a segítség” nem lesz szakmailag helyes, mivel a rendszer nem tud különbséget tenni a szakmailag helyes és hamis adatok között. Minél specifikusabb kérdéskörre kell alkalmazni egy

MI-eszközt, annál jobb, ha ez nem olyan széles körűre van fejlesztve. Tovább bonyolítja a megfélelő MI-eszköz kiválasztását az a tény, hogy számottevő minőségi ugrás van az adott MI-eszközök ingyenes verziója és a bérletalapon nyújtott szolgáltatás között. Az MI-fejlesztők ingyen elérhető modelljei egyfajta marketingeszközként működnek, elérhetővé teszik az applikációt mindenki számára, ugyanakkor a legfejlettebb MI-eszközökért természetesen fizetni kell. A fizetési verziók bár ugyanabból az adatbázisból dolgoznak, az adatfeldolgozás minősége és sebessége jobb az algoritmusoknak köszönhetően a fizetési verziókban. A mesterséges intelligencia fejlesztése időigényes, több hónap, adott esetben év is lehet nagyon specifikus esetekben, mikor kevés tanítandó információval rendelkezünk.

4. A kísérlet bemutatása

Kísérletünk célja egyes, projekttervezéshez is használható MI-eszközök összehasonlítása, műszaki projektek esetén. Kutatásunk során azt vizsgáltuk, hogy milyen válaszokat adnak a legismertebb MI-alkalmazások ugyanarra a feladatra. Továbbá azt, hogy ezek milyen mértékben hasonlítanak, és milyen mértékben felelnek meg a valós szakmai elvárásoknak. Terveink szerint az alábbi MI-környezeteket szerettük volna összehasonlítani: ChatGPT, Copilot, Gemini, Claude, Zapier AI, Taskade, Stepsize, Kuki Chatbot és Ayanza. Az összehasonlítás alapját egyetlen utasítással jelentette, amelyben egy fiktív projekt keretén belül egy ismert autókalkatrész fázadási tesztjének megszervezéséről kezdtük a MI-platformokat. A keresést 2024. november 20-án végeztük el.

Az alábbi üzenetet (szaknyelven promptot) írtuk be a vizsgált MI-platformok keresőfelületére: „Szia! Szeretnék ciklikus fáradási tesztet végezni egy erre alkalmas berendezéssel a 1K0511115BD OEM referenciaszámmal ellátott Volkswagen Golf hátsó futóműrugóján. Anyaga SAE 9254 (Cr-Si- és Mn ötvöztött acél), betartva a VDA 241-009 (Volkswagen) standardot. A tesztigények a következők: 3 rugót kell tesztelni naponta. Az éves gyártási terv 50.000 rugó. A tesztelés 10Hz-en történik, azaz 1 millió ciklust foglal magában. Kérlek, sorold fel, milyen gépekre van szükségem, milyen folyamatokra van szükségem, készíts egy ütemtervet, és számítsd ki a hozzávetőleges költségvetést! A költségkeretem 200 000 euró. A cégünknel a mérnökök órábéré 6,5 euró/óra, egyéb személyzet (technikus, adminisztráció, projektszemélyzet stb.): 5 euró/óra. Kérem a gép márkáját is. Tovább-

bá, kérlek, azonosítsd a legfontosabb kockázatok, amelyek a fenti projektben fennállnak!”.

Fontos kiemelnünk, hogy valós esetben nyilvánvalóan egy beszélgetés zajlott volna le az MI-környezettel. Ez lehetővé tette volna, hogy az adott környezet finomítsa a válaszokat. Itt azonban az összehasonlíthatóság miatt kénytelenek voltunk mindent egyetlen utasításorban összesűríteni.

5. Eredmények bemutatása

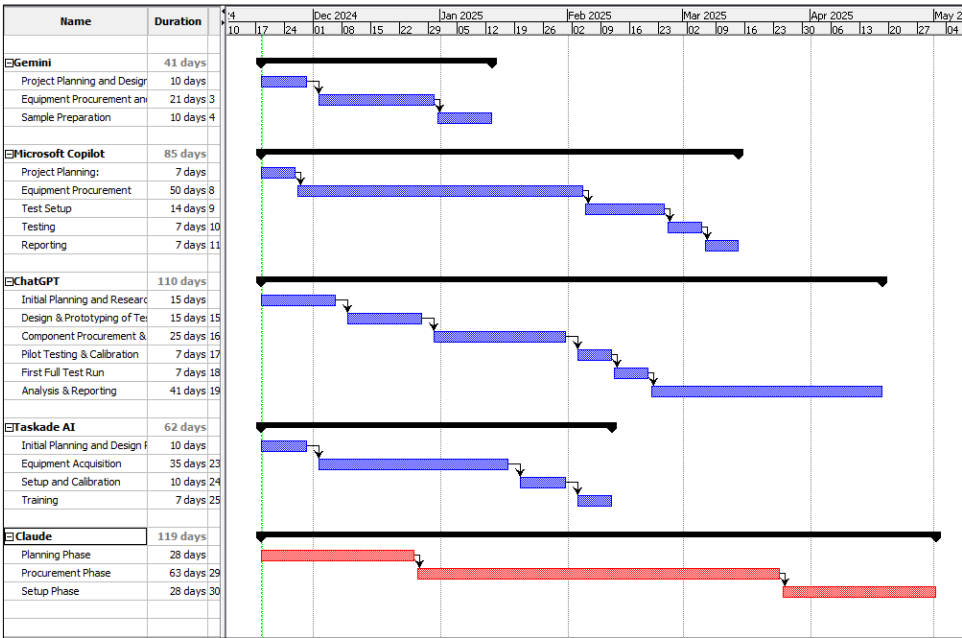
A válaszok elemzésének eredménye az, hogy megállapítható, hogy a ChatGPT, Copilot, Gemini, Claude, Zapier Taskade Stepsize platformok értelmezhető választ adtak a kérésre, a Kuki Chatbot, az Ayanza nem volt alkalmas a feladatra. Az Ayanza azt a választ fogalmazta meg, hogy legközelebb – ha nem műszaki feladattal fordulunk hozzá – valószínűleg segíteni tud majd. Az eredmények vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy azok az MI-környezetek, amelyek értelmezhető javaslatokat fogalmaztak meg, nagymértékben hasonlóságot mutatnak. Szórás elsősorban az időtartamban és a költségbecslésben mutatkozik. Az 1. táblázatban összegezzük a vizsgált rendszerek által szolgáltatott legfontosabb adatokat. Csak azokat a környezeteket tüntettük fel, amelyek használható adatokat szolgáltattak. A táblázat első részében az MI-környezet által javasolt tesztberendezés-típusok és a projekt teljes költségve-

tésének a becslése láthatók. A táblázat második részében pedig a humánerőforrás-szükséglet és a projektidőtartam látható.

1. táblázat. Az MI-platformok válaszainak összehasonlítása

	Ajánlott tesztberendezés-típusok	Költségvetés (euró)	Időtartam (hónap)	HR-szükséglet (fő)
ChatGPT	Instron 8800, MTS Criterion	145.000	3–4	4
Copilot	Zwickroell, Admet	81.400	2–3	5
Gemini	MTS, Shimadzu	169.000	1–2	7
Claude	Instron Electropuls, MTS Landmark	177.840	3	4
Taskade	MTS System, Instron	175.500	3–4	6

A fenti táblázatokból látható, hogy szinte mindegyik környezet a fáradási tesztberendezések közül az MTS-berendezések egyikét ajánlotta, kivéve a Copilot környezet, amely egyértelműen költséghatékonyabb megoldásokat javasolt. Összehasonlítva a javasolt projektidőtartamokat, azt látjuk, hogy az optimistának mondható 1 hónaptól (Gemini) egészen a 4 hónapos időtartamig változnak a javasolt értékek. Az 1. ábrán az egyes környezetek által javasolt időtartamok matematikai átlagértékeivel mutatjuk be az eltéréseket a



1. ábra. Az ütemtervek összehasonlítása

különböző környezetek között. Azért számoltunk a számtani középárvisszát, hogy érzékeltetni tudjuk az eltéréseket, ugyanakkor nyilvánvaló, hogy egyetlen környezet sem javasolt, nem is javasolható pontos projektdíjtartamot. A projektmenedzsmentben külön szakirodalma van az időtartamok becslésének, bonyolult matematikai képletek és algoritmusok, továbbá az egyes menedzserek ökológiai szabályai alapján kijött értékek kerülnek be a tervezett ütemtervbe. Az **1. ábrán** nyilvánvalóan ezekről eltekintettünk, a feltüntetett értékek egyszerű matematikai átlagok. Az ábrán az is látható, hogy nemcsak az időtartamban van jelentős eltérés a javasolt projektek között, hanem a javasolt ütemterv kidolgozottsági szintjében is jelentős eltérések mutatkoznak. Azt látjuk, hogy a ChatGPT esetében vannak legrészletesebben feltüntetve a tevékenységek („task”-ok), míg a Claude a lehető legáltalánosabban kezelte a kérésünket. A HR-szükségletre vonatkozó kérésünkre a válaszok szintén eltéréseket mutattak. Egyes esetekben szigorúan a projekt kivitelezéséhez szükséges személyzetre kaptunk javaslatokat (a fáradási eszköz beszerzése és beüzemelése), más esetekben a működtetésre is.

Tekintve a projekt viszonylagos egyszerűségét, nyilvánvalóan nincs jelentős eltérés a javasolt szerepkörökben és a projektcsoportok számát illetően. Általánosságba véve, mindegyik platform kiemelte a mérnököket, technikusokat és projektmenedzsereket, mint szükséges személyzetet, ugyanakkor a minőségmérnököt csak a Claude említette meg.

Az adminisztratív személyzet-szükségletet a Copilot, a Gemini és a ChatGPT határozta meg. Mindegyik esetben 1 fő volt a javaslat. A Gemini és a Taskade szerint több mérnökre és több technikusra is szükség van, ezzel eltérnek az többi platformhoz képest, mindkét esetben 3 mérnök és 2 technikus. A valóságban valószínűleg ezek a szerepkörök részmunkaidővel is lefedhetők, a javasolt értékek és indoklások alapján a feladatokat egyértelműen lefedő munkakör-meghatározás történt, elvonatkoztatva az adott vállalatban már meglévő humán erőforrásokról.

A dolgozatunk bevezető részében is kiemeltük, hogy a kutatási kérdésünk bár a projektmenedzsment egy kis szeletét vizsgálja, még ezen belül is az egyik kiemelt terület, az MI-támogatás kérdése merül fel a tervezés fázisában jelentkező kockázatkezelésben, kockázatazonosításban. Az általunk megfogalmazott egyetlen prompt is igazolja, hogy lehet az MI-t használni a projektek során megjelenő lehetséges kockázatok azonosítására.

A megfogalmazott válaszokból egyértelműen azonosíthatók azok a kockázatok, amelyekkel a projektek során számolni kell.

A megfogalmazott promptra kapott válaszok alapján azt tapasztaltuk, hogy a kockázatokra vonatkozó adatok is viszonylag nagy eltéréseket mutatnak. Ugyanakkor a szakirodalmi háttérnek megfelelő válaszok születtek még a legegyszerűbb választ forgalmazó platformok esetében is (pl. ChatGPT, Copilot). A legrészletesebb választ a Taskade szolgáltatta. A **2. táblázat**ban összehasonlítjuk a platformok által szolgáltatott választokat.

2. táblázat. Kockázatra vonatkozó eredmények

	KSZ ¹	KK ²	R ³
ChatGPT	5	Nem	alacsony
Copilot	5	Nem	alacsony
Gemini	14	Nem	alacsony
Claude	5	Igen	közepes
Taskade	12	Nem	magas

¹ KS = azonosított kockázatok száma, ² KK = kockázatkezelésre javaslat, ³ R = részletesség mértéke

A fenti táblázatból azt is láthatjuk, hogy a Claude környezet volt az egyetlen, amely nemcsak azonosított egyes kockázati faktorokat, hanem ezek kezelésére is javaslatot is tett. Ami az azonosított kockázati tényezők számát illeti, a Gemini volt az, amelyik a legtöbb kockázati tényezőt azonosította, szám szerint 14-et. Mindegyik környezet igyekezett csoportosítani az azonosított kockázatokot. A csoportosítás miatt, közvetve ugyan, de támogatást nyújtanak ezek kezelésére. Ismert tény, hogy a kockázatkezelés során kockázati csoportokat kell kialakítani, amelyekre külön humán és pénzügyi erőforrásokat érdemes meghatározni. A kockázatok csoportosítása által hatékonyabb ezek kezelése, csak a legkritikusabb kockázatokat érdemes külön-külön kezelni.

Az általunk megfogalmazott feladat kitűnő példa arra is, hogy az MI-t érdemes a projekt tervezése során akkor is használni, ha a projektet tervező csapatnak van már korábbi tapasztalata hasonló projektekben. A kockázatokra vonatkozó lekérdés még akkor is támpont lehet, ha van korábbi tapasztalatunk. Ilyenkor érdekes lehet a projektmenedzser saját tapasztalatait összehasonlítani azzal, amit az MI jelez. Azokban az esetekben, amikor semmilyen kiindulópontunk sincs, az MI olyan kockázatokra képes felhívni a figyelmünket, amelyekre tapasztalat hiányában nagyon nehéz gondolni. Így például a mi esetünkben,

lévén a fáradási tesztberendezés beszerzése egy teljesen új feladat, meglepetésnek számító kockázati tényező volt a ChatGPT által azonosított azon kockázati tényező, melyet esetleges anyaghibával rendelkező rugók jelentenek a kalibrálási folyamat során. Számunkra egyértelművé vált, hogy az MI fontos eszköz lehet a prediktív projekttervezésben is.

Az első keresést a 2024. november 16. dátumon végeztük el, és azt tapasztaltuk, hogy mikor megismételtük a keresést, eltérő eredményeket kaptunk. A dolgozatban feltüntetett adatok a 2024. november 18-i dátumon generált adatokra épülnek. Kutatásmódszertani szempontból arra a következtetésre jutottunk, hogy jelenleg érvényes kutatási módszertanok tudományetikai szűrőjén ez a kutatási mód nem felel meg teljes mértékben meg az elvárásoknak, ugyanis a kísérleti eredmények nem reprodukálhatók, nem ismételhetők meg ugyanazokkal az eredményekkel. Ennek ellenére érdekes megállapításokat tehetünk, következtetéseket vonhatunk le. Ugyanakkor, mivel rögzítettük a kísérletünk során a promptra kapott válaszokat, bizonyos szempontból lehetőség lesz a jövőben egy longitudinális kutatásra az MI-platformok fejlődésének az elemzésére. Tudományos igényességgel próbálhatjuk meg az egyes platformok fejlődését vizsgálni az időben egyetlen prompt alapján. További érdekes elemzésekre ad lehetőséget az, hogy a kérdést az MI-területen egy igen elterjedt nyelven, angolul, illetve egy világszinten viszonylag kevesen beszélt, szokatlan szórendű és nyelvtannal rendelkező nyelven, magyarul is megkérdeztük. Nem képezi jelen dolgozatunk tárgyát, de nyilvánvalóan eltérések mutatkoznak a magyar és az angol válaszok között is. A dolgozat során bemutatott adatok az angol nyelven kapott válaszokat mutatja be.

A tény, hogy az adott promptra akár pár perces eltéréssel is egyes részleteiben eltérő eredményeket kapunk, még ugyanazon platformon is, csak megerősíti azt az ismert tény, hogy az MI által szolgáltatott adatokat a tudományban és a gyakorlati kontextusban is a megfelelő óvatossággal kell kezelni. Ez elsősorban az általunk vizsgált nyelvi tanulásra épülő adatszolgáltatásra vonatkozik, és nagymértékben nem igaz azon orvosi, műszaki vagy más területen kidolgozott MI-t felhasználó specifikus alkalmazásokra (pl. képfeldolgozásra épülő diagnosztika).

6. Következtetések

A bemutatott esettanulmányon keresztül kísérletet tettünk arra, hogy bemutassuk egy viszonylag egyszerű példán keresztül, hogy a mesterséges intelligencia immár a projektmenedzsment valós eszköze lehet. Teljesen újszerű, ismeretlen projektek műszaki projektek tervezésében, ütemezésében nyújthatnak támogatást. A MI szakmailag valóban megalapozott ütemtervet volt képes javasolni, azonosította a legfontosabb tevékenységeket (ún. „task”-okat), és az időtartam és a költségbecslés hasznos adatot jelenthet a projekt tervezésében, még úgy is, hogy egyértelműen az adatok nem pontosak. Ne felejtjük el, hogy a bemutatott esettanulmány egyetlen kérdésre (prompt) épül. Ez az egyetlen utasítás számtalan használható adatot hozott a projektmenedzser számára. A valóságban semmi nem akadályozza meg a projekttervező csapatot, hogy részletesen, kérdések sorozatán keresztül kérje az MI segítségét. Valós esetben nyilvánvalóan egy beszélgetés zajlik le a tervezőmérnök vagy projektmenedzser és az MI-környezet között. Ez lehetővé teszi az adott MI-nek adott környezet számára, hogy finomítsa a válaszokat. Azon válaszok esetén, ahol az előző promptra nem kielégítő a válasz, mindig van lehetőség a javításra. A mi kísérletünkben összehasonlíthatóság miatt ettől a lehetőségtől kénytelenek voltunk eltekinteni, és mindent egyetlen utasításorban összesűríteni.

A támogatást mi elsősorban az egyes feladatok azonosítására, ezek időtartamának becslésére kértük, továbbá arra, hogy elemezzék az egyes erőforrások elérhetőségének mértékét. Az ütemtervekre vonatkozó adatszolgáltatás viszonylag használhatónak bizonyult. Láthattuk, hogy a mesterséges intelligencia jelentős segítséget képes nyújtani, már a tervezés fázisában, a projekt során jelentkező kockázatok kezelésében.

A szimulációk rávilágítanak a sebezhetőség lehetséges területeire, és lehetővé teszik a kiigazításokat. Az MI viszonylag megbízhatónak mondható a kockázati tényezők azonosításában is. Bár erre a kérdésre konkrét válaszokat csak kisebb mértékben kaptunk a kísérletünk során, de az a pár azonosított kockázati tényező alapot képezhet egyes kockázatcsoportok azonosítására, illetve további kérdések megfogalmazása után részletesebb, pontosabb lista készülhet.

Az MI által elemzett hatalmas adatmennyiség rávilágít, felismer mintákat és összefüggéseket, számtalan korábbi projekt adatait vizsgálva, korábban elképzelhetetlen elemzéseket képes a pro-

jektmenedzser számára megtenni. A gépi tanulás által a MI képes tehát újabb szintre emelni az adatalapú döntés-előkészítést, és hamarosan elengedhetetlen eszközzé válhat a komplex projektek proaktív tervezésében. Ez nyilvánvalóan jobb erőforrás-felhasználást eredményez a majdani projekt kivitelezésekor, emelve a projekt sikerességének valószínűségét. A mesterséges intelligencia fejlődésével a projektmenedzsment területén is újabb és újabb lehetőségek születnek, alakítva az egyébként is dinamikusan változó tudományterületet.

Azt is láthattuk azonban, hogy igazolni látszik az is, hogy túl a felsorolt vitathatatlan előnyök mellett, az adatok megbízhatósága vitatható, jelenleg nem lehet kizárólag az MI-re bízni a kockázatelemzést, de még az ütemezést és a költségtervezést se. A saját kísérletünkben is jól látható, a szolgáltatott adatok eltérnek aszerint, hogy melyik MI-környezetet kérdeztük. Emiatt az MI által szolgáltatott adatok felhasználása kockázattal jár, és önmagában újabb kockázatokat generálhat, mégis az MI olyan lehetőségeket kínál, amelyre korábban nem volt lehetőség. A kockázatok azonosítása és csökkentése hagyományosan az emberi szakértelemre és tapasztalatra támaszkodik. A projektmenedzsment egyik alapvető jellemzője a viszonylag magas kockázat (a projektek meghatározása alapján egyedi, újszerű és viszonylagosan magas komplexitású tevékenységek sorozata), emiatt a projekt sikere a potenciális kockázatok tengerében való eligazodás képességétől függ. Ebben kínál segítséget, sőt gyakran, megoldást immár a mesterséges intelligencia. Állíthatjuk, hogy összességében, körültekintő használat mellett, növeli a projekttervezés biztonságát, csökkenti a sikertelenség kockázatát. A mesterséges intelligencia jelenléte a projektmenedzsmentben (sem) immár nem egy kísérlet, hanem egy valós, erőteljes, napi szinten használható, nehezen megkerülhető eszközzé vált.

Dolgozatunkban a projektmenedzsment egy igen kis szeletét vizsgáltuk, emiatt az itt levont következtetések nyilvánvalóan nem reprezentatívak, sem a vizsgált kérdéskörben, sem az adott MI-környezet képességeinek meghatározásában. Szándékunk volt igazolni, hogy a mesterséges intelligencia és a nagy nyelvi modellek igenis használhatók egyes műszaki projektek ütemezésénél. Mivel rögzítettük a kísérletünk során a promptra kapott válaszokat, egy longitudinális kutatás során lehetőségünk lesz az MI-platformok fejlődésének az elemzésére. Így tudományos igényességgel

próbálhatjuk meg az egyes platformok fejlődését vizsgálni az időben egyetlen prompt alapján.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Rodrigues R.: *Legal and Human Rights Issues of AI: Gaps, Challenges and Vulnerabilities*. Journal of Responsible Technology, 4. (2020) 100005. <https://doi.org/10.1016/j.jrt.2020.100005>
- [2] (EU) 2024/1689 rendelet: A mesterséges intelligenciára vonatkozó harmonizált szabályok megállapításáról szóló rendelet, Európai Unió, 2024. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TX-T/?uri=CELEX:32024R1689](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TX/T/?uri=CELEX:32024R1689)
- [3] Hadi M.U., Al-Tashi Q., Qureshi R., et al.: *Large Language Models: A Comprehensive Survey of Its Applications, Challenges, Limitations, and Future Prospects*. TechRxiv. (2024). <https://doi.org/10.36227/techrxiv.23589741.v6>
- [4] Russell S., Norvig P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2. ed. Pearson Education, 2020.
- [5] Suzuki M., Matsuo Y.: *A Survey of Multimodal Deep Generative Models*. Advanced Robotics, 36/5–6. (2022) 261–278. <https://doi.org/10.1080/01691864.2022.2035253>
- [6] Projektmenedzsment útnutató. 6. kiadás. Akadémiai Kiadó, 2020. ISBN: 978 963 454 501 9
- [7] Royer P. S.: *Risk Management: The Undiscovered Dimension of Project Management*. Project Management Journal, 31(1), (2000) 6–13. <https://doi.org/10.1177/875697280003100103>
- [8] Taboada I., Daneshpajouh A., Toledo N., de Vass T.: *Artificial Intelligence Enabled Project Management: A Systematic Literature Review*. Applied Sciences, 13/8. (2023) 5014. <https://doi.org/10.3390/app13085014>
- [9] Bellam S.: *Robotics vs Machine Learning vs Artificial Intelligence: Identifying the Right Tools for the Right Problems*. Credit & Financial Management Review, 24/2. (2018) 1–10.
- [10] Wang Q.: *How to Apply AI Technology in Project Management*. PM World Journal, 8/3. (2019).
- [11] Shen Q.: *AI-Driven Financial Risk Management Systems: Enhancing Predictive Capabilities and Operational Efficiency*. Applied and Computational Engineering, 69. (2024) 134–139. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/69/20241494>
- [12] Warin T., Stojkov A.: *Machine Learning in Finance: A Metadata-Based Systematic Review of the Literature*. Journal of Risk and Financial Management, 14. (2021) 302. <https://doi.org/10.3390/jrfm14070302>
- [13] Subramaniyan M., Skoogh A., Bokrantz J., Sheikh M. A., Thüner M., Chang Q.: *Artificial Intelligence for Throughput Bottleneck Analysis – State-of-the-art and Future Directions*. Journal of Manufacturing Systems, 60. (2021) 734–751. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.07.021>
- [14] Pan Y., Zhang L.: *Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management*:

- A Critical Review and Future Trends. Automation in Construction*, 122. (2021) 103517.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- [15] Santos J. I., Pereda M., Ahedo V., Galán J. M.: *Explainable Machine Learning for Project Management Control*. *Computers & Industrial Engineering*, 180. (2023) 109261.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109261>
- [16] Moussa A., Ezzeldin M., El-Dakhkhni W.: *Predicting and Managing Risk Interactions and Systemic Risks in Infrastructure Projects Using Machine Learning*. *Automation in Construction*, 168. (2024) 105836.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105836>
- [17] Odejide O. A., Edunjobi T. E.: *AI In Project Management: Exploring Theoretical Models for Decision-Making and Risk Management*. *Engineering Science & Technology Journal*, 5/3. (2024) 1072–85.
<https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.959>
- [18] Prasetyo M. L., Peranginangin R. A., Martinovic N., Ichsan M., Wicaksono H.: *Artificial Intelligence in Open Innovation Project Management: A Systematic Literature Review on Technologies, Applications, and Integration Requirements*. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11/1. (2025) 100445.
<https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2024.100445>
- [19] Simón C., Revilla E., Sáenz M. J.: *Integrating AI in Organizations for Value Creation through Human-AI Teaming: A Dynamic-Capabilities Approach*. *Journal of Business Research*, 182. (2024) 114783.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114783>
- [20] Patel N: *Practical Project Management for Engineers*. Artech House Publishers, 2023
- [21] Ehrlinger F., Ehrlinger L., Ehrlinger L., Geist V., Ramler R., Sobiezy F., Zellinger W., Brunner D., Kumar M., Moser B: *AI System Engineering—Key Challenges and Lessons Learned*. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 3/1. (2021) 56–83.
<https://doi.org/10.3390/make3010004>
- [22] OpenAI, ChatGPT chatbot, 2025.
<https://chatgpt.com> (megtekintve 2025. január 2.)
- [23] Google, Gemini AI assistant, 2025.
<https://gemini.google.com/app> (megtekintve 2025. január 2.)
- [24] Microsoft, Copilot AI, 2025.
<https://copilot.microsoft.com> (megtekintve 2025. január 2.)
- [25] Anthropic, Claude AI, 2025. <https://claude.ai> (megtekintve: 2025. január 2.)
- [26] OpenAI, About OpenAI, 2025.
<https://openai.com/about/> (megtekintve: 2025. január 2.)
- [27] Ayanza, Ayanza AI Assistant, 2025.
<https://ayanza.com> (megtekintve: 2025. január 2.)
- [28] Stepsize, GenAI, 2025.
<https://www.stepsize.com> (megtekintve: 2025. január 2.)
- [29] Zapier, Zapier AI chatbot, 2025.
<https://zapier.com/ai/chatbot> (megtekintve: 2025. január 2.)
- [30] ICONIQ+Pandorabots, Kuki AI, 2025.
<https://www.kuki.ai> (megtekintve: 2025. január 2.)
- [31] Taskade, Taskade AI, 2025.
<https://www.taskade.com> (megtekintve: 2025. január 2.)



FÉK- ÉS FÉKRÁSEGÍTŐ RENDSZER TERVEZÉSE ELEKTROMOS VERSENYAUTÓHOZ

DESIGN OF A BRAKE AND BRAKE ASSIST SYSTEM FOR AN ELECTRIC RACE CAR

Borbély Bálint,¹ Szántó Attila,² Diós Szabolcs Sándor,³ Husi Géza⁴

¹ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország,
borbelybalint26@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, Magyarország,
szanto.attila@eng.unideb.hu

³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Informatikai Kar, Debrecen, Magyarország,
dios.szabolcs@eng.unideb.hu

⁴ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország,
husigeza@eng.unideb.hu

Abstract

The project investigates the conversion of a Toyota MR2 W10 passenger car. The aim was to replace the car's original braking system with a more modern one, so that the car's braking system could cope with more demanding conditions than planned in competition. The design took into account the stresses on the braking system and the adhesion and friction coefficients.

Keywords: *prototype electric race car, brake system, brake assist system, design.*

Összefoglalás

A projekt témája egy Toyota MR2 W10-típusú személygépjármű átalakítása volt. A kitűzött cél az autó gyári fékrendszerének lecserélése volt egy modernebbre, hogy versenykörülmények között az autó fékrendszere a tervezettnél nagyobb igénybevétel esetén is helyt tudjon állni. Az tervezésnél figyelembe vettük a fékrendszer igénybevételét, valamint a tapadási és súrlódási együtthatókat.

Kulcsszavak: *prototípus, elektromos versenyautó, fékrendszer, fékrásegítő rendszer, tervezés.*

1. Bevezetés

A DEAC Motorsport több mint 4 éve versenyez az MNASZ által megrendezett Szlalom Bajnokságon. Ezalatt az idő alatt számos versenyt megnyertünk több kategóriába.

A jövőben viszont szeretnénk saját tervezésű járművekkel is rajthoz állni más kategóriákban is. Ennek keretei között kezdődött meg a Debreceni Egyetem Műszaki Karán egy Toyota MR2-gépkocsi átalakítása.

A projekt több részből áll, a jelenlegi tanulmány a fékrendszert vizsgálja. A járművet az **1. ábra** reprezentálja.



1. ábra. Toyota MR2 [1]

Először is a gyári fékrendszer adatait vizsgáltuk meg. Az első tárcsa 252 mm átmérőjű és úszónyerges kivitelű. A gyári adatok szerint a 100km/h sebességről végzett fékezési távolság a megállásig 44 méter. Ez a mai autóknak, melyek ABS-sel is elvannak látva, 32-35 méter.

2. A jármű-fékrendszer átalakítása

A gyári fékrendszertárcsára ható erő számítása az alábbiak szerint történik a megadott gyári értékek függvényében:

- Hidraulikus nyomás (P): 80 bar
- Dugattyú átmérője (d): 51 mm
- Súrlódási együttható (μ): 0,3
- Dugattyúk száma (n): 1
- Féktárcsa effektív sugara (r): 0,12 m [2].

Dugattyúfelszín-számítás [3]:

$$A = \pi d^2 / 4 \quad (1)$$

A fékbetét által kifejtett erő:

$$F_r = P \cdot A \cdot n \quad (2)$$

A féktárcsára ható erőt a fékbetét által kifejtett erő és a súrlódási együttható szorzata adja meg:

$$F_f = \mu \cdot F_r \quad (3)$$

A fékerő által kifejtett nyomaték a féktárcsán:

$$M = F_f \cdot r \quad (4)$$

Ugyanezen elv alapján meghatározható az új beépítendő fékrendszer fékezési ereje.

A Toyota MR2-es fékrendszerének kialakítására több megoldás is kínálkozott számunkra. Az egyik, hogy egy teljesen új rendszer kerül megtervezésre, a másik, hogy egy már meglévő járműről lesz átrakva. Mivel az egyetlen több jármű is a tulajdonában van, így egy Opel Vectra C-típusú autóról fog átkerülni a fékrendszer. Ugyanakkor

azt figyelembe kell venni, hogy ezzel a módosítással a jármű viselkedése is változni fog.

Az EBC Orangestuff fékbetét lesz talán a legnagyobb változás, mivel ennek a súrlódási együtthatója 0,5, amely akár 0,6 fölé is emelkedhet terhelés hatására. A másik változás a féktárcsa átmérője, amely 285mm-re nő meg, illetve a fékdugattyú mérete, amely 57mm-re nő.

A módosított fékrendszertárcsára ható erő számítása a fentiekben ismertetett képletek szerint lehetséges [2].

A módosított fékrendszer alapértékei:

- Hidraulikus nyomás (P): 80 bar
- Dugattyú átmérője (d): 57 mm
- Súrlódási együttható (μ): 0,5
- Dugattyúk száma (n): 1
- Féktárcsa effektív sugara (r): 0,135 m.

A következőkben az osztókörmódosítást kellett megcsinálni, úgy, hogy az új féknyeregkengyel elférjen. A kerékcsapágy osztóköre 4×100, ami azt jelenti, hogy 4 furat van egy 100 mm átmérőjű körön elhelyezve. Viszont a felszerelni kívánt féktárcsának az osztóköre 5×110, így egy osztókörmódosítót (2. ábra) kell tenni a féktárcsa és kerékcsapágy közé.

A megkönnyített méretezés érdekében elkészítettünk egy minta-osztókörmódosítót Solid Edge programban [5], és STL-formátumból kinyomtatottuk 3D-nyomtató segítségével.

A 3D-nyomtatás során FDM-, vagyis Fused Deposition Modelling [6] technológiát alkalmazó gépet használtunk. Mivel járműalkatrészről van szó, így a minta-osztókörmódosítóhoz ABS+ ipari műanyagot választottunk. Fontos kiemelni, hogy a 3D-nyomtatvány (3. ábra) csak egy „mintaként” szolgál, nem végleges beépítendő elem.



2. ábra. Az osztókörmódosító [4]



3. ábra. 3D-nyomtatott minta-osztókörmódosító

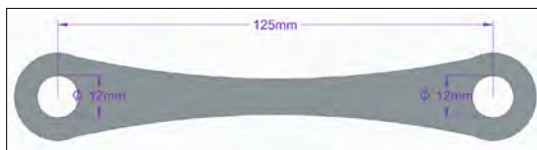
A középső gyűrűjét úgy terveztük meg, hogy a belső átmérője megegyezzen a kerécsapágy gyűrűjének átmérőjével, a külső gyűrűje pedig a féktárcsa középfuratával.

Hogy a féknyeregkengyelt is fel lehessen szerelni a csonkra, egy adaptert is kellett tervezni. A gyári féknyeregkengyellel csak a kisebb fékbetéteket lehetne használni, amelyek nem fognának a féktárcsa teljes terjedelmén, illetve a féknyereg is kisebb erőt tud kifejteni.

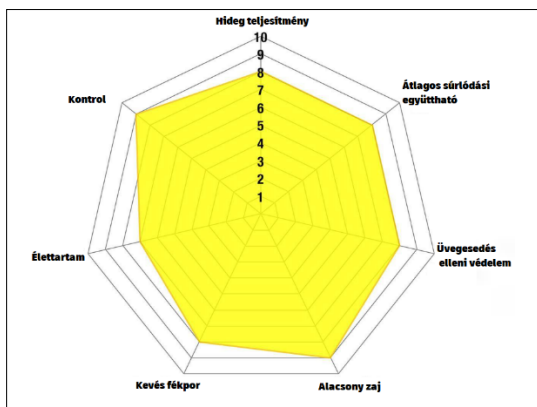
A Vectra C féknyereg viszont nagyobb dugattyúátmérővel rendelkezik, és a fékbetét is majdnem dupla akkora területű a Toyota MR2 fékjéhez képest. Viszont a tárcsaátmérő növekedésével és az osztókör megváltozásával a gyári felnik nem lesznek kompatibilisek az autóval, így 5×110 , esetleg 5×112 osztóköri felnit lehet az autóra szerelni. Az 5×112 osztókör esetén mozgókúpos kerécsavarokat kell alkalmazni. A féknyeregkengyel 2 rögzítőcsavarjának furata majdnem illeszkedik a kerékcsonkon található furatokkal, viszont van egy kis eltérés. A kerékcsonkon található furatok távolsága 130 mm, míg a kengyel furatainak távolsága 125 mm.

A furatok mérete megegyezik, a csonkon és a kengyelen is 12 mm átmérőjű furatok vannak, menet viszont csak a kengyelben van, 1,25 mm menetemelkedéssel (4. ábra).

Az első fékbetétnek az EBC DP41414R „Yellows-tuff” [7] versenyfékbetét lett kiválasztva. Ezt a



4. ábra. Konzolon a furatok távolsága



5. ábra. EBC DP91414 gyártó által megadott teljesítménydiagram [7]

fékbetétet versenypályás használatra tervezték, főleg szlalom- és hegyi versenyekre (5. ábra).

Általánosan a választott fékbetét 0,6 sűrűdási értékkel rendelkezik 800 Celsius-fok fölött, és üzembiztos. Az EBC-fékbetét jellemzően mentes az egészséget károsító anyagoktól is [7].

A kézifék esetünkben bowdenes, így azt az autóban található kézifékkarral, egy méretre gyártott bowdennel lehet majd működtetni. Fontos, hogy a kábelek hossza egyforma legyen, hogy a két féknyereg a kézifék behúzására egyszerre és ugyanannyit fékezzen mindkét oldalon. Az autó kézifékkarjában van egy érzékelő, amely azt a célt szolgálja, hogy amennyiben gyújtáson és járó motornál a kézifék be volt húzva, egy visszajelző lámpát aktivált, amely a műszerfalán mutatta, hogy a kézifék behúzásra került.

Ezt az elektromos motor beépítése után egy megszakítóval is el fogjuk látni, amely a „gázpedál” és a motor vezérlőjének összeköttetését szakítja meg. Ezáltal behúzott kéziféknél a gázpedál nem fog jelet továbbítani a motorvezérlőnek, ezzel is védve a motort és a hajtás többi részét. Illetve egy visszajelző lámpa is lesz szerelve a műszerfalba, amely behúzott kézifék esetén világít, mivel jelenleg az autó csak egy üres kasztni, és nincs benne a műszerfal sem.

3. Fékcsőzáró „Line-lock”-rendszer

A fékcsőzáró rendszer, avagy a „Line-lock system” arra szolgál, hogy az első vagy hátsó fékkört el lehessen zárni, ezáltal az a kör nem kapja meg a hidraulikus nyomást, így a fékpedál lenyomásakor csak a nyitott kör fog fékhatást kifejteni (6. ábra).

Az univerzális szetteket fékcsővenként lehet beépíteni, és 12V rendszerre kötve működik [8].



6. ábra. Fékcsőzáró készlet [8]

Elzárt állapotban a visszajelző lámpa világít, és jelzi a vezető felé, hogy a fékkör nincs használatban. Az autóba 2 szett lesz beszerelve a hátsó fékekre. A végén egy kapcsolóra lesz kötve, így a teljes hátsó fékrendszer egy gombnyomásra elzárásra kerül.

Azért van szükség erre, mert az autó versenygumikon fog menni, amelyeknek a működési tartománya hőmérsékletfüggő. A hirtelen, felületi hőmérséklet-emelkedést az úgynevezett gumiégetéssel vagy „burnout”-tal lehet elérni. A gumiégetés során a hajtott kerekek, jelen esetben a hátsó kerekek kipörögnek, míg a fékkel az autó egy helyben van tartva. Fékcsőzáró rendszer hiányában a hátsó fék is működne, ezzel egyszerre hajtást és lassítóerőt is kapna, ami mind a hajtásláncre és a fékre is nagy terhelést ad. Amennyiben ezzel a rendszerrel fel lesz szerelve az autó, a gumiégetés előtt a hátsó féket el lehet zárni, és a melegítés alatt csak az első fék fog fogni, ezáltal az autó mozdulatlan maradhat, és kisebb lesz a hajtáslánc terhelése, mivel nem lesz fékezőerő a hátsó tengelyen.

4. Elektromos vákuumszivattyús fékrásegítés

Az autó fékrásegítővel van felszerelve, ezáltal a kényelmes és erős fékezést a gyári rendszerrel is el lehet érni, azonban a belső égésű motor hiánya miatt (mivel a fékrásegítő ebben a változatban a szívócsőről kap vákuumot) jelen állapotában üzemképtelen.

Először is utánanéztünk annak, hogy a mai elektromos autókban milyen fékrásegítő megoldásokat használnak. Többféle megoldást alkalmaznak az autógyártók, alacsonyabb kategóriás autókban hagyományos vákuumos fékrásegítőt használnak, és egy elektromos vákuumszivattyú látja el a fékrásegítőt a kellő 0.8–1 bar körüli vákuummal [9] (7. ábra).

Ezen megoldás itt is alkalmazható, mivel az autónak van 12V elektromos rendszere. Ezeknek a szivattyúknak kétféle működtetése lehet: szabályozással és vezérléssel működő (8. ábra).

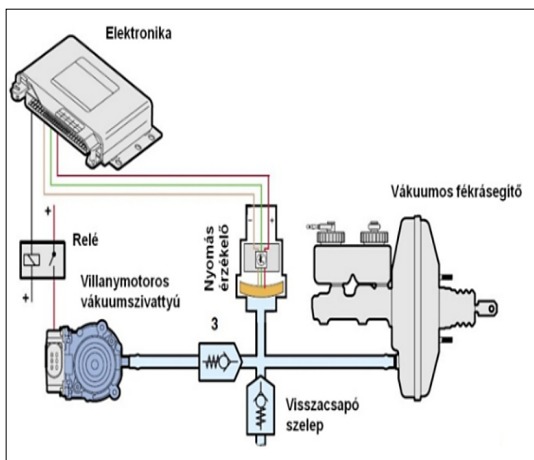
5. Jármű validálása szimulációs méréssel

Mivel a járműáttervezés többlépcsős folyamat, és több fejlesztés párhuzamosan zajlik, ezért egy virtuális modellt is meg kellett alkotni az előzetes járműteszteléshez (9. ábra).

Ehhez a Camshaft Software által fejlesztett Automation [11], valamint a BeamNG.Drive [12] került



7. ábra. Elektromos vákuumszivattyú [9]



8. ábra. Elektromosvákuumszivattyú-bekötés [10]



9. ábra. Toyota MR2 BeamNG.Drive

felhasználásra. Mindkét programot széles körben alkalmazzák motorok és járművek tesztelésére.

Először is Automation programban beállítottuk az eredeti és módosított féket, hogy a fékerő a kiszámolt fékerőt adja. Minden teszt szimulációs idő szerint 8:52-kor készült, napos időben és szélcsendben. A környezeti levegő hőmérséklete 25 °C-ra van állítva. Gravitációs gyorsulás: 9,81 m/s². A tesztekre és szimulációra használt pálya aszfaltjának tapadási súrlódási együtthatója 0,98, csúszási súrlódási együtthatója 0,7.

Gyárfék-szimuláció:

Először is felvettük a gyári fék adatait. A piros folytonos vonal az első fékerőt jelzi, míg a kék a hátsó fékerőt. Baloldalt a fékerő látható N-ban, alul pedig a jármű sebessége.

Az autó súlya ebben az esetben 1090 kg elől 252 mm átmérőjű féktárcsákkal, hátul 240 mm átmérőjű féktárcsákkal. A szaggatott vonalak a tapadási határt mutatják a gumikhoz. Ezekbe az értékekbe minden tényező bele van számítva, a leszorítóerő és még a súlypont vándorlása is (10. ábra).

A következő ábra a fékezési időt mutatja be. Baloldalt a jármű sebessége, míg alul a fékpedál lenyomásától eltelt idő látszik (11. ábra).

Az autó a végsebességéről majdnem 7 másodperc alatt áll meg, és a 100–0 km/h-ról történő megállása alatt 44 métert tesz meg. A gumí 185/55R15 utcai gumí.

Elektromos Toyota MR2 a módosított fékkel:

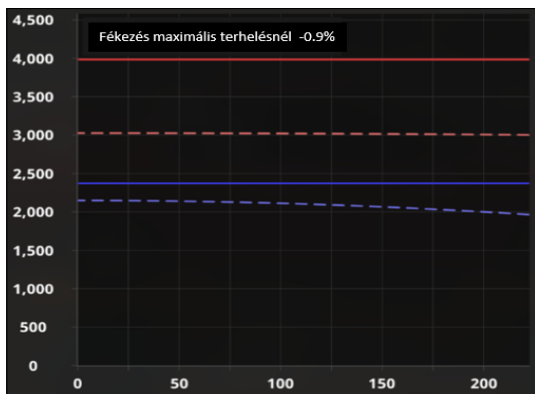
Következő lépésben a fejlesztett autó adatai kerültek megadásra. Mivel üvegszálazal elemekkel lesz ellátva, a belső égésű motor pedig egy elektromos motorra és egy akkumulátorra cserélődik, így mind súlypontban és súlyban is változás lesz.

Így az autó súlya 958 kg-ra csökken. Felszerelésre kerül a módosított fékszett is, így már elől 285 mm, míg hátul 278 mm a féktárcsa átmérője.

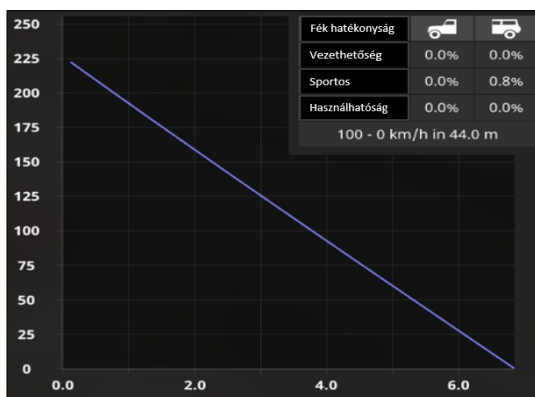
A piros folytonos vonal (12. ábra) az első fékerőt jelzi, míg a kék a hátsó fékerőt. Baloldalt a fékerő látható N-ban, alul pedig a jármű sebessége.

A szaggatott vonalak szintén a gumí tapadási határát jelzik, ez is nőtt, mivel a gumik 305/30ZR15 semi-slick gumikra lettek cserélve, ilyen méretű gumikat szeretnénk használni a versenyeken is.

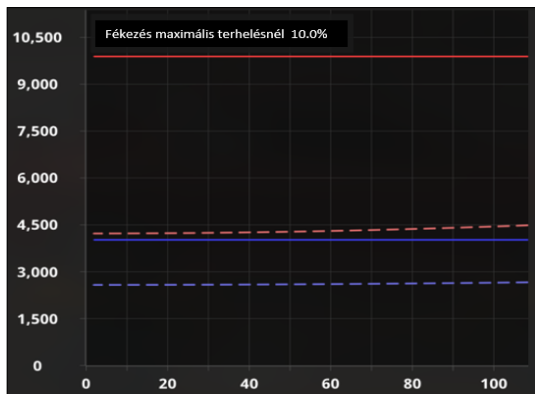
Az Automation programból közvetlenül át lehet ültetni az elkészült modelleket BeamNG.Drive-ba, ahol úton is lehet a megtervezett autókat használni. Így ebben a programban folytattuk, és aszfaltos úton megnéztük, mennyire hitelesek az Automation által adott adatok.



10. ábra. Gyári fék szimulált teljesítménye



11. ábra. Gyári fék féktávja



12. ábra. Módosított fék szimulált teljesítménye

A teszt 4 futamból állt, és a legjobb idő számított. Egy futam 100 km/h-ra gyorsításból és onnan egyből teljes fékezésből állt. Majd ezt követte ugyanaz 150 km/h-ról. Mindemellett a féktárcsák hőmérsékletét is folyamatosan figyelte a program.

Először a gyári adatokkal végeztük el a mérést. A féktárcsa hőmérsékletét a program egy Excel-táblázatba importálta, 1 másodperces mintavétellel (1. és 2. táblázat).

1. táblázat. 100km/h-ról fékezés első alkalommal

Hőmérséklet	Hátsó fék	Első fék
Felszín	118 °C	137 °C
Belső	108 °C	130 °C

2. táblázat. 100km/h-ról fékezés negyedik alkalommal

Hőmérséklet	Hátsó fék	Első fék
Felszín	208 °C	243 °C
Belső	186 °C	226 °C

Utána a módosított fékkel néztük meg a fékezési adatokat (3. és 4. táblázat).

3. táblázat. 100km/h-ról fékezés első alkalommal

Hőmérséklet	Hátsó fék	Első fék
Felszín	143 °C	218 °C
Belső	144 °C	208 °C

4. táblázat. 100km/h-ról fékezés negyedik alkalommal –módosított fék

Hőmérséklet	Hátsó fék	Első fék
Felszín	119 °C	292 °C
Belső	119 °C	278 °C

Mint látható, a hátsó fék nem nagyon melegszik, a tömegközéppont túlságosan előreesik, és az elektromos motor fékezése is megkönnyíti a hátsó fék dolgát, plusz energiát is termel vissza. Ezt az iBooster segítségével nagyon jól is lehet majd szabályozni.

6. Digitális infrastruktúra és fejlesztések

A Debreceni Egyetem, Műszaki Kar az utóbbi években jelentős fejlesztéseket hajtott végre, így az új infrastruktúrának köszönhetően számos irányban indultak meg fejlesztések. A Járműgyártás Laborban régi gépegységek felújítása kezdődött meg AI-funkciókkal kiegészítve [13]. Továbbá, ahogy a fenti projektben is digitális modellt alkalmaztunk a jármű kapcsán, úgy az oktatásban is megjelentek Digital-Twin-modellek, amelyek az oktatás megkönnyítését szolgálják [14, 15]. Machine learning technikákkal [16] pedig szortírozást és az egyéb alkatrészek válogatását valósítottuk meg [17], amely a járműgyártás és -fejlesztés szempontjából is fontos. Kompozitanyagok tekintetében szintén történnek előrelépések, amelyek

hozzájárulhatnak a jobb karosszériagyártáshoz [18]. A járműmodellezés kapcsán kiemelten fontos a telemetria adatok [19] gyűjtése és azok feldolgozása, ezt figyelembe véve kezdtünk el saját Linux-disztribúció-alapú szervert építeni [20]. A jövőben így lehetőségünk lesz további járművekkel kapcsolatos szimulációs modellek megtervezésére [21]. 3D-nyomatási [22] kapacitásunk révén pedig, lehetőségünk van a légi járművekkel kapcsolatos projektek indítására is [23].

7. Következtetések

A fékrendszert első számú átalakításnak kell venni egy járműfejlesztés során különösen, ha az autó kizárólag versenypályán lesz használva. Hiába a nagy végsebesség, ha nem lehet az autót megállítani, stabilan vezetni. Hiszen a gyors lassulás az, amit minden kanyar előtt szeretnénk tapasztalni, nem pedig a hirtelen megállás. A megnőtt fékerőnek és a semi-slick gumiknak köszönhetően a szimuláció adataira hivatkozva a fékút 44 méterről 29 méterre csökkent, 100 km/h-ról megállásig számítva. Minél nagyobb sebességről hajtjuk végre a fékezést, az eredmény annál nagyobb javulást mutat. A Solid Edge-ben megtervezett alkatrészeket legyártva és a projektben említett alkatrészek beszerzése után a többi hallgatóval és a DEAC Motorsport csapattagjaival együtt elkezdődik az autó megépítése, átalakítása.

Célunk az, hogy az első versenyre egy kész autót tudjunk rajthoz állni, és tesztelni az addigi munkánkat. A szimulációalapú validálás bemutatva, mennyire fontos is az, hogy előzetesen rendelkezésre álljon egy szimulációs környezet, ahol direkt versenyzési célra kifejlesztett fékrendszert tudunk tesztelni felvitt adatok alapján. A becslések alapján magasabb hőmérsékleteken sem romlott a féktáv, és a belső és súrlódó felület alacsony hőmérséklet-különbsége bemutatja, mennyire jó a tárcsa hőátadó és hővezető képessége.

Természetesen fejlesztési lehetőségek továbbra is vannak a járművön, a most vázoltak csak az egyik állomása a projektnek.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet nyilvánítani Erdei Timoteinek, a Járműmérnöki Tanszék oktatójának egyben a Járműgyártás Labor vezetőjének. Továbbá a Debreceni Egyetem Műszaki Karának.

„A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EKÖP-24-4 KÓDSZÁMÚ EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Klug L.: Visszatérhet a Toyota MR2, ráadásul már nem elektromosként beszélnek róla. 2023. <https://speedzone.hu/visszaterhet-a-toyota-mr2-egyelore-csak-japanban/>
- [2] MR2-Gen2-UK-launch-pack-1990 [Online] <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/MR2-Gen2-UK-launch-pack-1990.pdf>
- [3] Kádár L., Varga F., Kőfalusi P.: Közúti járműrendszerek szerkezetana. 2014 [Online]. https://mogi.bme.hu/TAMOP/kozuti_jarmurendszerek_szerkezetana/index.html
- [4] Osztóköri módosítók adatai általánosan; [Online]: https://www.ebay.com/b/Wheel-Spacers-Adapters-Hub-Centric-Rings-for-Mini-Cooper/122154/bn_7063932216
- [5] Goanta A. M., Haraga G.: (2017). *Aspects of Modelling Classical or Synchronous Modelling with Solid Edge ST 9*. MATEC Web of Conferences, 112. (2017) 06024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206024>
- [6] Templom T., Erdei T. I., Molnár Zs., Shaw E., Husi G.: *Designing a Delta Tripod Based Robot Fused Deposition Modelling 3 Dimensional Printer Using an Open-Source Arduino Development Platform*; MATEC Web of Conferences, 184. (2018) 02013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818402013>
- [7] EBC Féktárcs – fékbetét [Online]; <https://ebcbrakes.hu/auto-fekbetet-fektarcsa-fekcso/opel-fekalkatreszek/opel-vectra/opel-vectra-1-8-2002-2004-12449>
- [8] Line-lock rendszer leírás és adatai [Online] <https://www.emag.hu/tovbmmup-fekzar-elektromos-vezeres-rozsdamentes-acel-kek-sa34749/pd/DQYGSSYBM/>
- [9] Vákuumszivattyú adatai és paraméterei [Online] <https://www.emag.hu/elektromos-vakuumszivattyu-univerzalis-kompatibilis-12v-a-szerelveny-tartozeka-4-huvelyk-6151045565567/pd/DQJ05YBM/>
- [10] Közúti járműrendszerek szerkezetana [Online]: <https://www.mogi.bme.hu/TAMOP>
- [11] Automation - The Car Company Tycoon, Engine and Vehicle Simulator [Online] <https://www.automationgame.com/>
- [12] A. Gambi, M. Mueller, G. Fraser: *AsFault: Testing Self-Driving Car Software Using Search-Based Procedural Content Generation*. 2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings (ICSE-Companion), Montreal, QC, Canada, 2019, 27–30. <https://doi.org/10.1109/ICSE-Companion.2019.00030>
- [13] Kapusi T. P., Erdei T. I., Husi G., Hajdu A.: *Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection*. Robotics 2022, 11, 69. <https://doi.org/10.3390/robotics11040069>
- [14] Erdei T. I., Krakó R., Husi G.: *Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm*. Appl. Sci. 2022, 12, 8862. <https://doi.org/10.3390/app12178862>
- [15] Erdei T. I., Nusser D. P., Husi G.: *Cyber-Physical Recreation of Six DOF Industrial Robot Arm*. International Review of Applied Sciences and Engineering, 15/2. (2024) 147–160. <https://doi.org/10.1556/1848.2023.00660>
- [16] Chowdhury R. S., Islam M. A., Yusuf D. H. B. M., Amin M. Bin, Hassan M. S., Barua S., Abdullah M.: *Implications of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning-Based Fintech for the Financial Assets Related Traditional Investment Theories*. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8/12. (2024) 7415. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i12.7415>
- [17] Erdei T. I., Kapusi T. P., Hajdu A., Husi G.: *Image-to-Image Translation-Based Deep Learning Application for Object Identification in Industrial Robot Systems*. Robotics, 13. (2024) 88. <https://doi.org/10.3390/robotics13060088>
- [18] Alamry A., Islam M. S., Hamdan S., Anwar M., Abdullah M.: *Enhancing the Performance of Hybrid Bio-Composites Reinforced with Natural Fibers by Using Coupling Agents*. Materials Research Express, 12/3. (2025). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad92f4>
- [19] Dave G. S., Pandhare A. P., Kulkarni A. P., Khankal D. V., Abdullah M.: *Experimental Investigation of Centrifugal Pump Machine and Its Faults through Different Type of DAQ System and Selecting One Based on Statistical Approach*. Cogent Engineering, 11/1. (2024) <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2417683>
- [20] Szántó A., Ádámkó É., Juhász G., Sziki G. Á.: *Simultaneous Measurement of the Moment of Inertia and Braking Torque of Electric Motors Applying Additional Inertia*. Measurement, 204. (2022) 112135. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>
- [21] Sziki G. Á., Szántó A., Kiss J., Juhász G., Ádámkó É.: *Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen*. Appl. Sci. 12. (2022) 10095. <https://doi.org/10.3390/app121910095>
- [22] Masuk A., Diós S. S., Dinya T., Szántó A., Husi G.: *Labor Developments and Methods for Supporting Education in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Laboratory*. Műszaki Tudományos Közlemények, 20. (2024) 36–41. <https://doi.org/10.33894/mtk-2024.20.07>
- [23] Masuk A., Géza H.: *Uses of Aero Graphene and CNT in Modern Aircraft*. AIP Conference Proceedings, 2941/1. (2023). 020029. <https://doi.org/10.1063/5.0181354>



AZ MI ÉS A CNC-TECHNOLÓGIA KAPCSOLATA

THE RELATIONSHIP BETWEEN AI AND CNC TECHNOLOGY

Burai István György,¹ Czifra György²

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, burai.istvan@bgk.uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gyártástechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, czifra.gyorgy@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

Our research focuses on the applicability of artificial intelligence (AI) in the education of CNC programming. In this article, we present the current application areas of AI, focusing on its role in CNC technology. We define what the term artificial intelligence entails and briefly review its application areas. The acronym CNC is interpreted, and we summarize the history of CNC. We examine the potential of artificial intelligence, which we use to support CNC technology, and we present the application of AI in the context of Industry 4.0.

Keywords: *artificial intelligence, CNC, Industry 4.0.*

Összefoglalás

Kutatásunk középpontjában a mesterséges intelligencia (MI) CNC-programozás oktatásában való alkalmazhatóságának vizsgálata áll. Ebben a cikkben bemutatjuk az MI jelenlegi felhasználási területeit, fókuszálva a CNC technológiában betöltött szerepére. Megfogalmazzuk, mit takar a mesterséges intelligencia kifejezés, és röviden áttekintjük az MI felhasználási területeit. Értelmezésre kerül a CNC mozaikszó, és összefoglaljuk a CNC történetét. Megvizsgáljuk a mesterséges intelligenciában rejlő lehetőségeket, amit a CNC-technológia támogatására használunk fel, valamint bemutatjuk az MI alkalmazását az ipar 4.0 kontextusában.

Kulcsszavak: *mesterséges intelligencia, CNC, Ipar 4.0.*

1. Bevezetés

A mesterséges intelligencia (röviden MI) olyan számítógépes algoritmusok összessége, amely képes az emberi intelligenciát utánózni a különböző feladatok végrehajtása során. Ilyen tevékenység a tanulás, a problémamegoldás, a tervezés, a természetes nyelv feldolgozása vagy a képfelismerés. A mesterséges intelligencia a rendelkezésre álló adatok alapján, emberi beavatkozás nélkül képes érvelni és döntéseket hozni [1].

A mesterséges intelligencia jelenlegi fejlettségi szintjét figyelembe véve, egy típus érhető el, a speciális mesterséges intelligencia (Artificial Narrow Intelligence – ANI), amelyet szűk vagy keskeny MI-nek is szoktunk nevezni. Ez a típus kizárólag egy adott feladat végrehajtására képes, amelyet hatékonyabban végre tud hajtani, mint

az ember. Ez a jelenleg legmagasabb szintű MI, amellyel találkozhatunk. Idetartoznak például az önvezető járművek, arcfelismerő rendszerek, digitális személyi asszisztensek, nyelvi feldolgozó MI (Copilot, ChatGPT, Gemini, stb.) vagy például egy sakkjáték [2].

A fejlődés következő lépcsőfoka az általános mesterséges intelligencia (Artificial General Intelligence – AGI), amely nemcsak egyetlen feladatra specializálódna, hanem képes lenne komplex gondolkodásra, tanulásra és alkalmazkodásra többféle környezetben. Egy ilyen rendszer az emberhez hasonló módon tudna problémákat megérteni és kreatív megoldásokat keresni. Az AGI ma még kísérleti szinten létezik, fejlesztése az MI-kutatás egyik legfőbb célja.

A legmagasabb szintű elméleti típus a szupertudatos mesterséges intelligencia (Artificial Super

Intelligence – ASI), amely messze meghaladná az emberi intelligenciát nemcsak számítási kapacitásában, hanem érvelésben, döntéshozatalban, sőt, érzelmi és társadalmi intelligenciában is. Az ASI működése alapjaiban változtatná meg a társadalmi és gazdasági rendszereket, ugyanakkor jelentős etikai kérdéseket is felvetne. Ez a típus ma még pusztán elméleti síkon létezik, de fontos része a jövővel kapcsolatos MI-diskurzusnak [3]. Az alábbiakban bemutatásra kerülnek a képességekre vonatkozó eddig ismert technológiai megoldások:

A gépi tanulás (Machine Learning) olyan mesterségesintelligencia-alapú technológia, amely lehetővé teszi, hogy a számítógépes rendszerek automatikusan tanuljanak és fejlődjenek tapasztalatok, illetve adatok feldolgozása révén, anélkül hogy kifejezetten minden egyes lépést programozni kellene. Az algoritmusok mintázatokat ismernek fel az adathalmazokban, és ezek alapján képesek előrejelzéseket, döntéseket vagy osztályozásokat végezni. A gépi tanulás három fő típusa a felügyelt tanulás (supervised learning), ahol ismert bemenet-kimenet párokkal tanul a modell. A felügyelet nélküli tanulás (unsupervised learning), amely rejtett szerkezetek és csoportosítások felfedezésére alkalmas, valamint az erősített tanulás (reinforcement learning), ahol a rendszer jutalmazás és büntetés alapján alakítja ki döntési stratégiáit. A gépi tanulást napjainkban széles körben alkalmazzák például ajánlórendszerekben (Netflix, Spotify), pénzügyi előrejelzésekben, egészségügyi diagnosztikában, csalásfelismerésben és önvezető járművek irányításában.

A mély tanulás (Deep Learning) a gépi tanulás egy speciális ága, amely mély neurális hálózatokat használ. Ezek a hálózatok nagy mennyiségű adathól tanulnak, és képesek komplex feladatokat végrehajtani. Ilyen például a képfelismerés és a természetes nyelvfeldolgozás. A mély tanulás különlegessége, hogy többretegű neurális hálózatokat alkalmaz, amelyek képesek hierarchikus reprezentációkat létrehozni az adatokból. Ez lehetővé teszi, hogy a rendszer fokozatosan egyre elvontabb szinteken értelmezze az információt. A mély tanulás technikai jelentős előrelépést hoztak a gépi látás, beszédfelismerés és természetes nyelvfeldolgozás területén. Például a konvolúciós neurális hálózatok (Convolutional Neural Network – CNN) kiválóan alkalmasak képfelismerési feladatokra, míg a hosszú-rövid távú memóriával (Long Short-Term Memory – LSTM) rendelkező hálózatok hatékonyak a szekvenciális adatok, például szövegek feldolgozásában [4].

Az önvezető autók fejlesztése során a mély tanulás és a számítógépes látás kulcsszerepet játszik. Az ilyen rendszerek konvolúciós neurális hálózatokat (CNN-eket) használnak, hogy feldolgozzák a kamerák és szenzorok által gyűjtött adatokat. Ezek a hálózatok képesek felismerni és értelmezni a környezetet, például az útjelzéseket, gyalogosokat, más járműveket és az útviszonyokat. Az önvezető autók folyamatosan tanulnak, és alkalmazkodnak a különböző közlekedési helyzetekhez, ami növeli a biztonságot és hatékonyságot. A mély tanulás és számítógépes látás alkalmazása lehetővé teszi, hogy az autók önállóan navigáljanak, elkerüljék az akadályokat, és biztonságosan közlekedjenek anélkül, hogy emberi beavatkozásra lenne szükség. Az Uber és a Tesla például jelentős előrelépéseket tett ezen a területen, és folyamatosan fejlesztik az önvezető technológiákat [5].

A természetes nyelvfeldolgozás (Natural Language Processing - NLP) az MI azon ága, amely az emberi nyelv megértésére és generálására összpontosít. Az NLP alkalmazásai közé tartozik például az autocorrect és spell-check funkciók, amelyek segítenek a helyesírási hibák javításában és a szövegek pontosításában. Továbbá, az NLP-t használják szentimentelemzésre, amely lehetővé teszi a szövegek érzelmi tartalmának felismerését és elemzését, például a közösségimédia-bejegyzésekben vagy ügyfélvéleményekben. Az NLP alkalmazható kérdés-válasz rendszerekben is, amelyek automatikusan válaszolnak a felhasználók kérdéseire, például ügyfélszolgálati chatbotokban. Ezenkívül az NLP-technológiát használják szövegfordításra, amely lehetővé teszi a különböző nyelvek közötti automatikus fordítást, például a Google Translate-ben. Az NLP alkalmazásai közé tartozik továbbá a beszédfelismerés, amely lehetővé teszi a beszélt nyelv szöveggé alakítását, például a Siri és Alexa virtuális asszisztensekben. Néhány népszerű NLP-szoftveres megoldás [6]:

- a spaCy egy Python-alapú könyvtár, amely több mint 72 nyelvet támogat, és hatékony szövegfeldolgozást tesz lehetővé;
- a MonkeyLearn egy gépi tanulási platform, amely lehetővé teszi a szövegelemzést és az adatok vizualizálását;
- a Stanford CoreNLP Java-alapú NLP-eszköz, amely nyelvi annotációkat készít szövegekből, és több nyelvet támogat;
- az IBM Watson átfogó vállalati szövegelemző megoldás, amely különböző NLP-feladatokat képes végrehajtani.

A számítógépes látás (Computer Vision) lehetővé teszi a számítógépek számára, hogy képeket és videókat értelmezzenek. A számítógépes látás alkalmazásai közé tartozik az arcfelismerés, az objektumfelismerés és az önvezető autók.

Az arcfelismerő rendszerek képesek azonosítani és hitelesíteni az embereket az arcuk alapján. Például a FaceID-technológia az Apple eszközein lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy az arcukkal oldják fel a készülékeiket. Az arcfelismerést biztonsági rendszerekben is alkalmazzák, például a repülőtereken az utasok azonosítására [2, 7].

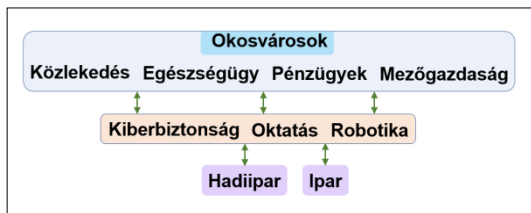
Az objektumfelismerő rendszerek képesek különböző tárgyakat azonosítani és kategorizálni a képeken. Például a YOLO (You Only Look Once) algoritmus nagy teljesítményű objektumfelismerést biztosít valós idejű alkalmazásokban, mint például a biztonsági kamerákban és az ipari automatizálásban. Az Amazon Go üzletekben az objektumfelismerés segít az automatikus fizetési rendszerek működtetésében, ahol a vásárlók egyszerűen elvehetik a termékeket a polcokról, és a rendszer automatikusan számlázza azokat [8]. Néhány népszerű szoftveres megoldás a számítógépes látásra [9]:

- az OpenCV egy nyílt forráskódú gépi tanulási és számítógépeslátás-könyvtár, amely több mint 2500 algoritmust tartalmaz különböző feladatokhoz, mint például arcfelismerés, objektumazonosítás és mozgó tárgyak követése;
- a TensorFlow egy nyílt forráskódú gépi tanulási keretrendszer, amelyet széles körben használnak számítógépeslátás-projektekben, például képosztályozásban és objektumfelismerésben;
- a YOLO egy nagy teljesítményű objektumfelismerő algoritmus, amely valós idejű alkalmazásokhoz készült, és széles körben használják biztonsági rendszerekben és ipari automatizálásban.

A cselekvéstervezés (Action Planning) olyan folyamat, amelyben az intelligens rendszerek képesek érzékelni a környezetüket, döntéseket hozni és cselekedni. A robotok különböző iparágakban és az egészségügyben is használatosak. Az ipari robotok cselekvéstervezést alkalmaznak a gyártási folyamatok optimalizálására, például az autógyártásban, ahol a robotok képesek érzékelni az alkatrészek helyzetét, döntéseket hozni a szerelési sorrendről, és precízen végrehajtani a szerelési műveleteket [10]. Az egészségügyi robotok cselekvéstervezést alkalmaznak a sebészeti beavatkozások során, például a Da Vinci-sebészeti

rendszer, amely képes érzékelni a beteg anatómiai struktúráit, döntéseket hozni a legoptimálisabb vágási útvonalakról, és precízen végrehajtani a műtéti beavatkozásokat [11]. A logisztikai hálózatokban a cselekvéstervezés segít optimalizálni a küldemények szállítását, például a drónok képesek érzékelni a környezetüket, döntéseket hozni a legoptimálisabb útvonalakról, és biztonságosan szállítani a csomagokat [12]. A mezőgazdasági robotok cselekvéstervezést alkalmaznak a növények gondozására, például a robotok képesek érzékelni a növények állapotát, döntéseket hozni a szükséges tápanyagok és víz mennyiségéről, és precízen végrehajtani a gondozási műveleteket [13].

A mesterséges intelligenciát jelenleg is számos területen alkalmazzák. A cél az MI által nyújtott előnyök kihasználása az életminőség javítására, a problémamegoldás hatékonyságának növelésére, valamint az innováció támogatására. Íme, néhány terület, ahol felhasználásra került az MI (1. ábra).



1. ábra. Az MI felhasználási területei

Kutatásommal szeretném feltárni és megvizsgálni a mesterséges intelligenciában rejlő lehetőségeket, amit a CNC-technológia támogatására használhatunk fel. A mesterséges intelligencia adaptálása a CNC-technológia valamely területére több lépést és szempontot foglal magában. Az adaptálás gondolata számos kérdést vet fel. A mesterséges intelligencia rendelkezik-e olyan megoldásokkal, amely a CNC-technológiát pozitívan befolyásolja? A másik nagy kérdés, hogy a CNC-technológiának van-e olyan területe, amelyet lehetséges MI által megtámogatni? Ennek a hosszú folyamatnak az első lépése az adaptálás alanyainak vizsgálata, az MI alkalmazásának, kulcsterületeinek, feladatainak meghatározása.

2. CNC-technológia

A CNC betűszó jelentése Computer Numerical Control, azaz számítógépes számjegyvezérlés. Olyan gyártóberendezés, melynél a szükséges mozgásokat motor(ok) (léptető-, szervo-) valósítja meg emberi beavatkozás nélkül. A motor vagy

motorok működését számítógép irányítja, amit a megmunkálógép vezérlésének nevezünk.

A CNC-technológiát a megmunkálás területén alkalmazzák, olyan gyártási eljárásokban, mint az esztergálás, marás, fúrás, köszörülés, ahol az anyagleválasztás folyamatát egy számítógép programozási kódok segítségével irányítja. A számítógépes számjegyvezérlésű gép a modern kori gyártás alappillére, amely az 1940-es évekig nyúlik vissza, amikor megjelentek az első NC-gépek.

A második világháború után, a hidegháború időszakában előtérbe került a fegyvergyártás jelentősége, ami a gyártás hatékonyságának és termelékenységének növelését sürgette. Az 1940-es évek végén, 1949-ben John T. Parsons, a számítástechnika egyik korai úttörője, a Massachusetts Institute of Technology (MIT) légierő-kutatói projektjében dolgozva, kidolgozta a számjegyvezérlés (numerikus vezérlés) első koncepcióját.

Az MIT Szervomechanizmusok Laboratóriumában kísérleti marógépet építettek, amely motoros tengelyek segítségével alkalmas volt helikopterlapátok és merevebb burkolatok előállítására repülőgépekhez. A korai számjegyvezérlésű gépek az 1940-es és 1950-es években még lyukszalagot használtak az utasítások bevitelére, amely akkoriban általánosan elterjedt eszköz volt a távközlésben és adattárolásban. Ezt a technológiát később analóg számítástechnikai megoldásokkal váltották fel.

1952-ben Richard Kegg, az MIT-vel együttműködésben, megalkotta az első NC-marógépet (2. ábra), amely a Cincinnati Milacron Hydro-

tel néven vált ismertté. Ebben az időszakban a CNC-technológia elsősorban a megmunkálógépekre korlátozódott.

Az 1960-as és 1970-es évek folyamán megjelentek a digitális technológiák, amelyek jelentősen automatizálták és hatékonyabbá tették a gyártási folyamatokat.

A 1970-es években nagy előrelépést hozott a CNC-megmunkálás terén a számítógéppel segített tervezés (CAD – Computer Aided Design) és a számítógéppel támogatott gyártás (CAM – Computer Aided Manufacturing) alkalmazása.

A 1990-es évektől kezdve a CAD- és CAM-rendszerek a CNC-technológia szerves részévé váltak, lehetővé téve a még precízebb és rugalmasabb gyártási megoldásokat [14].

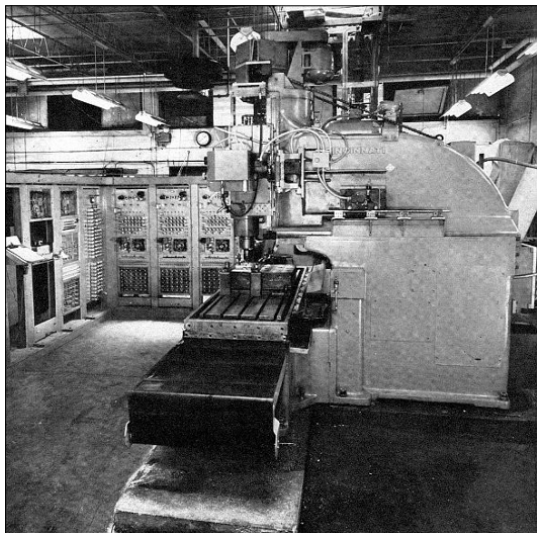
3. A CNC-technológia és az MI

A szerszámgépek és a hozzá tartozó CNC-technológia fejlődése egyedülálló. Az evolúció eredménye a gyorsabb, pontosabb és megbízhatóbb alkatrészgyártás. A ma elérhető 5 – 8 – 10 tengelyes gépek (pl.: esztergaközpont, megmunkálóközpont) egyre komplexebb alkatrészgyártást tesznek lehetővé. A CNC-technológia jelenlegi állapota jelentős előrelépéseket mutat az intelligens gyártási rendszerek terén, különösen az Ipar 4.0 kontextusában.

A digitális ikrek technológiája a CNC-iparban olyan fizikai entitások, mint megmunkálógépek, szerszámok, munkadarabok és gyártási folyamatok pontos digitális másolatainak létrehozására épül, amelyek valós idejű adatkapcsolattal szinkronizálódnak fizikai megfelelőikkel. Az IoT-eszközök, fejlett érzékelők, adatelemzési algoritmusok és szimulációs eszközök kombinációja lehetővé teszi az adatok folyamatos gyűjtését, elemzését és a rendszerek állapotának valós idejű monitorozását.

Az érzékelők valós idejű adatokat rögzítenek a fizikai rendszerek állapotáról, például a hőmérsékletéről, nyomásról vagy vibrációról, amely adatokat számítógépes hálózatokon, például WiFi vagy ipari Ethernet segítségével továbbítanak központi adatfeldolgozó rendszerekbe. Itt a felhőalapú számítástechnika biztosítja az adatok biztonságos tárolását és feldolgozását, amely valós idejű betekintést nyújt a rendszerek működésébe.

A digitális ikrek nemcsak az aktuális állapotot monitorozzák, hanem képesek szimulálni a rendszerek viselkedését is. Fizikai alapú szimulációk segítségével megjelenítik a folyamatok lehetséges változásait, például egy gép üzemzavarait vagy



2. ábra. Az első NC-marógép (Cincinnati Milacron Hydrotel)

egy alkatrész elhasználódását. A mesterséges intelligencia (MI) és adatelemzési algoritmusok képesek felismerni az anomáliákat, előre jelezni a hibákat, és javaslatokat adni a karbantartási vagy optimalizálási lépésekre. A digitális iker legkiemelkedőbb tulajdonsága a kétirányú kommunikáció: ez a technológia nemcsak adatokat fogad, hanem visszacsatolást is nyújt, például automatikus rendszerbeállításokkal vagy döntéstámogató javaslatokkal. Ezáltal csökkentik a meghibásodások miatti állásidőt, miközben növelik az eszközök üzemeltetési hatékonyságát.

A kiterjesztett valóság (AR) alkalmazásával a digitális ikrek vizuális interfészeket kínálnak, amelyek megkönnyítik a hibák gyors azonosítását és kezelését. Egy karbantartó mérnök például AR-szemüveggel figyelheti a gépek aktuális állapotát. A kiberbiztonság, például az adattitkosítás és a hozzáférés-vezérlés biztosítja az adatok védelmét és hitelességét.

A digitális ikrek technológiai innovációi új szintre emelik az ipari működés hatékonyságát, fenntarthatóságát és rugalmasságát, hozzájárulva az Ipar 4.0 célkitűzéseinek megvalósításához és a környezeti hatások mérsékléséhez [15].

A CNC-technológia számos területén alkalmazák a mesterséges intelligenciát, jellemzően a gyártási folyamatok optimalizálása és hatékonyságának növelése érdekében. Néhány megoldás az MI alkalmazására:

- Szerszámkopás-előrejelzés;
- Megmunkálási paraméterek optimalizálása;
- Prediktív karbantartás;
- Felületi minőség előrejelzése;
- Szerszám-pálya-optimalizálás.

Szerszámkopás-előrejelzés: Az MI segít a CNC-gépekben alkalmazott szerszámok kopásának előrejelzésében, amivel növelhető a szerszám élettartama, és javulhat a megmunkálás hatékonysága.

Megmunkálási paraméterek optimalizálása: az MI-rendszerek optimalizálják a megmunkálási paramétereket, mint például a forgácsolósebesség és a fogásmélység, hogy ezzel javítsák a felület minőségét, és csökkentsék az energiafogyasztást.

Prediktív karbantartás: Az MI lehetővé teszi a CNC-gépek prediktív karbantartását, ami segít előre jelezni a gépek szervizelési igényeit és minimalizálni a leállási időt.

Felületi minőség előrejelzése: Az MI-technikák, különösen a gépi tanulás és mélytanulás-modellek, előre jelzik a megmunkált alkatrészek felületi minőségét, ami javíthatja a gyártási folyamatok pontosságát és megbízhatóságát.

Szerszám-pálya-optimalizálás: Az MI-algoritmusok képesek optimalizálni a szerszám-pályákat, ezzel csökkentve a programozási időt és minimalizálni a szerszámpozicionálással kapcsolatos hibákat. Például az Autodesk Fusion 360 CAM szoftver MI-t használ a CNC-programozás hatékonyságának növelésére [16, 17].

A felsorolt megoldások jelentős mértékben hozzájárulnak a CNC-technológia fejlődéséhez, és lehetővé teszik a gyártási folyamatok intelligensebb, hatékonyabb és fenntarthatóbb működését [4].

4. Következtetések

A CNC-technológia az egyik legdinamikusabban fejlődő résztvevője az iparnak. Legaktívabb terjedése az alkatrészgyártás (esztergálás, marás, fűrés, köszörülés) területén történt, és napjainkban is folytatódik. A manuális működtetésű megmunkológépek alkalmazásával ma már csak speciális esetekben találkozunk, helyüket átvették a CNC-vezérléssel rendelkező gyártógépek. Ennek egyik oka a számítástechnika hihetetlenül gyors változása. A mesterséges intelligencia (MI) megjelenésével olyan feladatokat delegálhatunk át az MI részére, amely hatékonyabbá, pontosabbá, biztonságosabbá teheti a gyártás folyamatát, valamint a karbantartás tervezhetőségét javítja.

A jelenlegi MI és CNC kapcsolatának vizsgálata során megerősítést kaptunk az MI és a CNC-technológia együttműködését támogató kutatások jelentőségéről. A mesterséges intelligencia bevonása a CNC-programozás támogatására kulcsfontosságú szerepet tölt be az MI-vel kapcsolatos kutatásokban. A meglévő szerepeken felül újabb lehetséges felhasználási módok megfogalmazásával tovább fokozható a gyártás hatékonysága a gyártási folyamat bármely szakaszában. Az MI mint technológiai asszisztens több alternatívát javasolhat egy termék előállítási folyamatára, és lehetővé teheti a kézi CNC-programozás szintjén a rugalmas alkatrész-megmunkáló kódok létrehozását is.

Kutatásom célja a mesterséges intelligencia alkalmazása a középiskolai és egyetemi oktatás CNC-technológiával foglalkozó területén. Az MI-megoldások felhasználásának célja az oktatás minőségének és hatékonyságának növelése, oly módon, hogy az új technológia alkalmazása ne járjon többletmunkával, és a lehető legbiztonságosabb legyen. Az MI oktatásba integrálása hosszú és bonyolult folyamat, melynek első feladata a kapcsolódó területek (MI, oktatás, CNC) tulaj-

donságainak és az adaptálásra, valamint az egy- másra gyakorolt hatásainak feltárása lesz. Ehhez elvégzem a három területhez tartozó SWOT-elem- zést. Ezt követően a három területet a kutatási célomnak megfelelően egy egységként kezeltem, és egy újabb SWOT-analízissel megvizsgálom az életképességét. A kapott eredmények függvényé- ben meghatározom a stratégiaiilag fontos felada- tokat.

A mesterséges intelligenciával kapcsolatban meg kell vizsgálni, hogy milyen technológiák, alkalmazások érhetők el jelenleg, hol és milyen formában alkalmaznak MI-t a CNC-technológi- ában és az oktatásban. Jelenlegi formájában al- kalmas-e az adott feladat elvégzésére, és milyen mértékben képes azt megoldani? Meg kell vizsgá- lni az MI-rendszer fejlesztési lehetőségeit. Meg kell határozni az MI futtatási környezetét, szoftveres megoldását, működési elvét és a tanulási meto- dikáját. Fontos feltárni, hogyan integrálhatók az elérhető mesterségesintelligencia-rendszerek (például ChatGPT, Gemini, Copilot stb.) egy meg- lévő, jól működő felhasználói környezetbe, mint például a Moodle.

Összességében a mesterséges intelligencia be- vonása a CNC-programozás támogatásába kulcs- fontosságú szerepet tölt be az MI-vel kapcsolatos kutatásokban. A meglévő szerepeken felül újabb lehetséges felhasználási módok megfogalmazá- sával tovább fokozható a gyártás hatékonysága a gyártási folyamat bármely szakaszában. Az MI mint technológiai asszisztens több alternatívát javasolhat egy termék előállítási folyamatára, és lehetővé teheti a rugalmasalkatrész-megmun- káló programkód létrehozását és ellenőrzését is. Mindez szükségszerűvé teszi az MI oktatásban betölthető szerepeinek és az MI fejlesztéséhez kapcsolódó oktatási módszerek megfogalmazását és kutatását.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Russell S., Norvig P.: *Artificial Intelligence – a Modern Approach*. Series in Artificial Intelli- gence, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2009.
- [2] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.: *Deep Learn- ing*. Genet Program Evolvable Mach, 19. (2018) 305–307.
<https://doi.org/10.1007/s10710-017-9314-z>
- [3] Bostrom N.: *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Oxford University Press, 2014.
- [4] LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.: *Deep Learning*. Na- ture, 521. (2015) 436–444.
- [5] Khurana D., Koli A., Khatter K.: *Natural Language Processing: State of the Art, Current Trends and Challenges*. Multimedia Tools and Applications, 82. (2023) 3713–3744.
<https://doi.org/10.1007/s11042-022-13428-4>
- [6] Kuei-Hu Chang: *Natural Language Processing: Recent Development and Applications*. Depart- ment of Management Sciences R.O.C. Military Academy, 2002.
<https://doi.org/10.3390/app132011395>
- [7] Lynn T.: *Computar Vision Applications*. (2025). roboflow:
<https://blog.roboflow.com/computer-vision-ap- plications/> (megtekintve: 2025. április. 09.)
- [8] Lynn T.: *Computar Vision Examples*. (2025). robo- flow:
<https://blog.roboflow.com/computer-vision-ex- amples/> (megtekintve: 2025. április. 09.)
- [9] Gao M., Zou G., Li Y., Guo X.: *Recent Advances in Computer Vision: Technologies and Applications*. Electronics, 13 (2024) 2734.
<https://doi.org/10.3390/electronics13142734>
- [10] Singh G. & Pidadi P., Malwad D.: *A Review on Ap- plications of Computer Vision*. (2023).
https://doi.org/10.1007/978-3-031-27409-1_42.
- [11] Gao J, Yang Y, Lin P, Park DS.: *Computer Vision in Healthcare Applications*. Journal of Healthcare Engineering, 2018 Mar 4; 2018:5157020.
<https://doi.org/10.1155/2018/5157020>.
- [12] Jalal A. M., Toso E. A. V., Morabito R.: *Integrated Approaches for Logistics Network Planning: a Sys- tematic Literature Review*. International Journal of Production Research, 60/18. (2021) 5697–5725.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1963875>
- [13] Jiachen Yang, Jingfei Ni, Yang Li, Jiabao Wen Desheng Chen: *The Intelligent Path Planning System of Agricultural Robot Via Reinforcement Learning*. Sensors, 22/12. (2022) 4316.
<https://doi.org/10.3390/s22124316>
- [14] Noah Harrison: *CNC History: The Origination and Evolution of CNC Machining*, 2021.
<https://www.rapidirect.com/blog/cnc-history/> (letöltve: 2025. február. 28.).
- [15] Daraba D., Pop F., Daraba C.: *Digital Twin Used in Real-Time Monitoring of Operations Performed on CNC Technological Equipment*. Applied Sciences, 14/22. (2024) 10088.
<https://doi.org/10.3390/app142210088>
- [16] Kusiak A.: *Smart Manufacturing*. International Journal of Production Research, 56/1–2. (2017). 508–517.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- [17] Teti R., Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D.: *Advanced Monitoring of Machining Operations*. CIRP Annals, 59/2. (2010) 717–739.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.010>



KÚPOS ALKATRÉSZEK MÉRÉSÉRE SZOLGÁLÓ BERENDEZÉS

EQUIPMENT FOR MEASURING CONICAL PARTS

Damó Gergely,¹ Jakab-Farkas László,² Egyed-Faluvégi Erzsébet³

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

¹ gergelydamo@gmail.com

² jflaci@ms.sapientia.ro

³ faluvegi.erzsebet@ms.sapientia.ro

Abstract

Tapered components play numerous roles in the devices we use daily and those that surround us, sometimes performing special or even indispensable functions. The aim of this paper is to design and implement a measuring device suitable for determining the taper and taper angle of pin-type tapered components. The basic concept of the measuring instrument is inspired by the sine ruler, while effective measurement is ensured by the displacement of a digital gauge along two perpendicular axes. The data processing is performed by an Arduino microcontroller, which displays the results on an LCD screen. We measured a workpiece with a known taper. The measurement accuracy was verified using hypothesis testing.

Keywords: *rate of taper, taper angle, sine block.*

Összefoglalás

A kúpos alkatrészek számos műszaki alkalmazásban kiemelt szerepet töltenek be, gyakran speciális vagy nélkülözhetetlen funkciókat ellátva a mindennapi életben használt eszközökben. Jelen tanulmány célja egy olyan mérőberendezés tervezése és megvalósítása, amely alkalmas a csaptípusú kúpos alkatrészek kúposágának és kúpszögének meghatározására. A mérőeszköz koncepciója a szinuszvonalzó elvén alapul, míg a pontos mérést egy digitális mérőóra két egymásra merőleges tengely menti elmozdításával biztosítja. Az adatfeldolgozást egy Arduino mikrovezérlő végzi, amely az eredményeket egy LCD-kijelzőn jeleníti meg. Egy ismert kúposágú munkadarabot mértünk. A mérés pontosságát hipotézisvizsgálattal ellenőriztük.

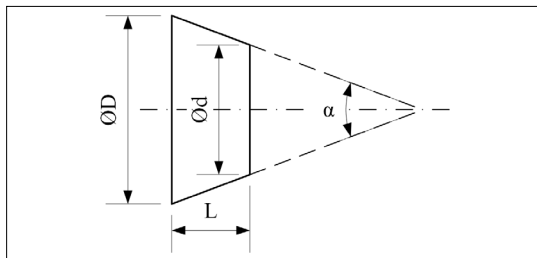
Kulcsszavak: *kúposság, kúpszög, szinuszvonalzó.*

1. Bevezetés

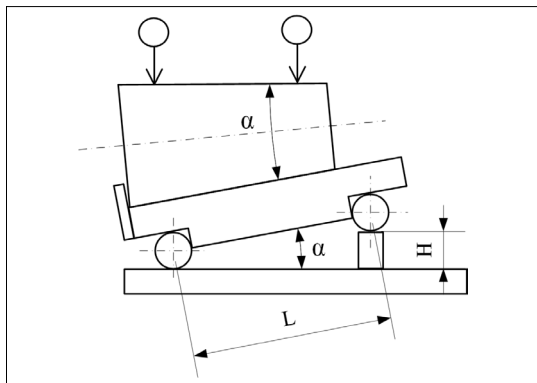
A modern gyártásban a pontosság elengedhetetlen. Az alkatrészeknek meghatározott méreteken, úgynevezett tűréshatárokon belül kell lenniük, melyeket a tervező ír elő, és a műszaki dokumentációban rögzít. A gyártási folyamat során rendszeresen ellenőrzik az alkatrészek méretét, hogy biztosítani tudják az előírt minőséget. A minőség-ellenőrzéshez univerzális (pl. tolómérő) vagy speciális mérő és/vagy ellenőrző eszközöket (pl. idomszer) használnak.

A kúpos alkatrészek számtalan szerepet töltenek be a mindennapjainkban, ezért különös figyelmet és pontosságot igényelnek mind a gyártás, mind a minőség-ellenőrzés során. E dolgozat csak az utóbbival, a minőség-ellenőrzéssel foglalkozik.

A kúpos alkatrészek jellemző tulajdonsága a kúposság, melyet az ISO 3040-2016 nemzetközi szabvány értelmez. Az **1. ábrát** tekintve, a kúposság mértéke a kúp tengelyével párhuzamos hosszon mért, két különböző átmérő különbségének és a hossz méretnek az aránya.



1. ábra. A kúposág értelmezése az ISO 3040-2016 nemzetközi szabvány szerint, [1]



2. ábra. A szinuszvonalzó mérés közben, [2]

A kúposág jelölése C, melyet matematikailag a következő összefüggéssel tudunk felírni:

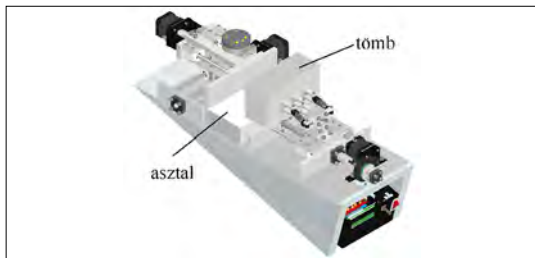
$$C = \frac{D-d}{L} = 2 \tan \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

A kúposág mértéke aránypárként vagy százalékos formában adható meg, illetve értelmezhető a kúpszög is, melyet fokban ajánlott megadni.

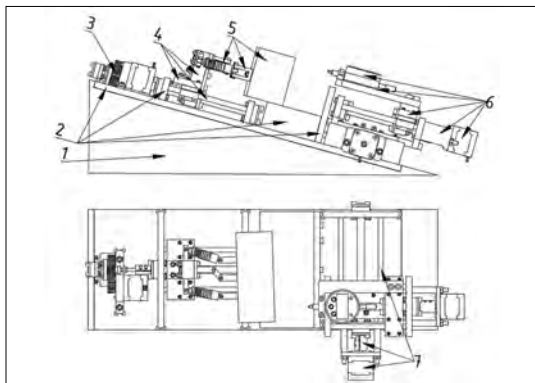
Kúposág mérésére több módszer, illetve mérőeszköz létezik [3], melyeket részletesen a [2] tárgyal. Jelen dolgozat alapjául a szinuszvonalzó szolgált, mely közvetett mérési módszeren alapszik. Pontossága és egyszerűsége miatt előnyös. A 2. ábra a mérőeszköz mérés közbeni elrendezését szemlélteti. Látható, hogy a szinuszvonalzó ki van egészítve mérőhasábkokkal és egy mérőórával.

A mérendő munkadarabot felfektetjük a szinuszvonalzóra, mérőhasábak segítségével addig emeljük, amíg az párhuzamos nem lesz a mérési bázisfelülettel. A párhuzamosságot egy mérőórával lehet figyelni. Ismert a szinuszvonalzó két hengere közötti távolság, valamint a mérőhasábtömb magassága, így az alkatrész kúpszögét egy trigonometriai összefüggéssel megadhatjuk:

$$\sin \alpha = \frac{H}{L} \quad (2)$$



3. ábra. A tervezett berendezés 3D-modellje



4. ábra. A berendezés felépítése

A dolgozat egy olyan mérőberendezés tervezését és kivitelezését mutatja be, mely gyors és egyszerű mérést eredményez.

2. A tervezett rendszer áttekintése

A berendezés (3. ábra) tervezésének fő szempontja az egyszerűség és a pontosság úgy, hogy egy stabil, merev berendezést eredményezzen.

A teljes rendszer egy 15°-os lejtőn helyezkedik el. A fehérrel jelzett asztalra kell elhelyezni a mérendő alkatrészt, a szinuszvonalzó elvét pedig a rajta található rögzítő tömb testesíti meg (3. ábra). Az effektív mérés egy digitális mérőóra segítségével történik, mely tulajdonképpen letapogatja a mérni kívánt munkadarab alkotóját, ezáltal biztosítva a szinuszvonalzó működésének elvét (2. ábra).

A berendezés felépítését tekintve 7 egységre osztható: 1 – a lejtő, 2 – az alaplemez és a hozzá tartozó elemek, 3 – a csúszókuplung-alszerelés, 4 – munkadarab rögzítését szolgáló egység, 5 – a duplacsuklós egység, 6 – a mérőórátapintás-biztosító egység, 7 – a mérőóra-pozicionálást biztosító egység. A berendezéshez még tartozik egy LCD-kijelző is (4. ábra), amelyen a felhasználó meg tudja mondani, hogy hány pontban tapogasson a mérőóra, illetve a kúposág eredménye is itt jelenik meg.

A berendezés mozgatását 3 léptetőmotor biztosítja, míg a hozzá tartozó vezérlést és a mért adatok továbbítását egy Arduino Mega és egy Arduino Nano oldja meg. Ez utóbbiak a lejtő alatt találhatók, annak érdekében, hogy megfelelően védve legyenek. A merevséget a fémelemek biztosítják, ez pedig növeli a rendszer pontosságát. A kúposágmérő legfeljebb $\Phi 60$ mm átmérőjű és 160 mm hosszúságú darabot tud lemérni.

3. A mérőrendszer működése

A célnak megfelelően, a mérőberendezés a külső kúpos forgásfelületek kúpszögének meghatározására szolgál. Ennek érdekében a munkadarabot el kell helyezni a fehérrel jelzett asztalon (3. ábra), majd a felhasználó ki tudja választani a menüből az LCD-kijelzőn, hogy 4, 5, 6, 10 vagy 12 ponton szeretne mérni. A mérés megkezdése előtt a mérőóra tapintóját a léptetőmotorok a 0 pozícióba viszik. A tömböt mozgó léptetőmotor a munkadarabot rögzíti a 4 –rögzítést szolgáló egység és az 5 – a duplacsuklós egység által, amíg a csúszókuplung meg nem csúszik. Ekkor kezdődik az effektív mérés, mely során a mérőórát mozgó és pozicionáló egységek lépnek működésbe.

4. A eredmények kiértékelése

4.1. A mérendő munkadarab

A mérendő munkadarab egy 3D-nyomatott alkatrész az alábbi geometriai jellemzőkkel (1. ábra):

- $D = 30$ mm
- $d = 10$ mm
- $L = 100$ mm
- $\alpha/2 = 5,711^\circ$

4.2. A kúposág meghatározása nagy méretű szerszámmikroszkóppal

A munkadarab félkúpszögének ellenőrzése a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Marosvásárhelyi Karán található szerszámmikroszkóppal történt.

A kapott félkúpszög értéke $5,66^\circ$, melyet direkt módszerrel határoztunk meg. A mérési eredmény eltérése a modellben meghatározott kúposág értékétől nem számottevő, értéke $0,05^\circ$.

4.3. A kúposág meghatározása a megvalósított mérőberendezéssel

A mérőberendezéssel történő mérés során a rendszer a mért pontokat eltárolja, melyekből interpolál egy egyenest. Az egyenes irányítányezőjét a mikrovezérlő a legkisebb négyzetek módszeré-

vel számítja ki, mely tulajdonképpen a mért alkatrész félkúpszöge. A menüből rendre kiválasztottuk a 4, 5, 6, 10 és 12 mérőpontot, és mindenikkel 3 mérést végeztünk, melyet az 1. táblázatban összegeztünk.

1. táblázat. A mérési eredmények összegzése

Pontok száma	4	5	6	10	12
Mérési eredmények [°]	5,06	5,35	5,61	5,65	5,7
	5,14	5,33	5,6	5,66	5,71
	5,03	5,32	5,6	5,64	5,7
Átlag [°]	5,07	5,33	5,6	5,65	5,7
Szórás* [°]	0,22	0,11	0,07	0,09	0,07
α	0,05				
$t_{kritikus}$	4,302653				
t	-5,091	-5,8418	-2,69087	-1,1501	-0,16818
Döntés	H1	H1	H0	H0	H0

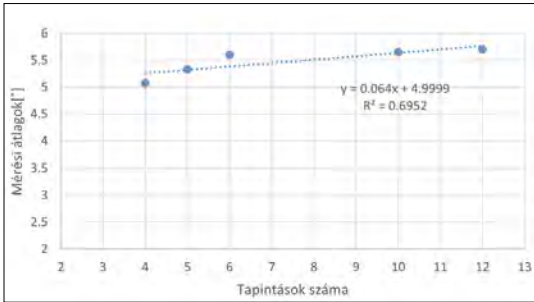
*a szórás értékei kerekítve jelennek meg a táblázatban

A rendszer eredményeinek ellenőrzéséhez hipotézisvizsgálatot is alkalmaztunk. Ellenőriztük, hogy a mérési eredmények eltérése az elvárt, $5,71^\circ$ -os értékhez képest, $0,05$ szinten elhanyagolható. A nullhipotézis: az átlag megegyezik a várható értékkel; az ellenhipotézis: az átlag különbözik a várható értéktől.

A vizsgalathoz t-próbát használunk, melynek eredménye szintén az 1. táblázatban látható.

Az elfogadási tartomány $(-4,3; 4,3)$. Az aktuális t értékek alapján levonható a következtetés, miszerint a 4 és 5 tapintásból származó átlag lényegesen különbözik az elvárt $5,71^\circ$ -os értéktől, így az ellenhipotézis érvényesül, míg a 6, 10 és 12 tapintásra az átlag nem tér el lényegesen az elvárt értéktől.

Az 5. ábra szemlélteti a mérési átlagokat. Az $R^2 = 0,69$ érték erős kapcsolatot jelent a mérési átlag és a tapintási szám között.



5. ábra. A mérési átlagok a tapintási szám függvényében

5. Következtetések

Következtetésképpen a kúposágmérő laborberendezésről elmondható, hogy szoros és egyenes, arányos kapcsolat áll fenn a tapintási pontok száma és a mérési pontosság között (5. ábra).

Továbbá látható, hogy legalább 6 tapintásra van szükség ahhoz, hogy a mérési eredmény pontossága a megadott szinten elfogadhatóvá váljon.

Továbbá megemlítendő, hogy 12 tapintási pont esetén az eltérés már nagyon kismértékűvé válik.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] ISO 3040:2016 – Geometrical Product Specification (GPS) – Dimensioning and Tolerancing - Cones
- [2] Aparin G. A., Gorogyeckij I. E.: *Tűrések és műszaki mérések*. 2. kiadás. Nehézipari Könyvkiadó, Budapest, 1954. 146–161.
- [3] Curtis M., Farago F.: *Handbook of Dimensional Measurement*. Industrial Press, Norwalk (CT), 2014.



MAGFÜGGVÉNYEN ALAPULÓ BELSŐPONTOS ALGORITMUS MEGVALÓSÍTÁSA SÚLYOZOTT LINEÁRIS KOMPLEMENTARITÁSI FELADATOKRA

IMPLEMENTATION OF AN INTERIOR-POINT ALGORITHM BASED ON A KERNEL FUNCTION FOR WEIGHTED LINEAR COMPLEMENTARITY PROBLEMS

Darvay Zsolt,^{1,2} Máthé Edina^{1,2}

¹ Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Matematika és Informatika Kar, Kolozsvár, Románia,
zsolt.darvay@ubbcluj.ro

² Erdélyi Múzeum-Egyesület, Matematikai és Informatikai Szakosztály

Abstract

We consider the solution of weighted linear complementarity problems using interior-point algorithms, where the search directions are determined by a specific kernel function. To achieve a more efficient implementation, we modify the theoretically well-performing algorithm. The resulting methods are analyzed using a code written in the Python programming language. We present numerical results for problems whose solutions, based on previous theoretical findings, would require a very high number of iterations.

Keywords: interior-point algorithm, kernel function, weighted linear complementarity problem, search direction, Newton's method.

Összefoglalás

Súlyozott lineáris komplementaritási feladatok megoldását vizsgáljuk olyan belsőpontos algoritmusokkal, melyekre a keresési irányokat egy sajátos magfüggvénnyel határozzuk meg. Hatékonyabb megvalósítás érdekében az elméleti szempontból jól működő algoritmuson módosításokat végzünk. Az így kapott módszereket egy Python programozási nyelvben írt kóddal elemezzük. Numerikus eredményeket mutatunk be olyan feladatokra, amelyeknek a megoldása az eddigi elméleti eredmények alapján csak nagyon magas iterációs számmal volna lehetséges.

Kulcsszavak: belsőpontos algoritmus, magfüggvény, súlyozott lineáris komplementaritási feladat, keresési irány, Newton-módszer.

1. Bevezetés

A súlyozott lineáris komplementaritási feladat (WLCP) fogalmát Potra [1] vezette be 2012-ben. A WLCP a következő alakban fogalmazható meg. Keressük azt az $(x, s) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$ vektorpárt, amelyre

$$\begin{aligned} -Mx + s &= q, \\ xs &= w, \\ x, s &\geq 0, \end{aligned} \quad (1)$$

ahol $q \in \mathbb{R}^n$ egy adott vektor, $w \geq 0$ egy adott súlyvektor és $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ egy adott mátrix. A WLCP

valójában a lineáris komplementaritási feladat (LCP) kiterjesztése, hiszen az a speciális eset, amikor a súlyvektor csupa nullásokat tartalmaz, egy LCP-t eredményez. A WLCP alkalmazási területei rendkívül szélesek. Sajátosan az LCP alkalmazható mechanikai kölcsönhatások vizsgálatára, akadályproblémák esetén vagy szerkezettervezési problémák esetén is [2]. Ezenkívül a WLCP hasznos lehet olyan rendszerekben, ahol a különböző változók vagy feltételek eltérő fontossággal bírnak, valamint gyakran alkalmazzák gazdasági

modellezések során, például a Fisher-féle piaci egyensúlyprobléma esetén is [1].

Az (1) összefüggésben leírt feladat megoldhatóságának biztosításához az M mátrixnak teljesíteni kell bizonyos feltételeket. Ezen feltételek egy olyan változatát vizsgáljuk meg, melyben az M mátrix $P^*(\kappa)$ -tulajdonságú. Egy M mátrixról akkor mondjuk, hogy $P^*(\kappa)$ -tulajdonságú, ha létezik olyan κ nem negatív valós szám, amelyre tetszőleges $x \in \mathbb{R}^n$ vektor esetén fennáll az alábbi egyenlőtlenség:

$$(1 + 4\kappa) \sum_{i \in I_+} x_i(Mx)_i + \sum_{i \in I_-} x_i(Mx)_i \geq 0,$$

ahol $I = \{1, 2, \dots, n\}$,

$$I_+ = \{i \in I : x_i(Mx)_i \geq 0\} \text{ és}$$

$$I_- = \{i \in I : x_i(Mx)_i < 0\}.$$

A feladat megoldására belsőpontos algoritmust fogunk alkalmazni. Szükségünk lesz néhány jelölésre. Az $\mathbb{R}_+^n$ jelöli a nem negatív valós n -dimenziós számok halmazát, míg $\mathbb{R}_{++}^n$ a pozitívokét. Az $\mathcal{F}$ fogja megadni a megengedett megoldások halmazát, míg az $\mathcal{F}^0$ halmaz a szigorúan megengedett párokat tartalmazza:

$$\mathcal{F} := \{(x, s) \in \mathbb{R}_+^n \times \mathbb{R}_+^n : -Mx + s = q\},$$

$$\mathcal{F}^0 := \{(x, s) \in \mathbb{R}_{++}^n \times \mathbb{R}_{++}^n : -Mx + s = q\}.$$

Ezenkívül adott $(x^0, s^0) \in \mathcal{F}^0$ esetén meghatározzuk a súlyozott utat egy $t \in [0, 1]$ paraméter függvényében. Ennek érdekében vezessük be az alábbi jelölést:

$$w(t) = (1 - t)w + tx^0s^0. \quad (2)$$

Ha az (1) rendszerben a súlyvektort helyettesítjük az előzőekben megadott $w(t)$ kifejezéssel, akkor egy olyan megoldható rendszert kapunk, amely meghatározza a súlyozott centrális utat:

$$\begin{aligned} -Mx + s &= q, \\ xs &= w(t), \\ x, s &\geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Ha M egy $P^*(\kappa)$ -mátrix és $\mathcal{F}^0 \neq \emptyset$, akkor a fenti paraméterezett egyenletrendszernek bármilyen $t \in [0, 1]$ paraméterre egyértelmű megoldása van, melyet $(x(t), s(t))$ -vel jelölünk. Ezen megoldások halmaza fogja megadni a feladathoz rendelt súlyozott centrális utat.

Ha Newton módszerét alkalmazzuk a (3) egyenletrendszerre, az alábbi rendszert kapjuk:

$$\begin{aligned} -M\Delta x + \Delta s &= 0, \\ s\Delta x + x\Delta s &= w(t) - xs, \end{aligned} \quad (4)$$

amelyből meghatározhatóak a keresési irányok. A továbbiakban bevezetjük a $v = \sqrt{\frac{xs}{w(t)}}$ varianciavektort, amelyet a súlyozott centrális úttól való eltérés mértékének meghatározására használhatunk.

A feladat megoldására a magfüggvényen alapuló belsőpontos algoritmusok módszerét fogjuk használni. Egy ψ függvényt magfüggvénynek nevezünk, ha teljesíti az alábbi feltételeket:

$\psi: \mathbb{R}_{++} \rightarrow \mathbb{R}_+$ kétszer folytonosan differenciálható, $\psi(1) = \psi'(1) = 0$ és $\psi''(t) > 0$ minden $t > 0$ esetén. Egy adott magfüggvényre a hozzá kapcsolódó $\Psi: \mathbb{R}_{++}^n \rightarrow \mathbb{R}_+$ barrierfüggvényt az alábbi módon definiáljuk:

$$\Psi(v) = \sum_{i=1}^n \psi(v_i).$$

Magfüggvények segítségével megadható a keresési irányok rendszere:

$$\begin{aligned} -M\Delta x + \Delta s &= 0, \\ s\Delta x + x\Delta s &= -w(t)v\nabla\Psi(v). \end{aligned} \quad (5)$$

Észrevehető, hogy a $\psi(t) = \frac{t^2-1}{2} - \log(t)$ logaritmus magfüggvényt használva az (5) rendszerben, visszakapjuk az eredeti (4) egyenletrendszert, melyet a Newton-módszer alkalmazásával kaptunk.

A továbbiakban a $\psi(t) = \frac{t^2-1}{2} + \frac{t^{-1}-1}{2} - \frac{t-1}{2}$ magfüggvényt fogjuk használni a keresési irányok meghatározására. Erre vonatkozó részletes elméleti elemzést a Chi, Wang és Lesaja [3] által publikált cikkben találunk.

2. Elméleti algoritmus

A [3] cikkben bevezetett elméleti algoritmust mutatjuk be, majd ezt követően az implementáció szempontjából elvégzett módosításokat tárgyaljuk. Az algoritmus bizonyos lépéseit külön függvényekkel adjuk meg. A keresési irányok meghatározása érdekében behelyettesítjük a ψ magfüggvényt az (5) lineáris egyenletrendszer jobb oldalán szereplő kifejezésbe, ezt követően megoldjuk a rendszert, és visszatérítjük a kapott irányokat. Ezeket a következő függvénnyel végezzük:

function keresésiIrány ($x, s, \Delta x, \Delta s$)

begin

Megoldjuk az (5) egyenletrendszert.

return ($\Delta x, \Delta s$);

end.

A teljes Newton-lépés végrehajtása érdekében az aktuális pontokhoz hozzáadjuk a keresési irányokat:

function teljesNewtonLépés ($x, s, \Delta x, \Delta s$)

begin

return (x, s) + ($\Delta x, \Delta s$);

end.

A súlyozott centrális utat meghatározó paraméter frissítését az alábbi függvénnyel végezhetjük:

function *frissítThetaSegítségével* (t, θ)

begin

return $(1 - \theta) t$;

end.

Mindezeket felhasználva az alábbi módon adható meg az elméleti algoritmus.

1. algoritmus (Chi, Wang és Lesaja [3])

Adott az $(x^0, s^0) \in \mathcal{F}^0$ vektorpár, amelyre $x^0 s^0 \geq w$.

Legyen $\varepsilon > 0$ a pontossági paraméter.

Legyen $\theta = \bar{\theta}_{\min}$ a frissítési paraméter, ahol

$$\bar{\theta}_{\min} = \frac{\gamma}{3\gamma + (18\bar{\kappa} + 10)\beta},$$

$$\bar{\kappa} = \frac{(1 + 4\kappa)\max(x^0 s^0)}{4\min(w)} - 0.25,$$

$\gamma = \min(w)$, $\beta = \|x^0 s^0 - w\|$.

Legyen $\tau > 0$ a küszöbparaméter.

Legyen $t^0 = 1$, úgy, hogy $\delta(x^0, s^0; t^0) \leq \tau$, ahol

$$\delta(x, s; t) = \left\| v \left(\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta s}{s} \right) \right\| = \left\| \frac{e}{2} + \frac{e}{2v^2} - v \right\|.$$

$x = x^0, s = s^0, t = t^0$;

while $\|xs - w\| > \varepsilon$ **do**

begin

$(\Delta x, \Delta s) = \text{keresésiIrány}(x, s, t)$;

$(x, s) = \text{teljesNewtonLépés}(x, s, \Delta x, \Delta s)$;

$t = \text{frissítThetaSegítségével}(t, \theta)$;

end.

A hatékony megvalósítás érdekében az 1. algoritmuson számos módosítást végeztünk.

3. Módosított algoritmus

Mivel az algoritmus iterációi során megtörténhet, hogy nem megengedett pontba jutunk, bevezetjük az

$$r_q = -Mx + s - q$$

hibavektort. A keresési irányokat az (5) rendszer helyett az alábbi módosított rendszer segítségével adjuk meg:

$$-M \Delta x + \Delta s = -r_q$$

$$s \Delta x + x \Delta s = -w(t) v \nabla \Psi(v). \quad (6)$$

Az ehhez rendelt függvény pedig a következő:

function *módosítottKeresésiIrány* (x, s, t)

begin

$$r_q = -Mx + s - q;$$

Megoldjuk a (6) egyenletrendszert.

return $(\Delta x, \Delta s)$;

end.

Nem teljes Newton-lépéssel lépünk tovább a következő pontra, hanem egy α változóban kiszámoljuk a maximális lépést a határig, majd ezt csökkentjük egy $\rho \in (0, 1)$ tényező segítségével:

function *NewtonLépés* ($x, s, \Delta x, \Delta s, \rho$)

begin

$$\alpha_x = \min \left\{ \frac{-x_i}{\Delta x_i} \mid \Delta x_i < 0 \right\};$$

$$\alpha_s = \min \left\{ \frac{-s_i}{\Delta s_i} \mid \Delta s_i < 0 \right\};$$

$$\alpha = \min\{\alpha_x, \alpha_s\};$$

return $(x, s) + \rho \alpha (\Delta x, \Delta s)$;

end.

A t paraméter csökkentése érdekében két módszerrel valósítottunk meg. Az első megegyezik az elméleti algoritmusban megadott változattal, amely a θ segítségével csökkenti a t értékét:

function *frissítParaméter* (t, θ, x, s, ζ)

begin

return *frissítThetaSegítségével* (t, θ);

end.

A második variáns a [4] cikkben bevezetett módszer segítségével frissíti a t paramétert, egy $\zeta \in (0, 1]$ skálázási tényezőt felhasználva:

function *frissítParaméter* (t, θ, x, s, ζ)

begin

return *frissítZetaSegítségével* (x, s, ζ);

end

function *frissítZetaSegítségével* (x, s, ζ)

begin

$$\text{return } t = \zeta \left\| \frac{x^T s - w^T e}{(x^0)^T s^0 - w^T e} \right\|;$$

end.

Feltételezve, hogy $x^0 s^0 \neq w$, megállapíthatjuk, hogy a fenti kifejezés nevezője nem lehet 0. A továbbiakban bemutatjuk a módosított algoritmust.

2. algoritmus. Adott az $(x^0, s^0) \in \mathcal{F}^0$ pontpár úgy, hogy $x^0 s^0 \geq w$, $x^0 s^0 \neq w$.

Legyen $\varepsilon > 0$ a pontossági paraméter. Továbbá

$\theta \in (0, 1)$, illetve $\zeta \in (0, 1]$ frissítési paraméterek.

Legyen $\rho \in (0, 1)$ a lépés skálázási paramétere.

$t^0 = 1, x = x^0, s = s^0, t = t^0$;

while $\|xs - w\| > \varepsilon$ **do**

begin

$(\Delta x, \Delta s) = \text{módosítottKeresésiIrány}(x, s, t)$;

$(x, s) = \text{NewtonLépés}(x, s, \Delta x, \Delta s, \rho)$;

$t = \text{frissítParaméter}(t, \theta, x, s, \zeta)$;

end.

A fenti algoritmust felhasználva, különböző numerikus eredményeket mutatunk be.

4. Numerikus eredmények

Az előbbieken bemutatott algoritmus Python programozási nyelven került implementálásra, felhasználva a NumPy könyvtárat a lineáris algebrai műveletek elvégzéséhez. Minden futtatás során az

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & -1 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Csizmadia-mátrixot [5] használtuk, amelyre a [6] cikkben igazolták, hogy $n \geq 4$ esetén $\kappa = 2^{2n-8} - 0.25$. Ennek a mátrixnak azért van nagyon fontos szerepe a $P^*(\kappa)$ -WLCP vizsgálatában, mert a κ érték a feladat mérete függvényében exponenciálisan növekszik.

Azt is feltételeztük, hogy $q = [0, 1, \dots, n-1]^T$. Továbbá az $x^0 = s^0 = e$ kezdeti értékekkel dolgoztunk, ahol e a csupa egyesekből álló n -dimenziós vektor. Figyeljük meg, hogy ebben az esetben fennáll az $(x^0, s^0) \in \mathcal{F}^0$ feltétel.

Az $x^0 s^0 \geq w$ egyenlőtlenség teljesítése érdekében a w súlyvektor értékeit véletlenszerűen generált, egynél kisebb valós pozitív számoknak választottuk. Mivel több szempontból megvizsgáltuk az algoritmust, ezért különböző megszorítások mellett generáltuk a w elemeit. Továbbá az $\varepsilon = 10^{-6}$, $\rho = 0.9$ értékeket használtuk. Ami a θ paramétert illeti, az elméleti szinten meghatározott $\bar{\theta}_{min}$ értéknél nagyobbakat is megvizsgáltuk, az alábbi halmazból:

$$\theta \in \{\bar{\theta}_{min}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 0.01, 0.02, \dots, 0.1, 0.2, \dots, 0.9\}.$$

Azt tapasztaltuk, hogy általában a θ növelése esetén is helyes eredményt kapunk, az algoritmus pedig gyorsabban konvergál a megoldáshoz. Ennek érdekében a 4×4 -es Csizmadia-mátrix esetén tekintsük a kapott iterációs számokat, illetve CPU-időket másodpercben kifejezve. A futtatásokhoz egy Intel Core i5-1035G1 processzorral és 8 GB RAM-mal rendelkező gépet használtunk, Windows 10 operációs rendszer alatt, Python 3.11.6-os környezetben (1. táblázat).

A következő táblázatban a különböző θ értékekre kapott minimális iterációs számot mutatjuk

1. táblázat. Az iterációs szám θ függvényében.

θ	Iterációs szám	CPU
0.1	139	0.0156
0.01	1445	0.0625
10^{-3}	14498	0.7031
10^{-4}	145029	6.8281
10^{-5}	1450342	107.3906
10^{-6}	14503470	1035.1250
$\bar{\theta}_{min} = 3.86 \cdot 10^{-7}$	37573477	3006.2031

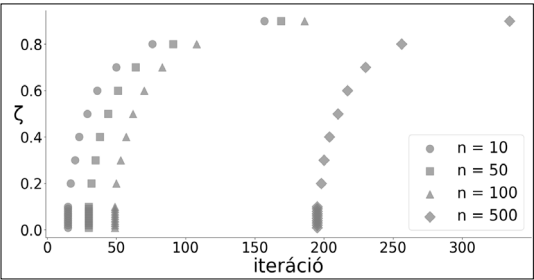
be a dimenzió függvényében. Látható, hogy a dimenzió növekedésével lineárisan nő a minimális iterációs szám. Az utolsó sorban feltüntetettük, hogy mely θ értéktől kezdve kapjuk ezt a minimális iterációs számot. Megállapítható, hogy a nagyobb dimenziók esetében az iterációs szám nem minden esetben csökkenthető a θ értékének növelésével (2. táblázat).

A további eredményeket azzal az implementációval kaptuk, melyben a t paraméter csökkentését egy ζ skalár segítségével végezzük. Ennek a módszernek a segítségével is hasonló eredményeket értünk el a 2. algoritmus iterációs számát tekintve (1. ábra).

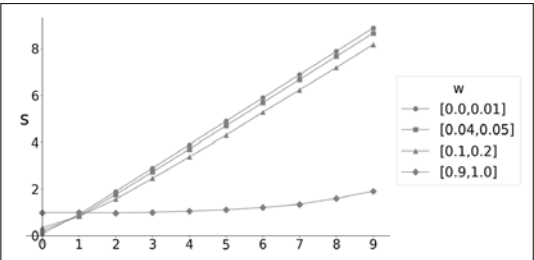
A 2. ábra az $n = 10$, $\zeta = 0.1$ esetben azt hivatott bemutatni, hogy a súlyvektor különböző intervallumokba való kategorizálása hogyan befolyásolja a megoldásban szereplő s értékeket. Tudjuk, hogy ha a súlyvektor nulla, akkor visszakapjuk az s vektorban a q vektor által reprezentált növekvő természetes számokat. Abban az esetben, ha a w értékei nullához közeli intervallumba es-

2. táblázat. Minimális iterációs szám a dimenzió függvényében, ahol D a dimenziót és I a minimális iterációs számot jelöli.

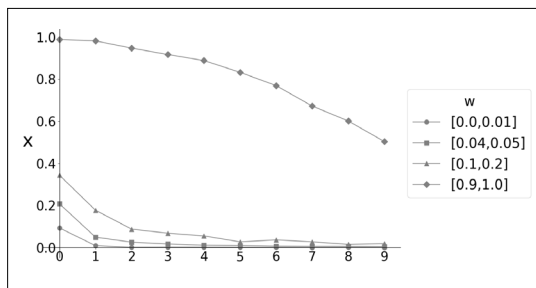
D	20	30	40	50	100	200	300	400	500
I	18	22	26	29	48	84	121	158	195
θ	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.09



1. ábra. Az iterációs szám ζ függvényében



2. ábra. Az s vektor értékei a súlyvektor függvényében



3. ábra. Az x vektor értékei a súlyvektor függvényében

nek, megkapjuk a q vektor közelítő értékeit. Ha a súlyvektor értékei számára olyan intervallumot választunk, melynek elemei a nullától távolabb esnek, akkor az s értékei is eltolódnak.

Ez a tendencia fellelhető az x esetében is, viszont ennek a vektornak az elemei nullához konvergálnak, ha a súlyvektor értékeit nullához közelebbinek választjuk (3. ábra).

5. Következtetések

A Chi, Wang és Lesaja [3] által publikált magfüggvényre alapozott belsőpontos algoritmust módosítottuk a $P^*(\kappa)$ -WLCP hatékony megoldása érdekében. A súlyozott centrális utat meghatározó paraméter csökkentésére vonatkozóan két változatot vizsgáltunk. Az általunk fejlesztett Python-kódot felhasználva különböző numerikus eredményeket mutattunk be.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az Erdélyi Múzeum-Egyesületnek a kutatási munkához nyújtott támogatásért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Potra F. A.: *Weighted Complementarity Problems – a New Paradigm for Computing Equilibria*. SIAM Journal on Optimization, 22/4. (2012) 1634–1654. <https://doi.org/10.1137/110837310>
- [2] Ferris M. C., Pang J. S.: *Engineering and Economic Applications of Complementarity Problems*. SIAM Review, 39/4. (1997) 669–713. <https://doi.org/10.1137/S0036144595285963>
- [3] Chi X., Wang G., Lesaja G.: *Kernel-Based Full-Newton Step Feasible Interior-Point Algorithm for $P^*(\kappa)$ -Weighted Linear Complementarity Problem*. Journal of Optimization Theory and Applications, 202/1. (2024) 108–132. <https://doi.org/10.1007/s10957-023-02327-9>
- [4] Darvay Zs., Orbán A.-Sz.: *Implementation of the Full-Newton Step Algorithm for Weighted Linear Complementarity Problems*. Papers on Technical Science, 15. (2021) 15–18. <https://doi.org/10.33894/mtk-2021.15.04>
- [5] de Klerk E., E.-Nagy M.: *On the Complexity of Computing the Handicap of a Sufficient Matrix*. Mathematical Programming, 129. (2011) 383–402. <https://doi.org/10.1007/s10107-011-0465-z>
- [6] E.-Nagy M., Illés T., Povh J., Varga A., Zerovnik J.: *Sufficient Matrices: Properties, Generating and Testing*. Journal of Optimization Theory and Applications, 202/1. (2024) 204–236. <https://doi.org/10.1007/s10957-023-02280-7>



A HŰTŐKÖZEG TÍPUSÁNAK HATÁSA A HŐSZIVATTYÚK SZERKEZETÉRE ÉS TELJESÍTMÉNYIGÉNYÉRE

INFLUENCE OF COOLING AGENT TYPE ON THE DESIGN AND POWER DEMAND OF HEAT PUMPS

Dósa János,¹ Tomus Ovidiu Bogdan²

¹ Petrozsényi Egyetem, Gép és Villamosmérnöki Kar, Gépészeti, Ipari és Közlekedésmérnöki Tanszék, Petrozsény, Románia. iondosa@upet.ro

² Petrozsényi Egyetem, Gép és Villamosmérnöki Kar, Gépészeti, Ipari és Közlekedésmérnöki Tanszék, Petrozsény, Románia. bogdantomus@upet.ro

Abstract

The paper presents the comparative exergetic analysis of different heat pump designs from an energy consumption point of view. Heat pumps are usually classified according to the environment from which they extract heat in order to help the consumer in choosing a heat pump type, based on the available heat sources. From the construction point of view, a wide variety of heat pumps have appeared as a result of the various heat sources to be considered, and the refrigerants used. Also, due to the desire to improve their operation, various constructive variants have been developed. Considering that all heat pumps use electricity to operate, their energy consumption for producing the same thermal effect should be a criterion for their choice, along with economic aspects.

Keywords: *heat pump, exergy analysis, power demand.*

Összefoglalás

A tanulmány a különböző hőszivattyú-konstrukciók összehasonlító exergetikai elemzését mutatja be energiafogyasztási szempontból. A hőszivattyúkat általában aszerint osztályozzák, hogy milyen környezetből nyerik a hőt, ahhoz, hogy a fogyasztók kiválaszthassák a megfelelő hőszivattyútípust, a rendelkezésre álló hőforrások alapján. Konstruktív szempontból a hőszivattyúk széles választéka jelent meg a kiaknázható hőforrások függvényében, valamint a felhasznált hűtőközegek miatt. Emellett a működésük javítására irányuló törekvés miatt különböző konstruktív változatok kerültek fejlesztésre. Mivel valamennyi hőszivattyú villamos energiával működik, az azonos hőhatás előállításához szükséges energiafogyasztásuk, a gazdasági szempontok mellett, a kiválasztásuk kritériumának kellene lennie.

Kulcsszavak: *hőszivattyú, exergiaelemzés, energiaigény.*

1. Bevezetés

A hőszivattyú egy olyan hőerőgép, mely arra szolgál, hogy az alacsonyabb hőmérsékletű környezetből hőt vonjon ki és azt magasabb hőmérsékletű környezetbe leadja. Használatának célja a hőenergiával való gazdálkodás, melynek során hűtési energiát és hulladékhőt fűtésben és melegvíz-készítésben fel lehet használni, illetve környezeti hőt lehet hasznosítani.

A hőszivattyú-technológia viszonylag régi technológia, gyakorlatilag a 70-es évek energiaválsága adott lendületet a kutatásoknak ezen a területen.

Napjainkban az EU és az ENSZ kidolgoztak közös célokat a fenntartható jövőért, és az egyik ilyen cél a megfizethető és tiszta energia. Ennek az irányelvnek a tükrében a hőszivattyú-technológia új reneszánszát éli, egyre több hőszivattyú kerül telepítésre.

A hőszivattyús fűtés az Európai Unió zöld energiaváltásában központi szerepet tölt be, így egyre több cég épít hőszivattyút, ennek eredményeként különböző cégek egyedi tervezési megoldásokat alkalmaznak.

A dolgozat célja, hogy rávilágítson a hőszivattyú működésének különböző aspektusaira exergia és energiafelhasználás szempontjából.

2. A hőszivattyúk osztályozása

A hőszivattyúkat általában aszerint osztályozák, hogy milyen környezetből nyerik ki a hőt, ezzel segítve a fogyasztónak, aki a rendelkezésére álló hőforrás alapján egy bizonyos típusú hőszivattyút választ [1–8].

A legtöbb információforrás szerint a legfontosabb hőszivattyútípusok a következők:

- Geotermikus hőszivattyúk;
- Levegő-víz hőszivattyúk;
- Levegő-levegő hőszivattyúk;
- Víz-víz hőszivattyúk.

Tehát, általában a hőforrás szerint lettek osztályozva, ami érthető mivel a célközönség a felhasználó.

Ugyanakkor a rendszer felépítése szerint is lehet osztályozni:

A hőszivattyúk csoportosítása a rendszer felépítése szerint lehet:

- monovalens rendszer, amely kisegítő fűtés nélkül működik, földhőszondák fűrése, sík kollektor telepítése által valósul meg, termál- és egyéb hulladékhő, talajvíz hőjének felhasználására építik ki;
- bivalens rendszer, amely kisegítő fűtéssel működik, és levegő, felszíni víz hőjének felhasználására építik ki.

Szerkezeti szempontból nagyon sokféle hőszivattyú jelent meg a különféle hőforrások hatására, amelyek kiaknázását mérlegelték, valamint a felhasznált hűtőközegek miatt. Ezenkívül a működésük javításának vágya miatt különféle konstrukciós változatok jelentek meg.

Sokkal jobban szolgálja a jelen dolgozat céljait a hőszivattyúk működési folyamatok és típusok szerinti csoportosítása [9–11]:

A. Gőzkompresziós ciklussal működő hőszivattyúk:

- A.1. Kompresziós hőszivattyúk:
 - Forgódugattyús;
 - Forgókompresszoros;
 - Turbókompresszoros.

A. 2. Abszorpciós hőszivattyúk:

- Indirekt fűtésűek;
- Direkt fűtésűek;

- Adszorpciós hőszivattyúk;
- Reszorpciós hőszivattyúk;
- Ejektor-hőszivattyúk.

B. Gázkompresziós hőszivattyúk:

- Levegős folyamatúak;
- Philips-folyamatúak;
- Vortex-cső;
- Vuilleumier-elvű.

C. Termoelektromos hatással működő

A fent említett hőszivattyútípusok közül elemezni fogunk minden fontosabb osztályból legalább egy típust: gőzkompresziós ciklussal működő, gázciklussal működő és termoelektromos hatással működő hőszivattyút.

3. Hőszivattyúk felépítése és körfolyamatok

3.1. A gőzkompresziós hőszivattyúk

A gőzkompresziós hőszivattyúk talán a legszélesebb körben használt hőszivattyútípusok. Ezek közül az első típusok R12- (ammónia) hűtőközeggel dolgoztak, és ez a hűtőközeg ma is elterjedt nagy hűtőrendszerekben. A hűtőgépiparban általánosan elterjedt a Freon vegyületcsalád, amely a halogénezett szénhidrogének kereskedelmi neve, melyek kiváló tulajdonságokkal rendelkeznek. A freon klórtartalma erősen rombolja az ózonréteget, ezért a CFC-hűtőközegeket újabb, kevésbé környezetszennyező hűtőközegek váltották, a hidrokloro-fluorokarbonok (HCFC).

A vízgőz egy olyan közeg, amely teljesen semleges környezet védelmi szempontból, tehát, a továbbiakban, az ammónia és a vízgőzzel működő gőzkompresziós hőszivattyúkat mutatjuk be.

3.1.1. A gőzkompresziós ammónia hűtőközeggel működő hőszivattyú

Az alacsony hőteljesítményű energiaforrások kiaknázására alkalmas hőszivattyúk a gőzkompresziós, víz-víz rendszerűek [10, 11]. Ez a típusú hőszivattyú (1. ábra és 2. ábra) alkalmas arra, hogy 40 °C alatti hőmérsékleten lévő vízből származó hulladékhőt hasznosítson, a használati meleg vizet 50–80 °C-ra felmelegítve.

Az ilyen hőszivattyú matematikai modellje ki volt dolgozva a [12] cikk keretén belül, tehát a továbbiakban annak a modellnek az alapján számítjuk ki a hőszivattyú hőtani jellemzőit.

3.1.2. A gőzkompresziós vízgőz hűtőközeggel működő hőszivattyú

A 3. ábra egy gőzkompresziós vízgőzhűtőközeggel működő hőszivattyút mutat be, míg ennek a körfolyamata 4. ábrán látható.

váltja fel, míg a kompresszorban izentropikus kompresszió következik be, ami a T_c hőmérsékleten, a kondenzációs hőmérsékletnél magasabb hőmérsékletet eredményez (4. ábra) [10, 11].

Az gázkompressziós hőszivattyú elméleti körfolyamata (3. ábra) egy Joule-körfolyamat [10, 11], amelyben az expanziót és a kompressziót turbógépek segítségével érik el.

Míg a gőzkompressziós hőszivattyú működését, mivel széles körben elterjedtek, számos cikkben bemutatták, addig a gázkompressziós hőszivattyút nem használják olyan gyakran, ezért ritkább a rávonatkozó szakirodalom.

A gázkompressziós hőszivattyú alapvető jellemzője a kompressziós arány [10, 11]:

$$\beta_c = \frac{p_2}{p_1} \quad (1)$$

ahol p_2 a kimeneti nyomás, p_1 a turbókompresszor bemeneti nyomása, barban.

A hőszivattyúk jellemző paramétere a COP (teljesítménytényező), amely a gázkompressziós hőszivattyúkra a következő képlettel fejezhető ki [10, 11]:

$$\mu_t = \frac{1}{1 - \beta_c^{\frac{1-k}{k}}} \quad (2)$$

ahol k az adiabatikus együttható.

Egy másik paraméter, amely alapján a hőszivattyúk összehasonlíthatók, az alábbi egyenlet segítségével kiszámítható exergiahatékonyság [10, 11]:

$$\eta_E = \frac{|l_{\min C}|}{|l|} \quad (3)$$

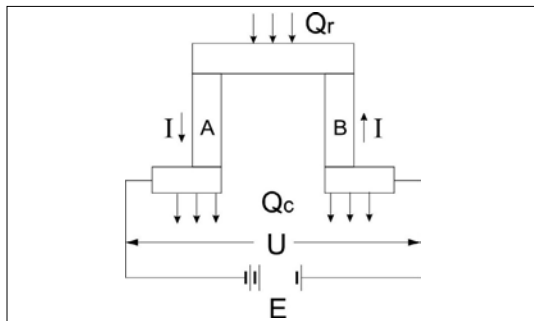
ahol $l_{\min C}$ az ideális Carnot-körfolyamat fajlagos minimális munkája $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, míg l a tényleges körfolyamat fajlagos munkája $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ -ban.

A gázkompressziós hőszivattyú tényleges körfolyamata alapján (6. ábra) [10, 11] számítások végezhetők olyan jellemző paraméterek meghatározásáért, amelyek összehasonlíthatók az elemzett hőszivattyúk megfelelő jellemzőivel.

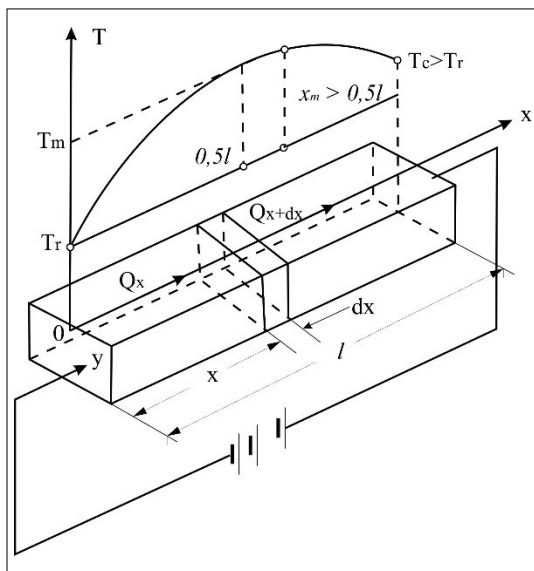
3.3. A termoelektromos hatással működő hőszivattyú

A 7. ábra egy termoelektromos hőszivattyút míg a 8. ábra egy termoelektromos elem vázlatát mutatja be [10, 11].

Ezek az eszközök a termoelektromos jelenségen alapulnak, nevezetesen a Seebeck-, Peltier- és Thomson- effektusok ebbe a kategóriájába tartoznak. Azt a jelenséget, amelyben két különböző elektromos vezető vagy félvezető közötti hőmér-



7. ábra. Termoelektromos hőszivattyú



8. ábra. Termoelektromos elem

séklet-különbség feszültségkülönbséget hoz létre a két anyag között, Seebeck néven ismert. A két vezető vagy félvezető egyikére hőt alkalmazva a felmelegített elektronok a hidegebb felé áramlanak. A Seebeck-effektus fordított jelenségét Peltier-nek nevezik; a két anyagot összekötő csomóponton átfolyó elektromos áram egységnyi idő alatt hőt bocsát ki vagy nyel el a találkozásnál, hogy kiegyenlítse a két anyag kémiai potenciáljának különbségét.

Thomson-effektusnak nevezzük azt a hőfejlesztést vagy -elnyelést, amikor az elektromos áram egyetlen anyagból álló áramkörön halad keresztül, amelynek hossza mentén hőmérséklet-különbség van.

Ez a hőátadás a vezetőkben lévő áramokkal szembeni elektromos ellenállással összefüggő közös hőtermelésre épül. Megjegyzendő, hogy a

Thomson- és Peltier-effektusok reverzibilis folyamatokra utalnak. A termoelektromos rendszerek tervezésénél általában figyelmen kívül hagyják a Thomson-effektus hatását.

A termoelektromos hőszivattyú matematikai modellje alapvetően különbözik a fent bemutatott hőszivattyúk modelljeitől, ezért a továbbiakban bővebben mutatjuk be.

A termoelektromos hőszivattyú esetében, a **8. ábrán** látható termoelektromos elem vázlatos rajza alapján, az elem hidegpontján átmenő hőáramlat a következő egyenlet segítségével számítható ki [10]:

$$Q_r = \alpha \cdot I \cdot T_r - 0.5 \cdot R \cdot I^2 - \Lambda \cdot \Delta T, \text{ (W)} \quad (4)$$

ahol:

α a teljes Seebeck-együttható $V \cdot K^{-1}$ -ben;

R a teljes elektromos ellenállás Ω -ban;

Λ a termoelektromos elem teljes vezetőképessége $W \cdot K^{-1}$ -ben.

Ezen elemek kiszámítására szolgáló egyenletek a következők:

$$\alpha = |\alpha_A| + |\alpha_B|, \text{ (V/K)} \quad (5)$$

ahol $\alpha_{A,B}$ – a termoelektromos elem A és B komponensének Seebeck-együtthatója $V \cdot K^{-1}$ -ben.

$$R = \rho_A \cdot \frac{l_A}{A_A} + \rho_B \cdot \frac{l_B}{A_B}, \text{ (}\Omega\text{)} \quad (6)$$

ahol:

ρ_A, ρ_B – a termoelektromos elem A és B komponensének ellenállása $\Omega \cdot m$ -ben;

l_A, l_B – a termoelektromos elem A és B komponensének hossza m -ben;

A_A, A_B – a termoelektromos elem A és B komponensének felülete, m^2 -ben.

Végül:

$$\Lambda = \lambda_A \cdot \frac{A_A}{l_A} + \lambda_B \cdot \frac{A_B}{l_B}, \text{ (W/K)} \quad (7)$$

ahol λ_A, λ_B – a termoelektromos elem A és B komponensének hővezetési tényezője $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ -ben.

A termoelektromos rendszer hőtani jellemzőinek megállapításához ki kell számítani a termoelektromos elem melegpontján kilépő hőt, kezdve az energiamérleg egyenletével [10]:

$$Q_c = Q_r + P_i, \text{ W} \quad (8)$$

ahol: P_i – a működéshez szükséges elektromos teljesítmény, W -ban, Q_r – az elem hidegpontján áthaladó hőáramlat W -ban.

A rendszer maximális hűtési hatékonysága:

$$\varepsilon_{fmax} = \frac{Q_r}{P_i} \quad (9)$$

A hőszivattyú maximális hatásfoka, más néven teljesítménytényező (COP):

$$\mu_{max} = \frac{Q_c}{P_i} \quad (10)$$

A hűtés exergetikai hatásfoka:

$$\eta_{Ef} = \frac{m - \frac{T_c}{T_r}}{m + 1} \quad (11)$$

Amelyben m egy paraméter, amely kiszámítható:

$$m = \sqrt{1 + Z \cdot \frac{T_c + T_r}{2}}, \quad (12)$$

ahol Z a termoelektromos elem hatásfoka, amelyet a következő egyenlettel lehet kiszámolni:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\Phi_{min}}, \quad (13)$$

míg a Φ_{min} értéket az egyenlet adja meg:

$$\Phi_{min} = (\sqrt{\lambda_A \cdot \rho_A} + \sqrt{\lambda_B \cdot \rho_B})^2. \quad (14)$$

A termoelektromos hőszivattyú exergia-hatásfoka a következőképpen számítható ki:

$$\eta_{Et} = \frac{m - \frac{T_r}{T_c}}{m + 1} \quad (15)$$

4. A hőszivattyúk hőtani jellemzői

A hőszivattyús fűtés az Európai Unió zöld energiaváltásában központi szerepet tölt be, ezért leginkább háztartásokban vannak elterjedve, fűtésre, illetve meleg víz előállítására használják. Alacsony hőteljesítményű energiaforrások kiaknázására alkalmas hőszivattyúk a gőzkompresziós, víz-víz rendszerűek [10, 11]. Ez a típusú hőszivattyú alkalmas arra, hogy $40^\circ C$ alatti hőmérsékleten lévő vízből származó hulladékhőt hasznosítson, a használati meleg vizet $50\text{--}80^\circ C$ -ra felmelegítve.

A fent bemutatott hőszivattyúk ahhoz, hogy működjenek, elektromos áramot használnak. A kompresszort (**1. ábra**), illetve a turbókompresszort (**3. ábra**, **5. ábra**) elektromos motor hajtja, míg a termoelektromos hőszivattyú, ahogy a neve is mutatja, árammal működik, ezért alapvetően különbözik a többi hőszivattyútól.

Amint a **2.**, **4.** és **6. ábrán**on látható, a hőszivattyúk körfolyamata termodinamikai megvalósítása (gőzkompresziós, gázkompressziós stb.), valamint az alkalmazott hűtőközeg típusa erősen befolyásolja az alkalmazott konstruktív megoldásokat. A hőszivattyúk felépítése nagyon változatos,

ha pedig többlépcsős megoldásokat elemeznénk, akkor a konstruktív megoldások még változatosabbak lesznek, és felsorolásuk is sok időt venne igényben.

A hőszivattyúk hőtani jellemzői a következő kezdeti adatok használatával lesznek kiszámolva: a szükséges hőszállítás Q_p , amely fedezi egy háztartás igényét. $Q_i = 28 \text{ kW}$; $T_i = 65 \text{ °C}$ – a használati meleg víz hőmérséklete; T_a – környezeti hőmérséklet (hőforrás). A hőforrás hőmérsékletét annak függvényében állapítottuk meg, hogy a vízgőzhűtőközzel működő hőszivattyú nem üzemeltethető a hőforrás alacsonyabb hőmérséklete mellett, tehát $T_a = 30, 35, 40 \text{ °C}$.

A gőzkompresziós hőszivattyú esetében még szükséges pár adat: $\Delta T_c = 5 \text{ °C}$ – a kondenzátor hőátadásához szükséges hőmérséklet/különbség (hőszállítás); $\Delta T_0 = 5 \text{ °C}$ – a párologtató hőátadásához szükséges hőmérsékleti különbség; $T_{sr} = 10 \text{ °C}$ – alul hűtéshez szükséges hőmérsékleti különbség; az alkalmazott hűtőközeg, R717 (ammónia).

A gőzkompresziós, R717- (ammónia) hűtőközzel működő hőszivattyú esetében az eredmények az **1. táblázat**ban találhatók, míg a víz-hűtőközzel működő hőszivattyú eredményei a **2. táblázat**ban találhatók. A gőzkompresziós hőszivattyú esetében is a kondenzátor hőátadásához szükséges hőmérséklet-különbség (hőszállítás) és a párologtató hőátadásához szükséges hőmérséklet-különbség $\Delta T_c = \Delta T_0 = 5 \text{ °C}$.

A gőzkompresziós hőszivattyú számításai alapján nyert eredmények a **3. táblázat**ban találhatók.

A termoelektromos hőszivattyú hőtani jellemzői azonos hőforrás-hőmérsékletek, hőmérsék-

1. táblázat. Az ammónia/hűtőközzel működő hőszivattyú hőtani jellemzői

Hőtani jellemző	Érték		
A hőforrás hőmérséklete, T_a [°C]	30	35	35
Tényleges teljesítmény, P_e [kW]	5,24	4,54	4,54
A hő formájában felvett fajlagos belső energia, q_0 [kJ·kg ⁻¹]	996,29	999,80	999,80
Leadott fajlagos hőmennyiség, q_c [kJ·kg ⁻¹]	1198,23	1170,64	1170,64
Ideális COP μ_c	9,66	11,27	11,27
Elméleti COP μ	5,93	6,85	6,85
Tényleges COP μ_e	5,34	6,17	6,17
Exergia-hatásfok, η_E [%]	61,41	60,79	60,79

let-emelkedések és 28 kW szükséges hőleadás figyelembevételével lettek kiszámítva.

Ezenkívül ki kell választani azokat a félévezető anyagokat, amelyeket a termoelektromos elemek felépítéséhez használtak, jelen esetben a tellúrt (A) és a bizmutot (B).

2. táblázat. A vízgőzhűtőközzel működő hőszivattyú hőtani jellemzői

Hőtani jellemző	Érték		
A hőforrás hőmérséklete, T_a [°C]	30	35	40
Minimális teljesítmény, P_{min} [kW]	3,02	2,84	2,65
Kompreszor teljesítménye, P_c [kW]	4,86	4,86	4,86
Szivattyú teljesítménye, P_p [kW]	0,11	0,06	0,04
Végösszeg P_{tot} [kW]	7,99	7,76	7,55
Exergiavesztesség a kompresziós folyamat irreverzibilis jellege miatt, π_{irc} [%]	15,82	15,82	15,82
Exergiavesztesség a fojtószelepen, π_{irt} [%]	3,97	7,83	11,60
Exergiavesztesség a kondenzátorban történő hőátvitel irreverzibilitása miatt, $\pi_{\Delta T_c}$ [%]	18,02	18,02	18,02
Maximális COP μ_{max}	9,26	9,87	10,56
Tényleges COP μ_e	5,07	5,13	5,15
Exergia-hatásfok η_E [%]	62,20	58,33	54,56

3. táblázat. A gőzkompresziós hőszivattyú hőtani jellemzői

Hőtani jellemző	Érték		
A hőforrás hőmérséklete, T_a [°C]	30	35	40
Elektromos teljesítmény, P_e [kW]	18,99	18,47	18,06
A tényleges körfolyamat működéséhez szükséges fajlagos munka, l_e [kJ·kg ⁻¹]	87,53	90,58	93,62
Párologtatóban felvett fajlagos hő, q_a [kJ·kg ⁻¹]	44,99	50,01	55,04
A kondenzátorban leadott fajlagos hő, q_i [kJ·kg ⁻¹]	129,02	136,97	144,91
Az ideális Carnot-körfolyamat fajlagos munkája, l_{minC} [kJ·kg ⁻¹]	13,36	12,16	10,72
Ideális COP μ_c	9,657	11,27	13,52
Elméleti COP μ	1,54	1,58	1,61
Tényleges COP μ_e	1,47	1,51	1,55
Exergia-hatásfok η_E [%]	15,90	13,98	11,93

Az anyagok fizikai jellemzői a bizmut esetében: átmérő $d=7$ mm, hossza $l=3,2$ mm, a Seebeck együtthatója $\alpha=-0,21\cdot10^{-3}$ V·K⁻¹, elektromos vezetőképesség $\rho=10^{-5}$ Ω·m; hővezető-képesség $\lambda=1,45$ W·m⁻¹·K⁻¹. A tellúr fizikai jellemzői pedig: hossza $l=3,2$ mm, a Seebeck együtthatója $\alpha=0,23\cdot10^{-3}$ V·K⁻¹, elektromos vezetőképessége $\rho=10^{-5}$ Ω·m; hővezető-képesség $\lambda=1,45$ W·m⁻¹·K⁻¹, míg az átmérőt számítások alapján határozzuk meg. A termoelektromos hőszivattyú esetében az eredmények a **4. táblázatban** vannak feltüntetve.

5. Összegzés

A fent bemutatott adatok alapján az alábbi következtetéseket lehet levonni: a szakirodalomban feltüntetett értékekkel összhangban, a hőszivattyúk hőtani jellemzőinek a hőforrás hőmérsékletétől függő változása a következő:

- a tényleges teljesítménytényező, (COP) μ_e növekedik a hőforrás hőmérsékletének emelkedésével;
- az exergia-hatásfok, η_E csökken a hőforrás hőmérsékletének emelkedésével;
- a működtetéshez szükséges elektromos teljesítmény, P_e a hőforrás hőmérsékletének emelkedésével csökken.

Az exergia-hatásfok, η_E csökkenése a hőforrás hőmérsékletének emelkedésével, a termoelektromos hőszivattyú esetében 1,1%-kal, a gázkompressziós hőszivattyú esetében 3,97%-kal, a vízgőzhűtőközzel működő hőszivattyú esetében 7,64%-kal, míg a gőzkompressziós ammónia-hűtőközzel működő hőszivattyú esetében 2,16%-kal.

Ahhoz, hogy összehasonlíthassuk a különböző típusú hőszivattyúkat a villamosenergia-fogyasztás függvényében, egy megfelelő összehasonlítási alapot kell találni.

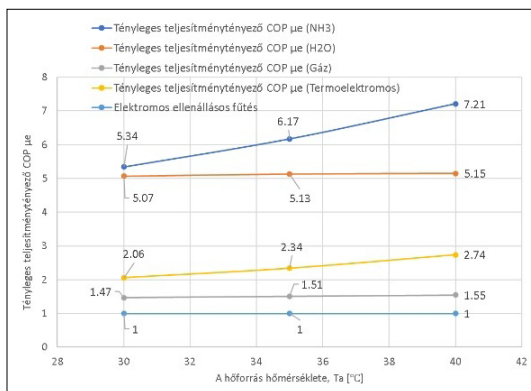
4. táblázat. A termoelektromos hőszivattyú hőtani jellemzői

Hőtani jellemző	Érték		
A hőforrás hőmérséklete, T_a [°C]	30	35	40
A működtetéshez szükséges elektromos teljesítmény, P_e [kW]	13,61	11,96	10,22
A hőforrásból hő formájában felvett energia, Q_r [kW]	14,39	16,04	17,78
Ideális COP μ_c	9,66	11,27	13,53
Tényleges COP μ_e	2,06	2,34	2,74
Exergia-hatásfok η_E [%]	21,30	20,80	20,20

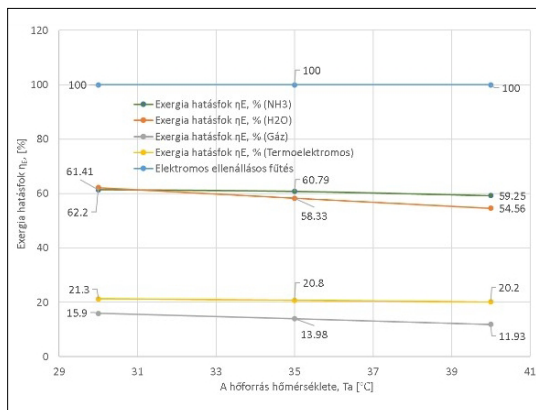
Egy klasszikus fűtési módszer az elektromos ellenállásos fűtés, amely jó összehasonlítási alap, mivel az elektromos ellenállásfűtés konverziós hatékonysága 100%-os abban az értelemben, hogy az összes bejövő elektromos energia hővé alakul [13, 14], ugyanakkor az elektromos exergia tényezője 1 [15]. Az exergiatényező, ahogy a szakirodalom meghatározza, [15] az exergia és az energia közötti arány, többnyire 0 és 1 közötti szám.

A **9. ábra** bemutatja a tényleges teljesítménytényező, (COP) μ_e változását a hőforrás hőmérsékletének függvényében, ahol látható, hogy a tényleges teljesítménytényező, (COP) μ_e növekedik a hőforrás hőmérsékletének emelkedésével, és ebből a szempontból, a hatékonysági sorrend a következő: a gőzkompressziós ammónia-hűtőközzel működő hőszivattyú, a gőzkompressziós vízgőzhűtőközzel működő hőszivattyú, a termoelektromos hőszivattyú és az utolsó helyen a gázkompressziós hőszivattyú áll. Mivel az összes elektromos energia hővé alakul át, az ellenállás teljesítménytényezőjének 1-re határozzuk meg az értékét, tehát az összes hőszivattyú jobban teljesít ebből a szempontból, mint az ellenállásfűtés.

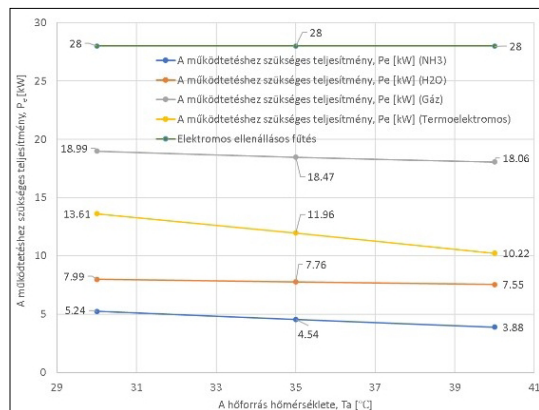
A **10. ábra** bemutatja az exergia-hatásfok, η_E változását a hőforrás hőmérsékletének függvényében, ahol látható, hogy a hatásfok csökken a hőforrás hőmérsékletének emelkedésével és ebből a szempontból a hatékonysági sorrend a következő: a gőzkompressziós ammónia-hűtőközzel működő hőszivattyú, a gőzkompressziós vízgőzhűtőközzel működő hőszivattyú, a termoelektromos hőszivattyú és az utolsó helyen a gázkompressziós hőszivattyú áll, ebből a szempontból az ellenállásfűtés teljesít legjobban, mivel az elektromos áram lényegében tiszta exergia.



9. ábra. A tényleges teljesítménytényező, COP



10. ábra. Az exergia-hatásfok



11. ábra. A működítéshez szükséges teljesítmény

A 11. ábra bemutatja a működítéshez szükséges elektromos teljesítmény, P_e változását a hőforrás hőmérsékletének függvényében, ahol látható, hogy a teljesítmény csökken a hőforrás hőmérsékletének emelkedésével, és ebből a szempontból a hatékonysági sorrend a következő: a gőzkompresziós ammónia-hűtőközeggel működő hőszivattyú, a gőzkompresziós vízgőz-hűtőközeggel működő hőszivattyú, a termoelektromos hőszivattyú és az utolsó helyen a gázkompresziós hőszivattyú áll, ebből a szempontból az ellenállásfűtés teljesít a legrosszabbul, mivel az elektromos áram exergiatényezője 1.

Összegezve, a hőszivattyú kiválasztása egy bizonyos alkalmazásra bonyolultabb, mint első pillantásra gondolnánk, és a hőforrás szerinti osztályozásuk csak egy kiindulópont lehet egy megfelelő hőszivattyú választásában.

Fontos kritérium kellene, hogy legyen a működítéshez szükséges teljesítmény, mivel ez hosszú távon befolyásolja a működési költségeket, de más gazdasági szempontok se elhanyagolhatók, mint például a kezdeti beruházás, ezek mind befolyásolják azt, hogy a befektetés valaha megtérül-e.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] BOSCH <https://www.bosch-homecomfort.com/hu/hu/residential/tudas/hoszivattyu/hoszivattyu-tipusok-melyiket-valasszuk/> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [2] ESTÉ-Credit Side Kft. <https://rifeng-hoszivattyu.hu/hoszivattyu-tipusok/> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [3] Mitsubishi Electric, ZUBADAN, ecodan. https://www.zubadan.info.hu/tudasbazis/otthoni_felhasznalok/altalanos/A%20h%C5%91szivatty%C3%BA%20t%C3%ADpusai (letöltve: 2024. augusztus 16.)

- [4] HidroGeo Drilling. <https://www.hgd.hu/hu/hoszivattyuk-tipusai> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [5] Energia Partner <https://www.energiapartner.hu/energia/353-a-hoszivattyus-rendszerek-fajtai-jellemzoi-es-letesitese> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [6] EHPA. <https://www.ehpa.org/about-heat-pumps/types-of-heat-pumps/> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [7] The Renewable Energy Hub, UK <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/heat-pumps-information/the-difference-between-types-of-heat-pumps> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [8] The News – Air Conditioning, Heating Refrigeration. <https://www.achrnews.com/articles/152628-the-9-types-of-heat-pumps> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [9] Branimir Pavkovic: *Alkalmazott hőszivattyús rendszerek új és felújított épületeknél*. Épületenergetika, HUHR/1001/2.2.1/0009, 2012
- [10] Radcenco V. et. al.: *Instalații de pompe de căldură*. Editura Tehnică, București, 1985. 115–367.
- [11] Radcenco V. et. al.: *Processes In Refrigeration Equipment*. Didactică și Pedagogică Publishing House, Bucharest, 1983, 372–390.
- [12] Dosa I.: *Efficiency of Heat Recovery from Exhaust Ventilation Air of Underground Mines*. Revista Minelor, 3. (2015).
- [13] US Department of Energy. <https://www.energy.gov/energysaver/electric-resistance-heating> (letöltve: 2024. augusztus 16.)
- [14] Dincer I. (Szerk.): *Comprehensive Energy Systems. Vol. 1: Energy Fundamentals*. Elsevier, 2018, 265–339.
- [15] Gong M., Wall G.: *Exergy Analysis of the Supply of Energy and Material Resources in the Swedish Society*. Energies, 9. (2016) 707. <https://doi.org/10.3390/en9090707>



IDŐZÍTŐFÉKES PRÉS TERVEZÉSE

DESIGN OF A TIMER-BRAKE PRESS

Fehér Dominik,¹ Ravai-Nagy Sándor,² Szigeti Ferenc³

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

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

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

Abstract

The topic of the article is the modification of a mechanical arm press and its installation on the production line. After discussing the necessity of the development, the design process of a key component – the timer locking mechanism – is elaborated. This is followed by an overview of the press mounting and installation requirements, and the solutions as well as the key components of the equipment, such as the toothed part and the locking mechanism. Detailed assembly models are created, and load tests are performed on the components and surfaces supporting the press using both traditional calculations and finite element methods to verify that the designed structure can withstand mechanical loads without significant deformation. Finally, a development opportunity is presented that allows for the automation of not only the timer-brake press but also any other flanging press.

Keywords: *press automation, finite element analysis, manufacturing optimization.*

Összefoglalás

A cikk témája mechanikus karos prés átalakítása és gyártósorra történő telepítése. A fejlesztés szükségességének tárgyalása után kifejtésre kerül a prés tervezésében kulcsszerepet betöltő időzítőes reteszelőszervezet tervezési folyamata. Ezt követően bemutatjuk a prések rögzítési és telepítési követelményeit és a megoldási módszereket, valamint a berendezés fontosabb alkatrészeit, a fogazott alkatrészt és a reteszelőt. Részletes összeállítási modellt készítve, a préseket hordozó alkatrészekben és felületeken terhelésvizsgálatok végrehajtása történik hagyományos számítások és végelem-módszer alkalmazásával, annak igazolására, hogy a megtervezett szerkezet elviseli a ráható mechanikai terheléseket jelentős deformációk nélkül. Végül bemutattunk egy olyan fejlesztési lehetőséget, amellyel nemcsak az időzítőfékés prés, hanem bármely más peremező prés automatizálása is megvalósítható.

Kulcsszavak: *présautomatizálás, végelem-analízis, gyártásoptimalizálás.*

1. A projekt ismertetése

A VW Touareg 536-típusú autó egy Premium-SUV-kategóriájú, luxuskivitelű sporthaszonjármű, amelyet a Volkswagen cég gyárt. A terepjáró sebességváltójának felső, bőrzöött, műanyag részének (németül Oberteil, azaz felső rész) összeszerelése zajlik a soron, ahová szükséges a prést telepíteni (1. ábra).

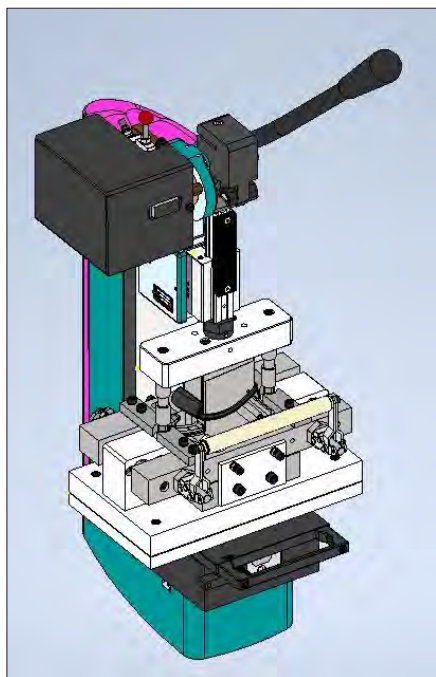
A projekt kiindulópontja egy vevői reklamáció volt, amely felváltási problémákat jelzett a végterméken. Ennek okai feltárása érdekében az üzemben laborvizsgálatokat végeztek, amelyek három fő hibaforrást azonosítottak: helytelen rögzítés, rossz kézi visszaperemezés és elégtelen rögzítési időtartam. A gyártási folyamat során a fröccsöntött műanyag alkatrészeire ragasztóval befűjt



1. ábra. Touareg 536-sebességváltó [1]



2. ábra. „Touareg 536 Oberteil” végtermék



3. ábra. Az időzítőfékes prés összeállítási modellje [2]

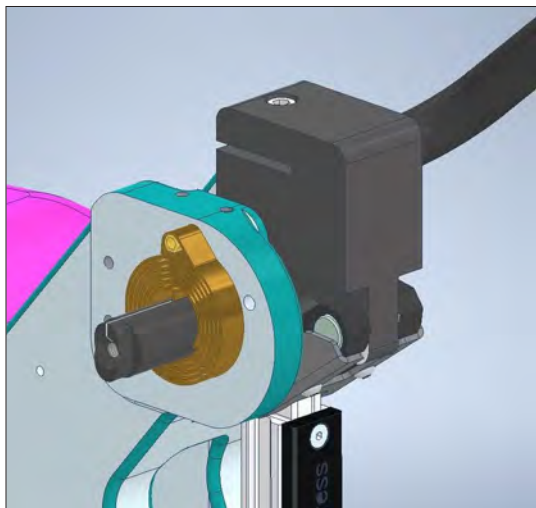
kiszabott bőrt kell felhelyezni, majd a peremeket megfelelő ideig fix pozícióban kell tartani, hogy a ragasztó megkössön (2. ábra).

A feladat megoldásához a német anyavállalat által biztosított peremezőszerszámok összehangolására volt szükség egy megfelelő mechanikus karos présel. Ehhez tervezni kellett egy adaptert a felső szerszámhoz, valamint egy időzítő fékezészerkezetet, amely megakadályozza a prés idő előtti oldását, ezzel csökkentve a selejtgyártást. Mivel jobb kormányos járművekhez is gyártanak alkatrészeket, két különálló prés beépítésére volt szükség. A cég számára kiemelten fontos a helykihasználtság, ezért egy forgó tartólapra kerültek a prések, amelyre a már meglévő kapcsolópérek is integrálhatók voltak. A tartólap méretezése, gyártástechnológiájának kidolgozása és csapágyazása szintén a projekt része volt, biztosítva a hatékony és ergonomikus kialakítást.

2. Az időzítőfékes prések ismertetése, funkciója

A prés feladata a termék rögzítése megfelelő ideig, a szükséges erő kifejtésével és a termék visszaperevezése (3. ábra). A működés megértéséhez először a felső présszerszám és a reteszelő szerkezet ismertetése szükséges. Az operátor a felső formába helyezi a terméket, majd egy mozgó tálcán tolja be az alsó szerszámot. Ezután a kart lehúzza elindítja a préselést, amelyet egy spirálrugó ellenében működő présfej biztosít.

A reteszelő szerkezet egy tengelycsonkra kerül, amely a spirálrugó ellenében a présszárral együtt fordul (4. ábra). A koncepció egy fogazott íves al-



4. ábra. A spirálrugó és a tengelycsonk [2]

katrész és egy reteszelőegység összekapcsolásán alapul, ami megakadályozza a prés idő előtti oldását. A rendszer működését egy induktív érzékelő támogatja, amely egy adott idő után visszaszámlálót indít. A visszaszámlálás végén egy pneumatikus munkahenger kibillenti a reteszelőt, lehetővé téve ezzel a prés oldását.

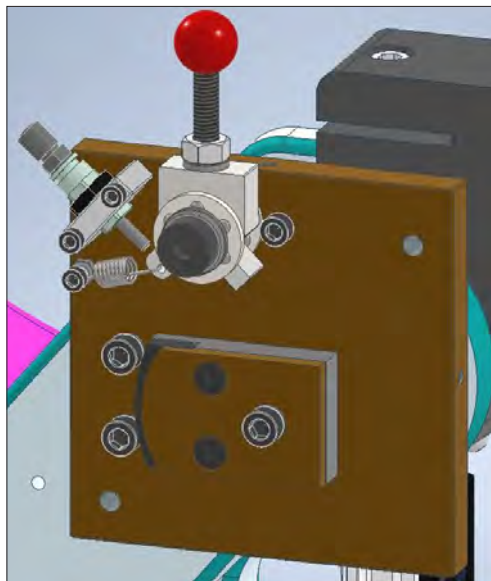
A reteszelő és a munkahenger rögzítéséhez egy alaplap tervezésére került sor, amely biztosítja a megfelelő elhelyezkedést és elegendő helyet hagy a fogas ív számára (5. ábra). Az alaplap három rögzítési ponttal csatlakozik a prés öntvénytestéhez, ebből kettő meglévő menetes furatokhoz kapcsolódik, a harmadikhoz pedig egy új furatot kellett készíteni. A szerkezet kialakítása során figyelembe vettük a karbantartási lehetőségeket is, így egy kézi oldókar is beépítésre került, amely sűrített levegő hiányában is lehetővé teszi a prés működtetését. Az időzítő központi eleme az „AT-mega328”-típusú mikrovezérlő, amely egy induktív szenzor jelére reagál [3]. Ha a fogazott alkatrész elhalad előtte, egy 60 másodperces számláló indul, amelyet egy kijelző mutat.

5 másodpercnél egy LED zöldről sárgára vált, az idő lejártával pirosra, és hangjelzés is figyelmezteti az operátort. Ekkor a relémodul 24 V-t kapcsol az elektropneumatikus szelephez, amely nyomás alá helyezi a munkahengert, így oldva a mechanikus reteszelést. 2 másodperc elteltével új jel érkezik, ekkor kell a terméket kivenni a szerszámból. Ha ez nem történik meg, a spirálrugó kissé megemeli a préskart, de a vezetőcsap megakadályozza a teljes nyitást. A mikrokontroller figyeli a fogazott alkatrész visszamozgását, így a számláló csak a következő lefelé mozgáskor indulhat újra.

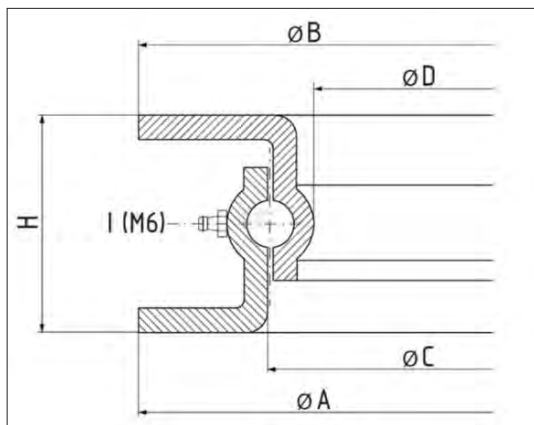
3. A prés gyártósorra történő telepítése

A prés sorba telepítéséhez egy forgólap tervezése szükséges, amelyre a két prés és két kapocsfelhelyező prés kerül. A tervezés során figyelembe kellett venni a terheléseket, az anyagminőséget és a rögzítési pontokat. Az Inventor programmal készített modell alapján meghatároztuk a prések tömegét és a csapágyazás helyét, ami alapvető a végeelem-szimulációhoz (6. ábra).

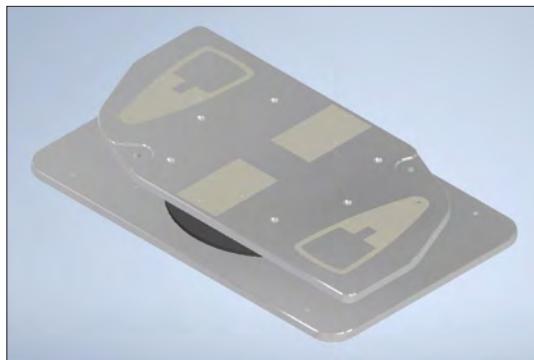
A lap kialakításánál fontos volt az operátor hozzáférhetősége, a biztonságos, egyszerű geometria és az esztétikus megjelenés (7. ábra). A lap rögzítéséhez rugós csapszeget használtunk, amely egy furatba akadva megakadályozza az elfordulást. Az operátor kioldja, 180°-ot fordít, majd a csapszeg újból rögzíti a lapot.



5. ábra. A reteszelő, a fogas ív és a munkahenger összeszerelt állapotban [2]



6. ábra. A csapágyazás fontosabb méretei [4]



7. ábra. A forgatható lap a prések nyomási felületeivel [2]

4. A terhelésvizsgálatok eredményei

A végeelem-módszerrel végzett terhelési vizsgálatnál kulcsfontosságú az anyagminőség, mivel ez határozza meg a terhelhetőséget és a merevséget. A vállalatnál főként alumíniumot használunk, mert könnyű, nagy szilárdságú, természetes oxidrétege pedig korrózióvédelmet biztosít. Emellett könnyen forgácsolható, így csökkenti a megmunkálási költségeket. A vizsgálat négy fő eredményt mutatott. Az első a redukált feszültség (8. ábra), amely a legnagyobb igénybevételi helyen ébredő fajlagos terhelést mutatja. Maximális értéke 7,72 MPa, ami nem közelíti meg a kritikus határt [5].

A második az egyenértékű alakváltozás, amely az anyag teljes deformációs energiáját mutatja, értéke $4,261 \cdot 10^{-5}$ dimenzió nélküli érték, amely elhanyagolható (9. ábra) [5].

A harmadik a lehajlás vizsgálata, különösen a lap két szélénél, ahol a maximális érték 0,04098 mm, amely nem számottevő (10. ábra) [5].

Végül kismértékű, 0,01 fokos szögelfordulást észleltem a két időzítő prés helyén, amely szintén elhanyagolható. Ezek az eredmények igazolják, hogy a szerkezet megfelel a tervezési elvárásoknak, stabil és teljesítőképessége megfelelő. A következő lépés az árajánlatkérés a csapágyazásra, valamint a forgó lap és az alaplap gyártási technológiájának kidolgozása.

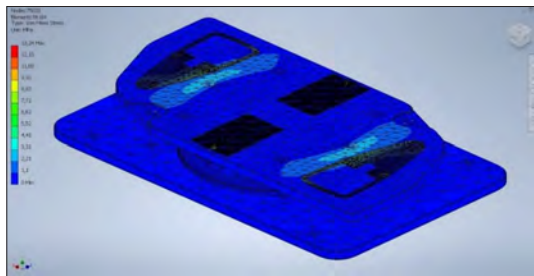
5. Fogazott alkatrész számítógépes gyártástervezése

Az alkatrész nagyoló és simító megmunkálása, valamint a kontúrmarás Inventor CAM szoftverrel, a fogak kialakítása Edgcam programmal történt. A forgácsolási paraméterek a Sandvik Coroplus® Tool Guide segítségével kerültek meghatározásra. Az előgyártmányt gépsatuba fogva először az A oldal nagyolása és simítása történik egy 50 mm átmérőjű CoroMill® 390 homlokmaróval, majd 180°-os fordítás után a B oldal ugyanígy megmunkálásra kerül (11. ábra) [6].

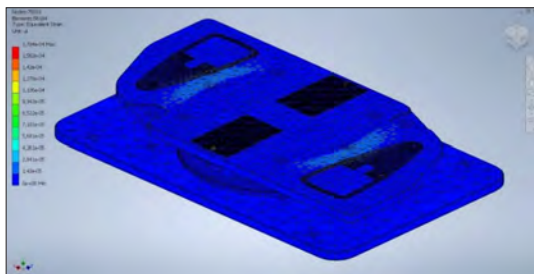
Ezután a váll kialakítása következik egy 10 mm-es CoroMill® Dura-típusú szármaróval, majd a megmunkálás a horony kimunkálásával, a furatok fúrásával és a menetkészítéssel folytatódik (12. ábra) [7].

A külső kontúr megmunkálásához a munkadarabot egy tokmányba fogott készülékben rögzítve munkáljuk meg, az előző fázis STL-modelljét illesztve a folytatáshoz (13. ábra).

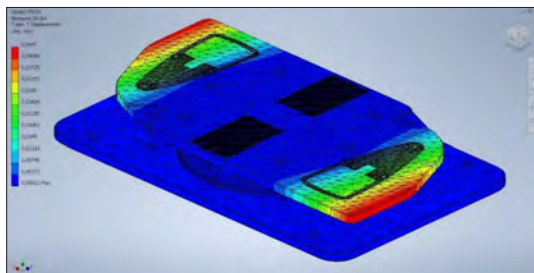
Végül a munkadarabot osztókészülékbe rögzítjük a fogak kimunkálásához (14. ábra), amelyhez egy 10 mm-es átmérőjű, 45°-os élettörő keményfém-marót használunk (15. ábra).



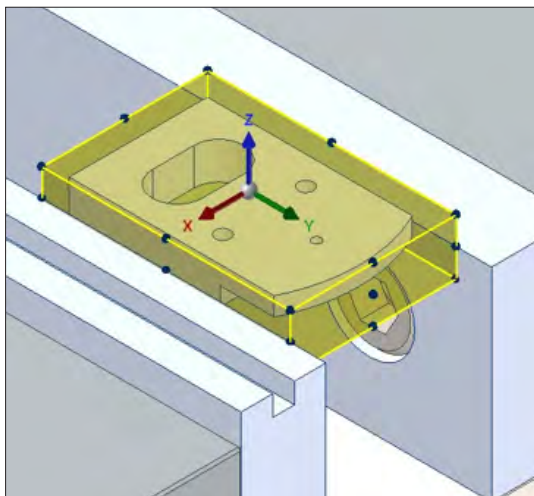
8. ábra. A redukált feszültség szemléltetése [2]



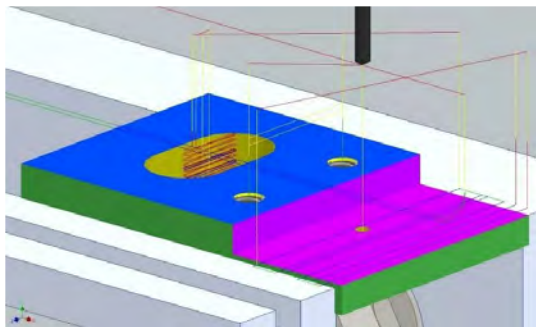
9. ábra. Egyenértékű rugalmas alakváltozás értéke [2]



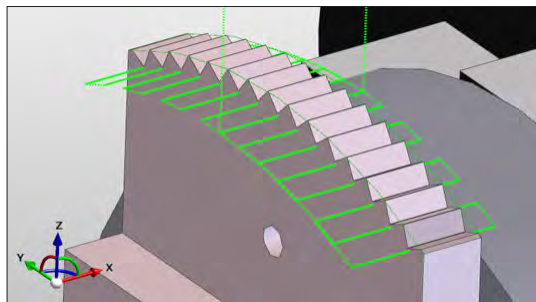
10. ábra. Lehajlás vizsgálata [2]



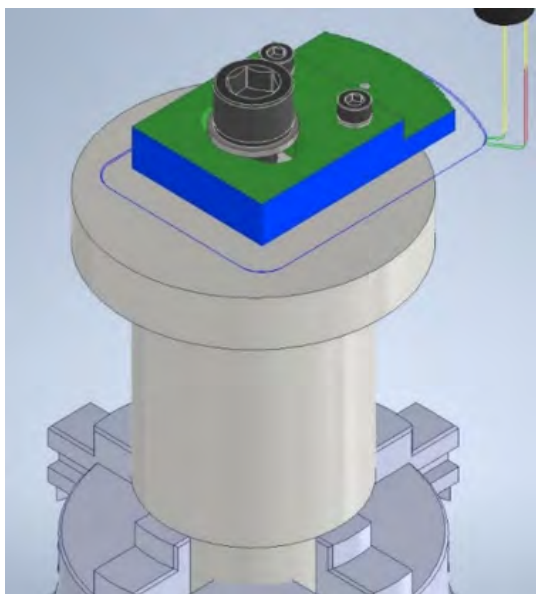
11. ábra. Előgyártmány illesztése a munkadarabra [1]



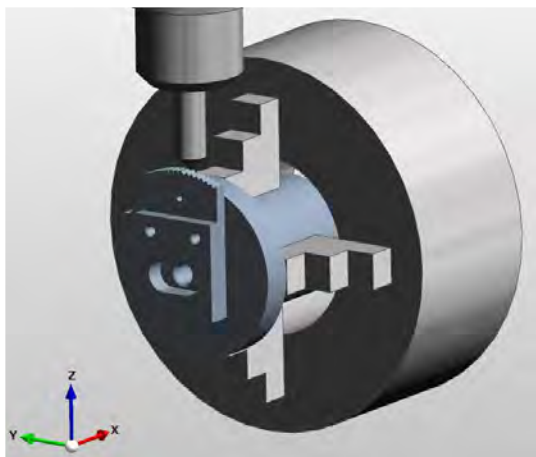
12. ábra. Alaksajátosságok kialakítása [2]



15. ábra. Fogak megmunkálásának szerszámpályája [8]



13. ábra. A tokmányba fogott készülék a munkadarabbal [2]



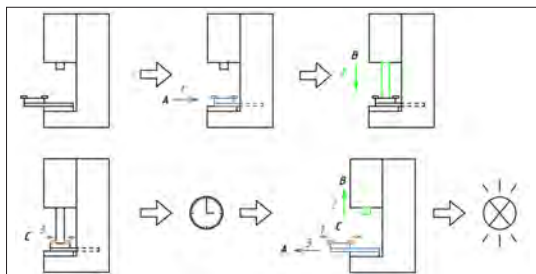
14. ábra. Fogak kimunkálása [8]

6. A prés fejlesztési javaslata

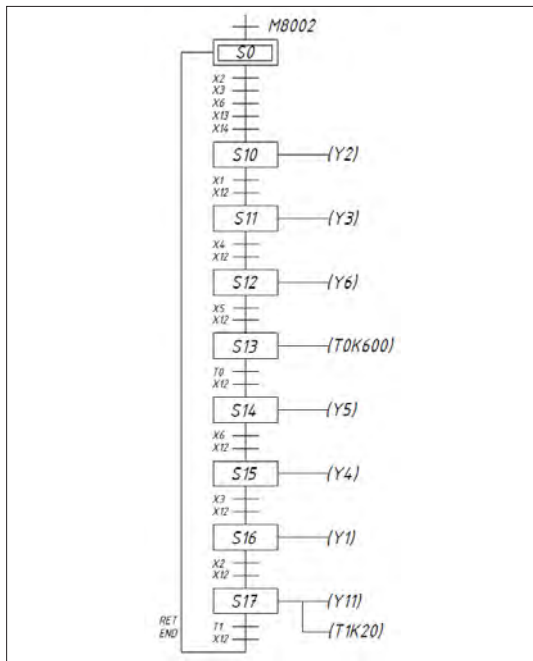
A termelési adatok elemzéséből kiderült, hogy a prés hatékony, de van lehetőség további optimalizálásra. Az operátorok leterheltsége eltérő, ami növeli az ütemidőt. Automatizálással a nem produktív idő csökkenthető: a fejlesztés alapján a pneumatikus munkahengerek kétgombos indítással végeznék a préselést, miközben az operátor más feladatokra fókuszálhatna. Az átalakított prés egy ciklusa során három munkahenger végzi a szerszámok mozgatását, egy időzítő szabályozza a folyamatot, és a ciklus végén egy lámpa jelzi a befejezést (16. ábra). Az automatizáláshoz 3 pneumatikus munkahenger, 3 darab 5/2-es bistaibil szelep és egy PLC szükséges.

Az átalakítás során a prés reteszelőszerkezete és karjai eltávolításra kerülnek. A rendszer sorrendi vezérlést használ, ahol a továbblépés feltételekhez kötött. A vezérlési folyamat egy sorrendi folyamatra segítségével épül fel, amely az operátorokat és a lépéseket tartalmazza. Ez lényegében egy grafikus ábrázolási forma, amelynek segítségével az automatizálási rendszerek vezérlését logikus, érthető módon lehet dokumentálni és programozni (17. ábra) [9].

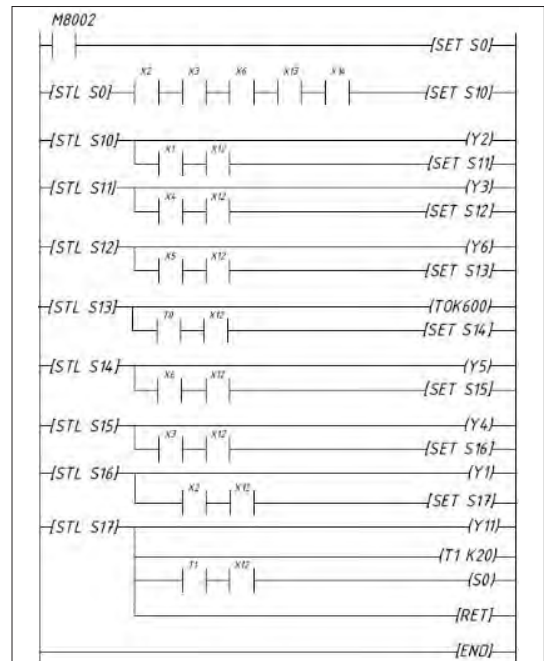
A 18. ábra pedig betekintést ad a folyamatot leíró PLC programba, amelyhez létradiagram készült. A bemenetek „X”, a kimenetek „Y” jelölést kaptak [9].



16. ábra. A prés egy teljes munkaciklusa [3]



17. ábra. Sorrendi folyamatábra [2]



18. ábra. Létradiagram [2]

7. Következtetés

A projekt során végeselem-módszerrel végzett terhelésvizsgálatok megerősítették a tervezett szerkezet stabilitását és megfelelőségét. A prés telepítésekor figyelmet fordítottunk a helykihasználtságra, operátori hozzáférhetőségre és biztonságra. A fejlesztés során a prés automatizálásának lehetősége is felmerült, mely a nem produktív idő csökkentésére és az operátorok leterheltségének mérséklésére irányult. Az átalakítás pneumatikus munkahengerekkel és PLC-vel biztosítaná az automatizált működést, így a gyártási folyamatok gyorsulnának. Az automatizálásnak köszönhetően a termelési hatékonyság is növekedne, míg a gyártási költségek csökkennének. Előreláthatóan, a darabszám növekedése esetén ez a fejlesztés megvalósításra kerülhet. Az időzítőfékes prés biztosította a megfelelő termékminőséget, és a korábbi reklamációk, amelyek a felválásokból adódtak, megszűntek. Az új rendszer alkalmazása csökkentette a selejtgyártást, és a gyártási folyamatoknak a cikkben leírt szabályozásával, az időzítőfékes prés üzembe helyezésével a vevői elégedettség is javult.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát a Nyíregyházi Egyetem Tudományos Tanácsa támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] New Volkswagen Touareg r line jogdíjmentes képek (letöltve: 2024. április 20.). <https://www.shutterstock.com/hu/search/new-volkswagen-touareg-r-line?consentChanged=true&page=2>
- [2] Autodesk Inventor Professional 2024 Build: 153
- [3] Introduction to ATmega328 (letöltve: 2024. máj. 27.) <https://www.theengineeringprojects.com/2017/08/introduction-to-atmega328.html>
- [4] AutoCAD T.53.0.0 AutoCAD LT 2023
- [5] Nándori F.–Szirbik S.: Szilárdságtan. Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolc 2008.
- [6] CoroMill 390 Sokoldalú derékszögű sarokmaró szerszámok mélyítés funkcióval vegyes gyártáshoz. (letöltve: 2024. jún. 10.) <https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/tools/milling-tools/shoulder-milling-edging-tools/coromill-390>
- [7] CoroMill Dura Sokoldalúan felhasználható tömör keménységű szármárók (letöltve: 2024. jún.11.). <https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/tools/milling-tools/solid-carbide-end-mills/coromill-dura/coromill-dura-multimaterial>
- [8] EDGE CAM 2021.0
- [9] Ferenczi I.: *PLC programozási alapismeretek*. Nyíregyházi Egyetem, Nyíregyháza, 2018.



TENGERJÁRÓ HAJÓKON KELETKEZŐ SZENNYVÍZISZAP SZÁRÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ, MODULRENDSZERŰ BERENDEZÉS BEMUTATÁSA

PRESENTATION OF A MODULAR SYSTEM FOR DRYING SEWAGE SLUDGE FROM SEAGOING VESSELS

Kári-Horváth Attila,¹ Lantos Zsolt,² Kristóf Gábor³

¹ Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék. Gödöllő, Magyarország, kari-horvath.attila@uni-mate.hu

² Gyémánt-Pirazol Kft., Debrecen, Magyarország, zsolt.lantos@gyemantpirazol.hu

³ Gyémánt-Pirazol Kft., Debrecen, Magyarország, gabor.kristof@gyemantpirazol.hu

Abstract

Nowadays, people who take a cruise don't realize that they are putting both the environment and human health at risk significantly more than if they had chosen to travel by any other means. The large quantities of fuel burned during the voyage pollute the atmosphere and thus endanger health, and the (hazardous) waste and sewage of all kinds that are generated on board every day cannot be left on board. A ship carrying about 3000 passengers produces on average about 80 m³ of waste water per day! Newer ships are often capable of carrying a minimum of 8,000 passengers, so the amount of waste water they produce is obviously higher. Just look at these huge floating cities of 10-12 stories. The amount of waste generated on board, being far greater, must be managed in an environmentally friendly way in accordance with ever stricter standards. These factors justify that companies in the industry are constantly working to develop new technologies and solutions, not only with the building of new ships, but also the modernization of older ones.

Keywords: *sewage sludge, waste recovery, MARPOL Convention, modular system.*

Összefoglalás

Manapság, aki valamilyen tengeri hajóúton részt vesz, nem is gondol rá, hogy a legkevesebb egyhetes hajóútjával jobban veszélyezteti a környezetet és az emberi egészséget, mint ha az utazás más módját választotta volna. Az út során elégetett nagy mennyiségű üzemanyag szennyezi a légkört, és ezzel veszélyezteti az egészséget, valamint a hajókon naponta keletkező mindenféle (veszélyes) hulladék, szennyvíz sem maradhat a fedélzeten. Egy kb. 3000 utast szállító hajó átlag közel 80 m³ szennyvizet termel, naponta! Az újabb hajók gyakran minimum 8000 fő utas szállítására alkalmasak, ezért szennyvíztermelésük napi mennyisége ennél nyilvánvalóan tetemesebb. Ehhez elég csak látni ezeket a 10-12 emeletes, hatalmas, úszó városokat. A hajók fedélzetén keletkező hulladékmennyiség is sokszorosára nő, melynek környezetbarát kezelését az egyre szigorodó előírásoknak megfelelően meg kell oldani. Ezek a tényezők indokolják, hogy az iparágban tevékenykedő vállalatok folyamatosan dolgozzanak az új technológiák és megoldások kifejlesztésén. Nemcsak az új építésű hajók miatt, de a régiek korszerűsítésének okán is.

Kulcsszavak: *szennyvíziszap, hulladékhasznosítás, MARPOL-egyezmény, modulrendszer.*

1. Hulladékkezelési lehetőségek

A hulladékhierarchy az Európai Unió által meghatározott fontossági sorrend, mely a hulladékok kezelésének lehetőségeit mutatja, a legkedvezőbb megoldásoktól haladva a kedvezőtlenebb lehetőségek felé. A hulladékhierarchia rendszere segít felállítani a hulladékgazdálkodási tevékenységek közötti fontossági sorrendet, ami alapján – bizonyos kivételektől eltekintve – a legjobb megoldás a megelőzés. Azonban ha ez bizonyos körülmények között nem lehetséges, akkor a lehető legtöbb hulladék esetében kell alkalmazni az újrahasználatot, valamint az újrafeldolgozást, és csak legvégső esetben lehet a hulladékot elégetni vagy lerakni [1].

Első körben a megelőzésre és az újbóli felhasználásra összpontosít, ezzel „második esélyt” adva a termékeknek. Ezt követi az újrahasznosítás és komposztálás, illetve a hulladékégetés, amellyel elektromos energia nyerhető. A környezet és az egészségünk számára is legkárosabb megoldás a hulladéklerakás, ugyanakkor ez a legolcsóbb [2]. A hasznosítás tehát a hulladék olyan módon történő felhasználását jelenti, amely a nyersanyagok és erőforrások cseréjét eredményezi. Ily módon a hulladék értékesíthető, gazdaságilag előnyös másodlagos nyersanyag vagy energiahordozó, amely pozitív társadalmi megítéléssel rendelkezik, és így jelentősen hozzájárul a környezetvédelmi célok eléréséhez. A hasznosításnak két fő típusa ismert: az anyagviesszanyerés és az energia-visszanyerés. Az alkotóelemek hasznosítását, újrafeldolgozását és regenerálását többek között az anyagában való hasznosításnak kell tekinteni. A nemzetközi gyakorlatban az energiatermelésre alkalmas alkatrészeket RDF-nek (Refuse-Derived Fuel) vagy SRF-nek (Solid Recovered Fuels), azaz hulladékból származó üzemanyagnak vagy alternatív tüzelőanyagnak nevezik

2. A MARPOL egyezmény

A MARPOL 1973/1978 Egyezmény (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) célja a tengeri környezet védelme és a tengeri hajók okozta szennyezések megakadályozása. A nemzetközi kereskedelmi forgalomban résztvevő valamennyi 500 GT-nél nagyobb tengeri hajóra kötelezően vonatkozó egyezmény a következő potenciális veszélyek és szennyezésszforrások kezelésére tér ki. A mi szempontunkból az Annex IV. előírásai a fontosak, ezért ezt részletezzük.

Annex I: Az olajszennyeződések megelőzésére vonatkozó előírások

Annex II: Ömlesztett, folyékony halmazállapotú, mérgező hatású anyagok okozta szennyeződések megelőzésére vonatkozó előírások

Annex III: Tengeri szállítás útján továbbított csomagolt, veszélyes anyagok okozta szennyeződések megelőzésére vonatkozó előírások

Annex IV: A hajókon keletkező szennyvizek okozta szennyeződések megelőzésére vonatkozó előírások

Annex V: Hajókon keletkező háztartási és egyéb hulladékok okozta szennyeződések megelőzésére vonatkozó előírások

Annex VI: Hajók okozta légszennyezés megelőzésére vonatkozó előírások

2.1. Annex IV.

A szennyvíz:

- a) vízelvezető és egyéb hulladékok bármilyen típusú WC-ből, piszoárból és WC-süllyesztőből;
- b) vízelvezetés az orvosi helyiségektől (gyógyszertár, betegből stb.) az ilyen helyiségekben található mosdókon, mosdókáddal és dudorokkal;
- c) elvezetés élő állatokat tartalmazó helyekből vagy
- d) egyéb szennyvíz, ha a fent lefolytatott csatornákkal keverik.

Alkalmazás

E melléklet rendelkezéseit kell alkalmazni:

- a) i. új, 200 tonna bruttó úrtartalmú hajók;
- ii. új, 200 tonna alatti bruttó úrtartalmú hajók, amelyek tanúsítása szerint több mint 10 személy szállítására alkalmas;
- iii. új hajók, amelyek nem rendelkeznek mért bruttó úrtartalommal, és 10-nél több személy szállítására vannak tanúsítva;
- b) i. meglévő, legalább 200 tonna bruttó úrtartalmú hajók, 10 évvel e melléklet hatálybalépése után;
- ii. új, 200 tonna alatti bruttó úrtartalmú hajók, amelyek tanúsítása szerint több mint 10 személy szállítására alkalmas;
- iii. új hajók, amelyek nem rendelkeznek mért bruttó úrtartalommal és 10-nél több személy szállítására vannak tanúsítva.

3. A termikus szárítás

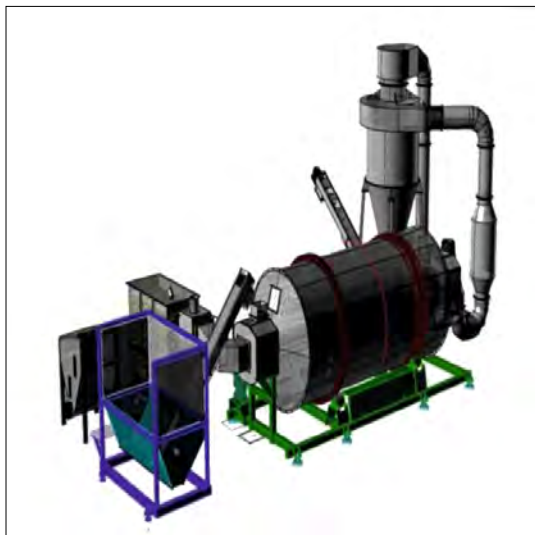
A szárítás alapvetően a folyadék szilárd anyagból történő bepárlásával történő eltávolításának

jelensége. A folyadék és a szilárd anyag elválasztásának mechanikai módszere nem számít szárításnak. A szárítási folyamatok alapelvei és jelenségei általában függetlenek a felhasznált energia típusától. A szárítás során az energiafogyasztás jelentős része folyékony víz bepárlásához (2258 kJ/kg $101,3 \text{ kPa}$ nyomáson) kell. A szilárd anyag a vizet különböző formákban tartalmazhatja, például szabad nedvességet vagy kötött formát, amely közvetlenül befolyásolja a száradási sebességet [3].

A víztelenítési opciót hőszárításnak nevezzük, amikor egy külső kiegészítő energiaforrás lehetővé teszi a hulladék melegítését. A termikus szárítás során a nedves szilárd anyagok esetében jelentős mennyiségű hőenergiát kell közölni a víz elpárologtatásához, valamint a szilárd anyagok és a megmaradt víz felmelegítéséhez. A gravitációs konvekciós vagy a kényszerített légkonvekciós szárítókemencék nagyobb fokú egyenletességet, hőmérséklet-szabályozást, gyors szárítási képességet biztosíthatnak. A kemencében történő szárítás hatékony dehidratációs eljárást és rövid száradási időt eredményezhet, maximális hőmérséklete $250\text{--}350^\circ \text{C}$. [4]

A víztelenítési lehetőséget termikus szárításnak nevezzük, amikor egy külső, kiegészítő energiaforrás lehetővé teszi a hulladék melegítését. A szárítás folyamata általában a szennyvízmaradék szilárd anyagaiból származó víz elpárologtatására szolgál. A szárítórendszer a szárítón kívül általában anyagmozgató és -tároló berendezésekből, hőtermelő és -átadó berendezésekből, légmozgató és -elosztó berendezésekből, kibocsátás-csökkentő berendezésekből és kiegészítő rendszerekből áll. Ezek a berendezésszettek sokféle formát ölthetnek. Közvetlen hőszárítóknak a forró levegő/gáz egy edényen keresztül áramlik, és közvetlenül érintkezik nedves szilárd részecskéikkel. A forró levegő és a hideg nedves sűrítmény közötti érintkezés lehetővé teszi a hőenergia átadását, ami a nedves szárítandó anyag hőmérsékletének növekedését és a víz elpárolgását okozza. A forró levegőt/gázt szinte bármely hőforrás elő tudja állítani, de leggyakrabban gázt vagy olajat égető kemence állítja elő. A közvetlen szárítóberendezésekre példaként említhetjük a forgódobos szárítókat (1. ábra). [5, 6, 7]

Az ilyen típusú rendszerekben a hőellátás tüzelőanyag-égető kemencén keresztül történik, amely közvetlenül a szárító dobjába vezet. A szárított anyagot elválasztják a meleg kipufogógáztól, majd szitálják és feldolgozzák, vagy visszavezetik a szárítóba, vagy pedig tárolósilókba



1. ábra. Forgódobos szárító elvi ábrája [8]

vezetik. Az elszívott levegőt/gázt lehűtik, és egy részét visszavezetik a szárítóba. A levegő/gáz fennmaradó részét levegőszennyezés-ellenőrző berendezésekben kezelik, majd a légkörbe vezetik. A szárító kipufogógázának visszavezetése három fontos feladatot lát el. Először is, növeli a szárítórendszer teljes hőhatékonyságát, másodszor minimalizálja a kipufogógáz térfogatát, amely levegőszennyezés-szabályozást igényel, harmadszor pedig biztonsági szerepet biztosít a rendszer oxigénkoncentrációjának korlátozásával, amely csökkenti a robbanások kockázatát. A dobosárítók levegőszennyezés-szabályozási folyamatai általában további részecskék eltávolításából állnak, amelyet regeneratív termikus oxidáció követ, a szagok és az illékony szerves vegyületek ártalmatlanítása érdekében. [5, 9, 10]

A közvetlen szárítási rendszerek jelentősen eltérnek a nedves és a szárított bioszilárd anyagok feldolgozásához használt berendezés típusától. Még az 1. ábrán látható rotációs dobrendszerek is jelentősen eltérnek az általános elrendezéstől és a használt felszereléstől. A közvetlen szárítógépek egy másik típusa, amelyet egyre nagyobb mértékben használnak az Egyesült Államokban és Európában, az övszáritó. Ez általában alacsonyabb hőmérsékletű rendszer, mint a forgódobos rendszer. A hőellátás általában tüzelőanyag-égető kemence, de a rotációs dobrendszerrel ellentétben a rendszer hőjét hőfolyadékokra, meleg vízre vagy füstgázra cseréli, levegő-hőcserélőre, ahelyett, hogy a kemence közvetlenül a szárítószekrénybe merülne. [7]

4. A modulrendszerű kialakítás elve

A jelenlegi nemzetközi versennyel jellemzett hajógyártási piacon a siker azon alapul, hogy mind versenyképes árakat, mind rövid szállítási időket kínálnak. Ez ahhoz vezetett, hogy az acélszerkezet, a gépek és a gyártási folyamat optimalizálása tekintetében a költségek csökkentésére összpontosítottak. Mivel azonban az acélszerkezet-gyártás és az összeszerelési technikák továbbfejlesztésének lehetőségei egyre csökkennek, a hajógyártóipar más lehetőségeket is feltárt az átfutási idő és a költségek csökkentése érdekében. A közelmúltban a modularizáció egyre népszerűbb módszer a gyártási költségek csökkentésére. [11]

A modularitás olyan megközelítés, amely a rendszert kisebb részekre, más néven modulokra osztja fel, amelyeket önállóan lehet létrehozni és összeszerelni a végtermék létrehozásához. A moduláris gyártást széles körben használják az autóiparban, a repülőgépiparban és más iparágakban, többször bizonyítva, hogy időt és pénzt takarítanak meg ezzel a módszerrel. [11] A moduláris gyártás jellegzetes jellemzői, mint például a szerelősorok használata, a magas szintű előre-gyártás és a kiszervezés lehetővé teszik a minőség jelentős javítását, miközben csökkentik a költségeket és a gyártási átfutási időt. A mi esetünkben a modularitást azt jelenti, hogy az általunk tervezett és elkészített berendezés elfér 2 darab konténerben (2. ábra). A **Vázszerkezet I.** megnevezésű alsó egység egy növelt magasságú 20' HC konténer (H:6060 × SZ:2440 × M:2900 mm), míg a felső, **Vázszerkezet II.** egység egy normál magasságú 20'DC (H:6060 × SZ:2440 × M:2600 mm)

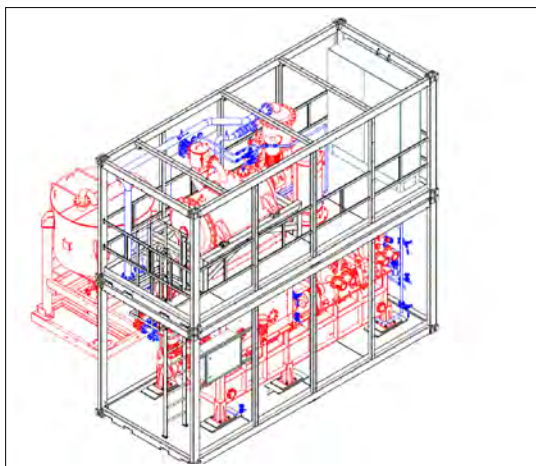
tengeri konténer méreteivel egyezik meg. Az egységek emelését a gyárral azonos kialakításúra tervezett és kivitelezett sarokelemeken keresztül lehet elvégezni.

5. A szárítóberendezés megvalósítási folyamata

A berendezésünk egy, több részegységből összeállított szárít berendezés, melynek van egy ún. előszárító része és van egy ún. főszárító része. Előbbi feladata, hogy a kezelendő anyagot (~80 % nedvességtartalmú) kis rétegvastagságban felhordva előmelegítse, ill. előszárítsa. Utóbbi feladata, hogy az anyagot a kívánt $\leq 20\%$ nedvességtartalomig szárítsa. Az előszárítás (aprítással egybekötött adagolással, fűtött, hengeres dobok felületére felvitt, vékony rétegekben történik, kb. 5,7 m² össz. előszárító felülettel). A főszárítás (a fűtött vázban, két párhuzamos tengelyű, fűtött duplafalú egyedi levelezésű csigával történik, kb. 25 m² össz. főszárító fűtött felülettel). A berendezés kapacitása 800–1000 kg/h, maximális energiáigénye 110 kW/h. A korábbi hajós tapasztalatok szerinti ún. „ragacsos fázist” úgy lekezelve, hogy a szerkezeti kialakításnak köszönhetően az összecsomósodó anyagot folyamatosan nyírva, aprózza is azt, miközben szállítja is.

A vázszerkezeti elemek szállítása külön-külön történik, az ehhez szükséges szét-, ill. összeszerelő gépészeti és elektromos munkálatok elvégzésével. Függőleges irányban a felső vázszerkezet teljes tömegével ráterhelődik az alsóra, egyéb rögzítő kapcsolat (pl. csavarkötés) nem került kialakításra. Szárazföldi helyszínen történő beüzemeléskor ez elegendő, hajón történő elhelyezéskor további rögzítőelemek alkalmazása indokolt lehet. Mindkét vázszerkezeti részegységhez legyártásra kerültek szendvicspaneles betétekkel ellátott, oldalfali és tetőkeretelemek, melyek csavarkötésekkel szerelhetők és saját kis emelőfülekkel ellátottak, a mozgásuk megkönnyítésére.

A szendvicspaneles betétek egyrészt a szállításkori állagmegóvást biztosítják. A felső vázszerkezeti konténer teljes egészében bepanelizálható az üzemi működés alatt is, ha a belső üzemi hőmérséklet ezt lehetővé teszi. Az alsó konténer esetében a hosszú oldali oldalfalpanelek (minimum az egyik oldalon) és a távolabbi, rövid oldali panelek leszerelése üzem közben indokolt. Kültéri elhelyezés esetére (ha esetlegesen szükség van rá) az egyik hosszú oldalra az alábbi kép szerinti esővéto lemezek kerültek megtervezésre a vázszerkezetekhez. Az alsó konténernek a 3. ábra szerinti



2. ábra. A vázszerkezet elvi ábrája



3. ábra. A személybejáró keretelem

rövidebb oldalán személybejáró ajtós keretelem került alkalmazásra. Ezen keresztül felszerelt panelek esetén is biztosított a vázszerkezetbe történő bejutás. A felső Vázszerkezet II. egységbe az ajtón belül elhelyezett feljárólétra használatával lehet feljutni.

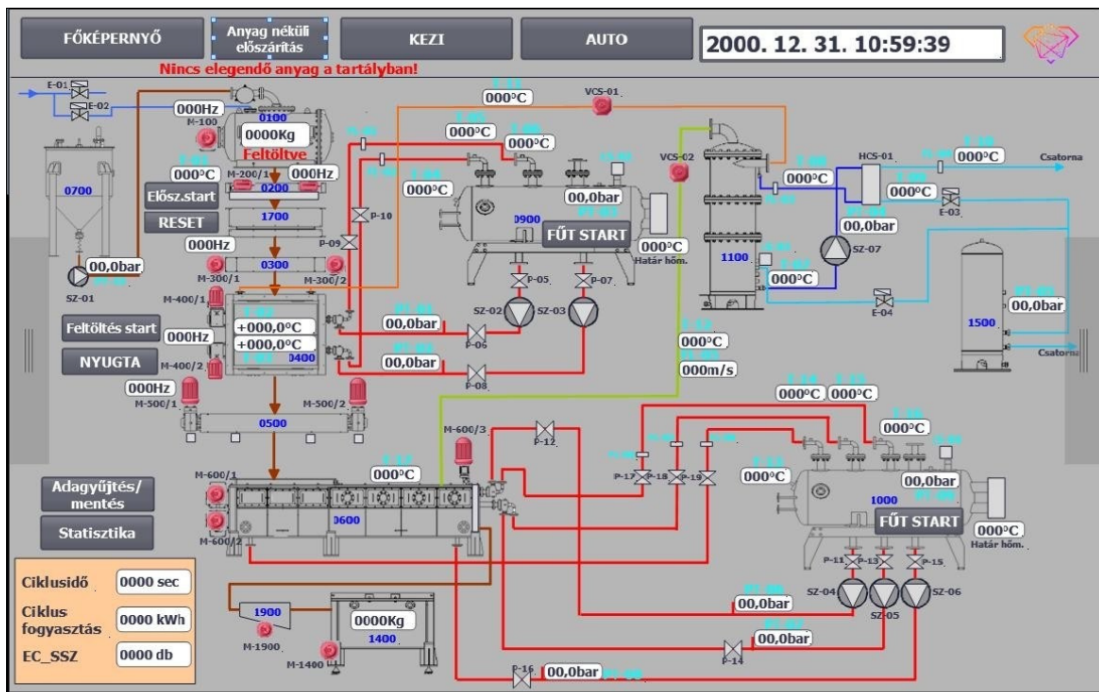
Először az előszárítót terveztük tesztelni, ezért az ehhez kapcsolódó részegységek legyártása kezdődött a konténer-vázszerkezetekkel párhuzamo-

san. Ezek voltak: a siló, a tartály egyedi keverővel, az aprító-adagoló, a töltő-előkészítő, az előszárító dob, a késes anyagleválasztó és az olajtartályok. Közben zajlott a vezérlés, valamint a gyenge- és erősáramú rendszerek tervezése. Az előszárító egység tesztjei már a kiépített villamos és vezérlőrendszer működtetése mellett történtek (4. ábra).

Amikor a fenti részegységek elkészültek, be is lettek építve a konténerekbe. Így pl. a két olajtartály is, aminek az volt az érdekessége, hogy a végleges elrendezésben ezek a főszárító reaktor egység tetején egy lemeztartón helyezkednek el.

Minden úgy lett megtervezve, hogy az előszárító tesztet követően az egyes részegységek megemelése mellett a szárító „becsúszatható” legyen a helyére. Az előszárító tesztek és az ahhoz szükséges egységek beszerelhetőségét pedig úgy biztosítottuk, hogy a főszárítóról készült egy „modla”, amely tartotta a főszárítóra tervezett elemeket. Az előszárító tesztekkel párhuzamosan zajlott a főszárító gyártása, ahol több nehézséggel is szembe kellett nézni:

- mivel mindkét csigát belülről fűthetőre terveztük, a csigalevelek gyártásánál a hegesztés okozta deformációt minimálisra kellett szorítani
- a két csiga egyirányú forgásából adódóan további illesztési kihívásokkal álltunk szembe



4. ábra. A vezérlőrendszer elvi ábrája (részlet)

–első nekifutásra rajz szerint készült el mindkét csiga, de azzal szembesültünk, hogy nem „fordulnak el egymásban”, ezért az egyik csigát újra kellett gyártani, a másik, rajz szerint készült párjához igazítva

–a csigákat forgató hajtóművek együtt forgását finomra kellett hangolni a vezérlésükkel együtt, mely csak sokadik nekifutásra sikerült.

Ezen problémák megoldása után, a gyártást a gépészeti összeszerelési fázis követte, amit a váz-szerkezetegységbe történő telepítésként valósítottunk meg, az optimális helykihasználás biztosítása érdekében. Közben folytatódott a berendezés tesztelése, megtörtént az üzembe helyezés, az engedélyeztetési folyamat elindítása, valamint a használati mintaalatom megszerzésére irányuló dokumentáció elkészítése. A tesztelési lépésekről tesztelési protokollumok (feljegyzések/jegyzőkönyvek) készültek, melyekben pontosan meghatározásra kerültek az elvégzendő és lepróbálandó funkcióteszt, gépészeti, mechanikus és elektromos működési próbák is. A tesztek jó eredménnyel zárultak, a berendezés beszerelésre került, működése azóta is kifogástalan. Az összeállított berendezés az 5. ábrán látható.

6. Összefoglalás

A szárítás folyamata általában a szennyvíz maradék szilárd anyagaiból származó víz elpárologtatására szolgál. A szárítórendszer a szárítón kívül általában anyagmozgató és -tároló berendezésekből, hőtermelő és hő adó berendezésekből, légmozgató és elosztóberendezésekből, kibocsátáscsökkentő berendezésekből és kiegészítő rendszerekből áll. Ezek a berendezésrendszerek sokféle formát ölthetnek, az egyik az általunk tervezett és kivitelezett szárítóberendezés, amely az Oasis of the Seas hajón üzemel. A berendezésünk egy több részegységből összeállított szárítóberendezés, melynek van egy ún. előszárító része, és van egy ún. főszárító része. Előbbi feladata, hogy a kezelendő anyagot (~ 80 % nedvességtartalmú) kis rétegvastagságban felhordva előmelegítse, ill. előszárítsa. Utóbbi feladata, hogy az anyagot a kívánt ~20% nedvességtartalomig szárítsa. „A 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00320 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2019-1.1.1-PIACI-KFI pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Kaszáné Kiss M.: *Hulladékgazdálkodás*. Debreceni Egyetem, 2003.



5. ábra. Az összeállított berendezés

- [2] Szira Z. : *A települési szilárd hulladék keletkezésének összefüggés-vizsgálata, valamint az önkormányzatok által biztosított hulladékkezelési közszolgáltatások elemzése Pest megyében*. PhD-értekezés. Gödöllő: Szent István Egyetem, 2010.
- [3] C.L. Hii, S.V. Jangam, S.P. Ong, A.S. Mujumdar: *Solar Drying: Fundamentals. Applications and Innovations*, 2012.
- [4] Yuan J, Zhang D, Li Y. , et al.: *Effects of Adding Bulking Agents on IO-stabilization and Drying of Municipal Solid Waste*. Waste Manage., 62. (2017) 52–60.
- [5] Water Environment Federation. Residuals and Biosolids Committee Bioenergy Technology Subcommittee. Fact Sheet: Drying of wastewater solids. January 2014. [Internet]
- [6] Dhaundiyal A., Toth L. : *Thermo-Economic Assessment of a Bench-Scale Pyrolysis Unit through a Process Simulator*. Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr, 17. (2023) 1681–1697.
- [7] Virág S., Montvajszki M., Korzenszky: *Termikus hulladékkezelési eljárások*. Szarvas, 2015. TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0015 projekt: Alapkutatás fejlesztés a Szent István Egyetem Pirolyziz Technológia Központjában.
- [8] <https://www.limehungary.hu/dobszaritok/>
- [9] Lányi K., Molnár E., Vanó I., Korzenszky P.: *Looking Behind The Process of Pyrolysis in Waste Management: Questions on The Composition and Quality of End-Product and Their Answers by Means of Analytical Chemistry*. Hungarian Agricultural Engineering (2014) 25–28.
- [10] Korzenszky P., Lányi K., Simándi P.: *Test Results of a Pyrolysis Pilot Plant in Hungary*. Hungarian Agricultural Engineering, 28. (2015) 48–52.
- [11] Eskildsen K.: *Modularization*. Aalborg University Copenhagen, 2011.



VÍZITORMA MINT GYÓGYNÖVÉNY TERMESZTÉSE HIDROPÓNIÁS RENDSZERBEN

WATERCRESS AS A MEDICINAL HERB GROWN IN A HYDROPONIC SYSTEM

Kiss Virág,¹ Izbékiné Szabolcsik Andrea,² Bellér Gábor³

¹ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Környezetmérnöki Tanszék. viraglps00@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Környezetmérnöki Tanszék. szabolcsikandi@eng.unideb.hu

³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Környezetmérnöki Tanszék. beller.gabor@eng.unideb.hu

Abstract

In this research, synthetic bathing water was created treated by coagulation and mechanical filtration. The waters were qualified before and after treatment, so that the effectiveness of the treatment could be calculated. The greywater produced during the treatment was circulated in a hydroponic tower next to a tapwater control tower. The watercress grown was analyzed in the towers and their results were compared. The results show that the greywater treatment was effective and the watercresses were comfortable in the synthetic bathing water tower without nutrient solution. They grew larger than their counterparts grown in tapwater, and their average moisture content was also higher. Additionally, the spectrophotometric determination of indole-3-carbinol content was investigated in the plants. However, the obtained spectra were noisy, and the absorbance values were too small for reliable evaluation. Our further aim is to improve the determination of active ingredient using other methods (e.g. solid phase extraction).

Keywords: *greywater, watercress, hydropony, indole-3-carbinol.*

Összefoglalás

Kutatásunk során létrehoztunk egy szintetikus fürdővizet, amelyet koagulációs eljárással és mechanikai szűréssel kezeltünk. Kezelés előtt és után is minősítettük a vizeket, ezáltal lehetőség nyílt a kezelés hatékonyságának számítására. A kezelés során keletkezett szürkevizet keringettük a hidropóniás toronyban, egy ivóvízes kontrolltorony mellett. Elemeztük a toronyokban nevelkedett vízitormákat, és összehasonlítottuk az eredményeiket. Az eredmények alapján elmondható, hogy a szürkevíz kezelése hatékony volt, és hogy a vízitormák jól érezték magukat a tápoldat nélküli, kezelt, szintetikus fürdővízalapú toronyban. Nagyobbra nőttek, mint az ivóvízen nevelt társaik, illetve az átlagos nedvességtartalmuk is magasabb volt. Továbbá, a növények indol-3-karbinol-hatóanyagtartalmának spektrofotometriás meghatározását is megvizsgáltuk, azonban a kapott spektrumok zajosak, és az abszorbanciák pedig túl kicsik a megbízható kiértékeléshez. Folytatásként a hatóanyag-meghatározást tovább szeretnénk fejleszteni más módszerek (pl. szilárd fázisú extrakció) alkalmazásával.

Kulcsszavak: *szürkevíz, vízitorma, hidropónia, indol-3-karbinol.*

1. Bevezetés

Napjainkban a háztartásban keletkező szürkevizek kezelése és újbóli alkalmazása egyre szélesebb körben merül fel, mivel a víz korlátozott erőforrás. A szürkevíz újbóli alkalmazása lehető-

vé teszi a háztartási vízfelhasználás csökkenését, ami hozzájárul a vízfogyasztás mérsékléséhez, ezért is szeretnénk felhívni a figyelmet a háztartásokban keletkező szürkevizek újbóli alkalmazásának fontosságára. Emellett alapvető jelentő-

ségünk tartjuk az egészségünk megővését, amihez a gyógynövények fogyasztása nagymértékben hozzájárul. A vízitorma egy rendkívül tápláló növény, amely számos jótékony hatással van az emberi szervezetre, illetve az indol-3-karbinol is megtalálható benne, amelynek daganatmegelőző hatást tulajdonítanak. Megfelelő eredmények esetén a vízitorma hidropóniás tornyokban történő termesztésével fenntarthatóbbá tehető a gyógyszer-, valamint az élelmiszeripar gyógynövényellátása.

2. Alternatív vízforrás: a szürkevíz

A háztartásokban két szennyvíztípust különböztetünk meg minőségi szempontok alapján. Ezek a feketevíz, illetve a szürkevíz. A feketevíz a szennyvíz szennyezettebb frakciója, amely a toalették öblítése során keletkezik, ennek köszönhetően olyan szennyeződések tartalmaz, amelyek komoly egészségügyi kockázattal járnak. A szürkevíz (greywater, GW) a szennyvíz egy kevésbé szennyezett frakciója, amely nem tartalmazza a WC-öblítés során keletkező feketevizet. Ide soroljuk a fürdőszobai tevékenységek, a mosogatás és a mosás során keletkező, használt vizeket. A szürkevíz szennyezettsége alapján további frakciókra bontható: világos és sötét szürkevízre. Több vízfelhasználási tevékenységhez, például a gyógynövények öntözéséhez is szükséges a szürkevíz kezelése, mivel ellenkező esetben a növények a nem kívánatos szennyező anyagokat is felvennék, és ezzel együtt bekerülnének a táplálékláncba is. Kutatásunk során az általunk létrehozott ivóvízalapú, szintetikus fürdővizet koagulációs/flokkulációs kémiai eljárással és homokon való mechanikai szűréssel kezeltük [1, 2].

3. Vízitorma hidropóniás termesztése

A vízitorma (*Nasturtium officinale*) a keresztesvirágúak családjába (Brassicaceae) tartozó, rendkívül tápláló növény, amely számos jótékony hatással van az emberi szervezetre. Tele van vitaminnal és ásványi anyagokkal, például C-vitaminnal, A-vitaminnal, K-vitaminnal, valamint folsavval, kalciummal és vassal. Emellett antioxidánsokkal (például béta-karotinnal, luteinnel és kvercetinrel) is rendelkezik. Glükoszinolát nevű vegyületekben is gazdag, amelyből a növényi sejtek roncsolásakor (például aprítás vagy rágás során) indol-3-karbinol keletkezik [3].

A vízitorma kezelt, szürkevízalapú hidropóniás rendszerben történő termesztésével fenntarthatóbbá tudjuk tenni a gyógyszer-, valamint

a gyógynövényellátást az élelmiszeripar számára. Mivel 7,5 m²-nyi területen akár 600 növényt termeszthetünk a hagyományos módszerekhez képest akár háromszor gyorsabban és 30%-kal hatékonyabban, illetve a rendszerben keringő víz újrahasznosításával és többszöri felhasználásával elérhetjük, hogy akár 90%-kal kevesebb vízre legyen szükségünk, mint a hagyományos szabadföldi termesztés esetében [4].

4. Anyag és módszer

A Környezetmérnöki Tanszék korábbi kutatási eredményeire támaszkodva [2] létrehoztunk egy ivóvízalapú szintetikus fürdővizet, majd ezen szürkevízfrakció kezelését végeztük el vas(III)-kloriddal történő koagulációs eljárással (1. ábra) és homokon történő mechanikai szűréssel.

A kezelés során keletkezett szürkevizet hidropónikus toronyban keringtettük, amelyet kezelés előtt és után is minősítettünk, ezáltal számítottuk a kezelés hatékonyságát. Emellett egy ivóvízes kontrolltornyot is üzemeltettünk a jobb összehasonlítás végett. A tornyokba bekerülő, illetve kikerülő öntözővizeket is minősítettük, hogy nyomon kövessük a vizek minőségében bekövetkező változásokat. A vízminősítési paraméterek közül vizsgáltuk a pH-értéket, a fajlagos vezetőképességet (EC), a zéta-potenciált (ZP), a zavarosságot (TURB), a biológiai oxigénigényt (BOI5), a kémiai oxigénigényt (KOI), és az összes szerves széntartalmat (TOC).

A pH méréséhez SenTix 41 kombinált pH-mérő elektródot, a fajlagos elektromos vezetőképességhez (EC), és a zéta-potenciálhoz (ZP) Zetasizer Nano Z készüléket, a zavarossághoz (TURB) Turb 555-IR-típusú zavarosságmérő nefelométert, a



1. ábra. Koagulációs-flokkulációs kémiai kezelés

biológiai oxigénigény (BOI₅) mérésére OxiTop IS 12-típusú berendezéseket, a kémiai oxigénigény (KOI) esetén NANOCOLOR Linus spektrofotométert és a teljes szerves széntartalom (TOC) mérésére Shimadzu TOC-VCPN-típusú készüléket használtunk. A növényeket 12 napig előneveltük, és a közetgyapot kockákkal együtt hidrokosarakban elhelyezve tettük bele a Green Drops Farm Kft. által forgalmazott Rotower hidropóniás tornyokba, amely a **2. ábrán** látható.

A vízitormák a hidropónikus rendszerben 20 napot töltöttek. Mindennap megmértük a pH- és EC-paramétereket, mindkét toronyban. A különböző növényeknek más az ideális pH-igénye, az optimális tartomány azonban 6,5–7,5 között változik. Az optimális szint fenntartását 24,5%-os foszforsav adagolásával értük el. Az elpárolgó vagy a növények által elhasznált vizeket 3 naponta pótoltuk (az ivóvizet a vezetékes vízhálózathoz vettük, a kezelt szűrkevizet pedig előre elkészítettük és kezeltük, majd hűtőszekrényben tároltuk). A vízitorma elemzése során mindkét toronyban lévő bokroknak megmértük az átlagos növényhosszát, a maximális gyökérhosszát, és a nedvességtartalmukat is meghatároztuk, illetve az átlagos klorofill-a, klorofill-b és az összkarotinoidok koncentrációját is megmértük Nanocolor Vis spektrofotométerrel. A vízitormában lévő indol-3-karbinol (I3C) hatóanyag koncentrációját UV/VIS-spektrometriás módszerrel terveztük meghatározni. A méréseink során Agilent Cary 60 fotométerrel vizsgáltuk az I3C koncentrációját, oldószerként pedig etil-acetátot, illetve ultratiszta vizet alkalmaztunk.



2. ábra. Vízitorma a hidropóniás rendszerben

5. Eredmények és következtetések

Ebben a fejezetben ismertetjük a víz- és a növényminősítési, illetve az I3C-hatóanyag-meghatározás vizsgálatának az eredményeit az értékelésükkel együtt.

5.1. Víztisztítási paraméterek

Kutatásunk során szintetikus fürdővizet négy alkalommal készítettünk, majd kezeltünk. A kezeletlen szűrkevizet a kezeléshatékonyság meghatározása miatt minősítettük. Amellett, hogy az ivóvizet öntözővízként használtuk az egyik hidropóniás toronyban, a szintetikus szűrkeviznek is az az alapja, ezért minden alkalommal ivóvízmintát is vettünk és minősítettünk, a kezeletlen és a kezelt szűrkevízzel együtt. Átlagolva mutatjuk be a víztípusok paramétereit, szórásokkal kiegészítve, táblázatok segítségével.

Az **1. táblázat**ban megfigyelhető, hogy az ivóviznek a legkisebb az átlagos pH-ja ($7,67 \pm 0,1$), ami alapvetően nagyobb az ivóvíz jellemzően semleges (7) értékénél. Ez azt jelenti, hogy lúgosabb hatású a csapvíz, amelyet használtunk a kutatásunk során. A szűrkevíz kezelése kapcsán a zavarosság- (TURB), a BOI₅, és a KOI-eredményeket a víz újrafelhasználására vonatkozó minimumkövetelményekről szóló Európai Parlament és a Tanács (EU) 2020/741 rendelete [5], illetve a települési szennyvíz kezeléséről szóló (91/271/EGK) irányelve [6] alapján értékeltük. A TURB mérése fontos a szűrkevíz kezelése során, mivel a magas zavarosságú víz befolyásolja a szűrési és fertőtlenítési folyamatokat, valamint csökkenti a víz esztétikai minőségét. Az EU 2020/741 irányelv alapján [5] a TURB nem haladhatja meg az 5 NTU-értéket. A kezelt szűrkeviznek a TURB-értéke átlagosan $0,82 \pm 0,78$ NTU volt, ami nem éri el az EU 2020/741 rendelet határértékét a zavarosságra vonatkozóan. A szűrkevízkezelés célja, hogy mi-

1. táblázat. Összesítő táblázat a víztípusok eredményeiről

Paraméter	Mértékegység	Ivóvíz	Kezeletlen szűrkevíz	Kezelt szűrkevíz
pH	-	$7,67 \pm 0,1$	$8,18 \pm 0,1$	$8,06 \pm 0,1$
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$7,67 \pm 38$	917 ± 23	851 ± 203
ZP	mV	-	$-32,57 \pm 1,70$	$-11,47 \pm 2,26$
TURB	NTU	$0,29 \pm 0,06$	$43,3 \pm 6,1$	$0,82 \pm 0,78$
BOI ₅	mg/l	$1,38 \pm 0,52$	137 ± 61	$4,13 \pm 3,64$
KOI	mg/l	$8,83 \pm 0,72$	515 ± 170	$14,1 \pm 4,5$
TOC	mg/l	$2,74 \pm 0,27$	$57,7 \pm 5,4$	$3,86 \pm 0,94$

nimalizálja a szerves anyagok mennyiségét. Az EU 2020/741 direktíva [5] szerint mezőgazdasági öntözés esetében a BOI_5 megengedett értéke ≤ 10 mg/l. Az általunk kezelt szűrkevíz átlagos BOI_5 -értéke $4,13 \pm 3,64$ mg/l volt, így ezt a határértéket se lépte túl. A szűrkevíz kezelésében a KOI-szint csökkentése kulcsfontosságú. A 91/271/EGK-irányelv [6] alapján a KOI határértéke 125 mg/l. A kutatás során kezelt szintetikus fürdővíz átlagértéke $14,1 \pm 4,5$ mg/l volt, így ennek az elvárásnak is eleget tudtunk tenni az alkalmazott kezelés révén. Összességében elmondható, hogy mind a TURB-, BOI_5 -, és a KOI-határértékeknek megfelelt az általunk kezelt szűrkevíz, illetve az ivóvíz értékeihez képest szignifikáns eltérés nem állapítható meg, ezáltal a kezelési eljárás hatékonynak mondható. Összehasonlítva a kezeletlen és a kezelt szintetikus fürdővíz paramétereit, kezelési hatékonyságot is tudtunk számolni, amit a 2. táblázat mutat.

A kezelési hatékonyság eredményei alapján elmondható, hogy a szennyezőanyagok mennyiségét a kezelési eljárás csökkentette. A szűrkevíz kezelésének a célja, hogy főleg a TURB-, BOI_5 -, KOI- és TOC-értékeket csökkentsük, ami sikerült, mivel ezeknek a paramétereknek a kezelési hatékonysága több mint 90%.

5.2. Az öntözővizek elemzése a hidropóniás torony előtt és után

A hidropóniás toronyba bekerülő, kezelt szintetikus fürdővizet és ivóvizet (amelyet kontrollként használtunk) minősítettük. A kísérleti idő letele után újból megmértük a toronyok vizeinek a vízminősítési paramétereit, így nyomon követhettük a víz minőségében bekövetkező változásokat. Mivel vízpótlás több alkalommal is történt, így a bekerülő vizek átlagát vettük alapul.

A 3. táblázatban megfigyelhető, hogy az ivóvíznél a pH csökkent, ami a foszforsav hozzáadagolásával magyarázható (amelyet a megfelelő pH fenntartása miatt adagoltunk). Kisebb mennyiségben adagoltuk a foszforsavat, aminek következtében nem esett le drasztikusan a pH, így többször kellett használnunk az optimális pH-szint fenntartása érdekében. A TURB-érték is csökkent, de a BOI_5 , a KOI és az TOC nőtt, ami a növények tevékenysége miatt következett be.

A 4. táblázat pedig azt szemlélteti, hogy a kezelt szűrkevíz pH- és ZP-értéke is csökkent, ami szintén a foszforsav hozzáadagolásának köszönhető. A kísérlet elején több foszforsavat adtunk hozzá, mint az ivóvízhez, aminek az lett az eredménye, hogy a kísérlet elejétől kezdve jóval kisebb volt a pH, mint az ivóvízes toronynak. A kisebb pH be-

2. táblázat. A vízminősítési paraméterek kezelési hatékonysága

Paraméter	Mértékegység	Kezelési hatékonyság (%)
pH	-	csökkent
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	7,27
ZP	mV	64,78
TURB	NTU	98,11
BOI_5	mg/l	96,97
KOI	mg/l	97,27
TOC	mg/l	93,31

3. táblázat. Az ivóvíz paraméterei a hidropóniás torony előtt és után

Paraméter	Mértékegység	Ivóvíz		Változás
		Előtte	Utána	
pH	-	$7,67 \pm 0,11$	$6,82 \pm 0,01$	csökkent
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	767 ± 38	580 ± 11	24,49%-kal csökkent
TURB	NTU	$0,29 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,03$	58,62%-kal csökkent
BOI_5	mg/l	$1,38 \pm 0,52$	4 ± 0	189,85%-kal nőtt
KOI	mg/l	$8,83 \pm 0,72$	22 ± 0	149%-kal nőtt
TOC	mg/l	$2,74 \pm 0,27$	$18,03 \pm 0,02$	558%-kal nőtt

4. táblázat. Az kezelt szűrkevíz paraméterei a hidropóniás torony előtt és után

Paraméter	Mértékegység	Ivóvíz		Változás
		Előtte	Utána	
pH	-	$8,06 \pm 0,05$	$6,71 \pm 0,01$	csökkent
EC	$\mu\text{S}/\text{cm}$	851 ± 203	1225 ± 34	44,03%-kal nőtt
ZP	mV	$-11,47 \pm 2,26$	$-5,43 \pm 2,64$	52,66%-kal csökkent
TURB	NTU	$0,82 \pm 0,78$	$0,15 \pm 0,03$	81,71%-kal csökkent
BOI_5	mg/l	$4,13 \pm 3,64$	$4,50 \pm 0,71$	8,96%-kal nőtt
KOI	mg/l	14 ± 4	17 ± 1	20,74%-kal nőtt
TOC	mg/l	$3,86 \pm 0,94$	$6,50 \pm 0,06$	40,62%-kal nőtt

folyásolja a fajlagos vezetőképességet, illetve a növények tápanyagfelvételét is. Az EC megnőtt, ami vagy a pH-változásnak köszönhető, vagy az esetleges szerves vagy szervetlen anyagok felhalmozódásának, amelyeket a növények nem vettek

fel. A TURB-érték itt is csökkent, illetve a BOI_5 , a KOI és a TOC is nőtt, ami szintén a növények tevékenysége miatt következett be. Ezekből arra következtethetünk, hogy a növények nem vették fel a szintetikus fürdővíz esetleges maradék szerves- és szervetlenanyag-tartalmát. Összességében elmondható, hogy az ivóvíz szervesanyag-tartalma (BOI_5 , KOI és TOC) a kísérlet végére jobban megnőtt, mint a kezelt szűrkevízé. Viszont a kezelt szintetikus fürdővíz zavarossága jobban csökkent, mint az ivóvízé.

5.3. Vízitormák elemzése

A hidroponikus növénytermesztés során összesen 20-20 vízitormát elemeztünk, tornyokként. A vízitormák elemzése során mindkét toronyban lévő bokrok esetében megmértük az átlagos növényhosszt 3 párhuzamos mérésével, illetve a maximális gyökérhosszt mérőszalag segítségével. A kapott eredményekből átlagot vontunk külön az ivóvízes, illetve a kezelt szűrkevízes toronyokban növekedett növények paramétereiből.

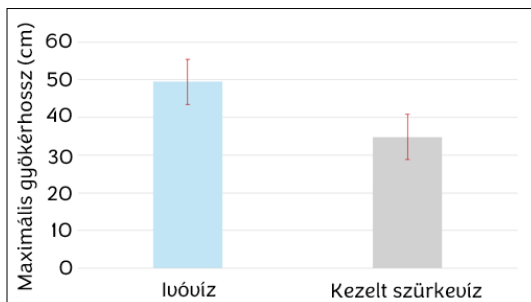
Az ivóvízes toronyban nevelt vízitormák átlagos maximális gyökérhossza 49 ± 7 cm, a kezelt szűrkevízes toronyban neveltéké pedig 35 ± 8 cm, amit az **3. ábra** szemléltet. A maximális gyökérhossz kapcsán kb. 14 cm különbség van, és az ivóvízen nevelt növények gyökere a hosszabb.

Átlagos növényhosszt tekintve az ivóvízes növényeké 19 ± 3 cm, a kezelt szűrkevízes növényeké 19 ± 6 cm, amelyet a **4. ábra** szemléltet. Összességében elmondható, hogy a növényhosszakat elnézve, nincs szignifikáns különbség.

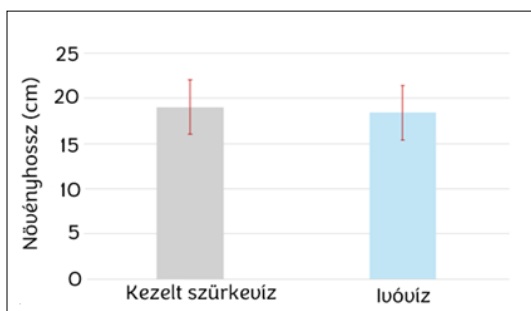
Lemértük a vízitormáknak a nedves és száraz biomasszatömegét, amelyekből meghatároztuk az átlagos nedvességtartalmukat, (**5. ábra**).

Átlagos nedvességtartalmat tekintve elmondható, hogy nincs nagy különbség az ivóvízen ($90,94 \pm 0,02\%$) és a kezelt szűrkevízen ($93,84 \pm 0,01\%$) nevelt növények között, de a kezelt, szintetikus vizes toronyban lévő vízitormák átlagos nedvességtartalma nagyobb. Méréseink azonban alátámasztották azokat a szakirodalmi állításokat [7], amelyek a vízitormák magas nedvességtartalmáról írnak.

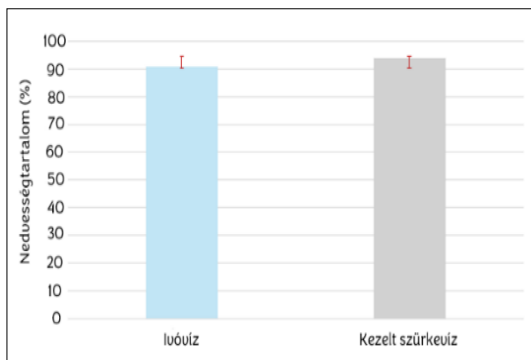
A klorofill-a, klorofill-b, és az összkarotinoidok koncentrációjának meghatározása során először a növényekből pigmentkivonatot készítettünk, amit majd meghatározottunk spektrofotometrián. A kapott eredményekből pedig kiszámítottuk a klorofill-a, klorofill-b és a karotinoidok koncentrációját, amelyeket átlagoltunk. A **6. ábrán** látható az ivóvízen nevelt, míg a **7. ábrán** a kezelt szűrkevízen nevelt vízitormák átlageredményei.



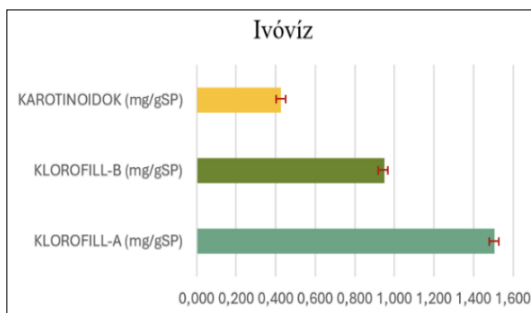
3. ábra. A vízitormák átlagos maximális gyökérhosszának összehasonlítása



4. ábra. A vízitormák átlagos növényhosszának összehasonlítása



5. ábra. A vízitormák átlagos nedvességtartalma



6. ábra. Az ivóvízen nevelt vízitormák klorofill-a, klorofill-b- és a karotinoidok átlagkoncentrációja

Az ivóvízen nevelt vízitormák átlagos klorofill-a-koncentrációja $1,50 \pm 0,25$ mg/gSP, klorofill-b-koncentrációja $0,95 \pm 0,20$ mg/gSP, és a karotinoidok koncentrációja $0,43 \pm 0,08$ mg/gSP.

A kezelt szűrkevízen nevelt növények átlagklorofill-a-koncentrációja pedig $1,18 \pm 0,20$ mg/gSP, klorofill-b-koncentrációja $0,71 \pm 0,12$ mg/gSP és a karotinoidok koncentrációja $0,32 \pm 0,60$ mg/gSP. Összehasonlítva elmondható, hogy az ivóvízes hidropóniás toronyban lévő vízitormáknak kissé nagyobb átlagkoncentrációjuk van az adott pigmentekből a kezelt szűrkevízes toronyhoz képest.

5.4. Az I3C-hatóanyag-meghatározás vizsgálatának eredményei

Előkísérletként először az etil-acetát vizes oldatbeli spektrumát határoztuk meg. A tiszta etil-acetát elnyelése túl intenzív volt, ezért vizes oldatait vizsgáltuk. A kísérlet sor segítségével meghatároztuk az etil-acetát moláris abszorbanciáit (ϵ) vizes közegben, 190–290 nm-es hullámhossztartományban, amit a 8. ábra szemléltet.

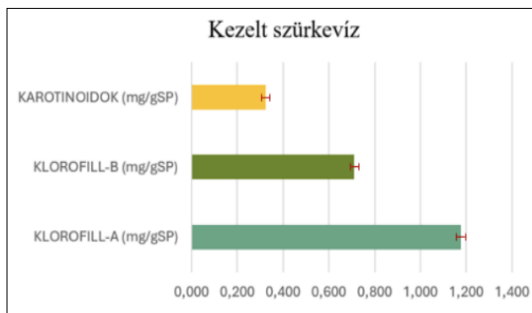
Az etil-acetát elnyelési maximuma 200 nm és 210 nm között van, nagyobb hullámhosszokon kicsi az elnyelése.

Az I3C moláris spektrumának megállapításához I3C szilárd vegyszert alkalmaztunk. A kalibrációs elkészítéséhez a szilárd I3C-t etil-acetátban oldottuk, majd hígítottuk ultratiszta vízzel. A 9. ábrán látható a 225–300 nm-es hullámhossztartományban mért I3C moláris spektruma.

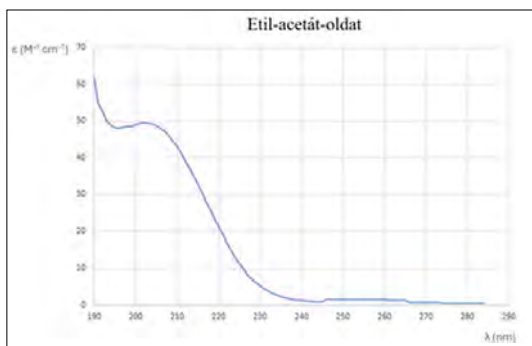
A kalibrációs alapján megállapítható, hogy az I3C elnyelési maximuma 250 nm és 300 nm tartományban volt. Ezeken a hullámhosszokon az etil-acetát zavaró hatása elhanyagolható, de szükség esetén korrekcióba is vehető.

A vízitorma-kivonatok I3C-meghatározása során a vízitorma-pépekből kimértünk 0,5; 1; illetve 2 grammot, amelyeket etil-acetáttal extraháltunk, majd ultratiszta vízzel hígítottunk. A reprezentatív spektrumok a 10. ábrán láthatók.

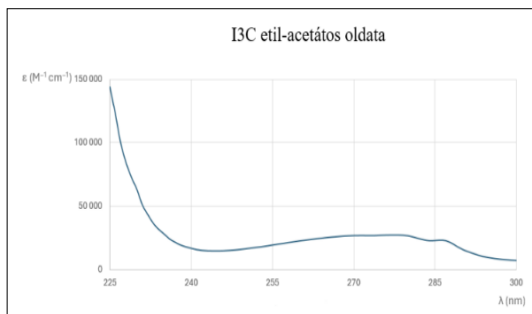
A különböző tömegű vízitorma-pépet tartalmazó kivonatok spektrumai alapján a következő konklúziókat vontuk le: a kivonat küvétába mért térfogatát növelve szisztematikusan nőtt az abszorbancia, de sajnos az I3C finomszerkezete (9. ábra) nehezen kivehető. A mért spektrumok zajosak, az abszorbanciák túl kicsik a megbízható kiértékeléshez. Adiciós módszerrel is próbálkoztunk, azonban ugyanezeket a következtetéseket tudtuk levonni, mint a vízitorma-kivonatok spektrumainál. Az I3C kvantitatív meghatározására tett kísérleteket egyrészt a spektrofotometriás módszer továbbfejlesztésével, másrészt



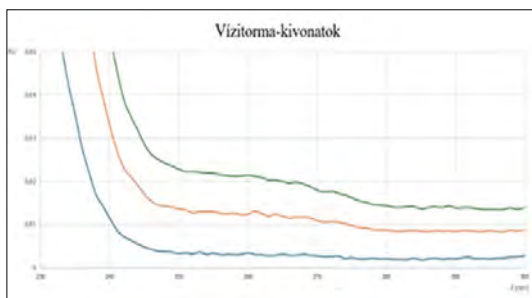
7. ábra. A kezelt szűrkevízen nevelt vízitormák klorofill-a-, klorofill-b- és a karotinoidok átlagkoncentrációja



8. ábra. Az etil-acetát spektruma



9. ábra. Az I3C etil-acetátos oldat spektruma



10. ábra. Az 1 g vízitorma-pépet tartalmazó oldat spektruma

egyéb szóba jöhető technikák bevonásával tervezzük. Előbbi esetén a küvetabeli koncentráció (és így az abszorbancia) növelése egy lehetséges irány, de a mátrixhatás még ezt követően is gondot okozhat. Alternatív módszerként például a folyadékkromatográfia (HPLC) egy kézenfekvő választás. Az elkövetkezendő időszakban az I3C meghatározásának spektrofotometriás módszerét szeretnénk továbbfejleszteni szilárd fázisú extrakcióval (SPE). Fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy ezen adatok a tápoldat nélküli, kezelt, szintetikus szürkevíz felhasználásával jöttek létre a vízitorma hidropóniás rendszerben történő termesztése során.

6. Következtetések

A kutatásunk során a háztartásokban keletkező szürkevíz kezelését és annak újbóli felhasználásának fontosságát vizsgáltuk, különös figyelmet fordítva a vízitorma (*Nasturtium officinale*) hidropóniás termesztésére, amely a szürkevíz újrahasznosításával fenntarthatóbbá teheti a gyógynövényellátást. A szürkevíz a háztartásban keletkező szennyvíztípus, amely nem tartalmazza a feketevizet (WC-öblítésből származó szennyvizet), amelynek megfelelő kezelése kulcsfontosságú, hogy a növények ne vegyenek fel nem kívánt szennyeződések. A kutatás során a szürkevizet koagulációs/flokkulációs kémiai eljárással és mechanikai szűréssel kezeltük, majd hidropóniás rendszerben alkalmaztuk a vízitorma termesztésére. Az ivóvíz és a kezelt szürkevíz minőségi paramétereit folyamatosan mértük, és az eredmények alapján elmondható, hogy a szürkevíz kezelése sikeres volt, mivel megfelelt az Európai Unió által előírt vízminőségi határértékeknek (zavarosság, BOI_5 , KOD) [5, 6]. A vízitormák növekedését és biológiai paramétereit is figyelemmel kísértük. Az ivóvízen és a kezelt szürkevízen nevelt növények között nem volt jelentős különbség a növényhossz, gyökérhossz és nedvességtartalom tekintetében,

bár az ivóvízes növények valamivel nagyobb klorofill-a-, klorofill-b- és karotinoidkoncentrációval rendelkeztek. Az indol-3-karbinol (I3C) hatóanyag koncentrációját UV/VIS-spektrometriás módszerrel terveztük meghatározni. Azonban a mért spektrumok zajosak, és az abszorbanciák túl kicsik a megbízható kiértékeléshez. Összegzésül, a kutatás eredményei azt mutatják, hogy a kezelt szürkevíz hatékonyan alkalmazható a vízitorma termesztésére hidropóniás rendszerekben, ezáltal fenntartható módon csökkentve a vízfogyasztást, miközben nem befolyásolja jelentősen a növényekre jellemző minőségi paramétereket.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Y.-P. V.-A. M. Boyjoo: *A Review of Greywater Characteristic and Treatment Processes*. In: Water Science and Techn., 2013, pp. 67, 1403-1424
- [2] Andrea Szabolcsik-Izbéki: *The Removal of Pollutants from Synthetic Bathroom Greywater by Coagulation-Flocculation and Filtration as a Fit-for-Purpose Method*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12/1. 2024.
- [3] A Green Drops Farm Kft. honlapja: *Vízitorma*. (letöltve: 2025. 02. 16.)
<https://rotower.greendropsfarm.com/hu/gyogynoveny-hidroponias-rendszerben/>
- [4] A Green Drops Farm Kft. honlapja: *Hidropóniás növénytermesztés*. (letöltve: 2025. 02. 16.)
<https://rotower.greendropsfarm.com/hu/blog/>
- [5] E. U. H. Lapja: *Az Európai Parlament És A Tanács (Eu) 2020/741 Rendelete (2020. május 25.) a víz újrafelhasználására vonatkozó minimumkövetelményekről*. (letöltve: 2025. 02. 16.)
<https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/HU/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0741>
- [6] EUR-LEX, A Tanács irányelve (1991. május 21.) a települési szennyvíz kezeléséről (91/271/EGK), 1991. (letöltve: 2025. 02.16.)
<https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/HU/TEXT/?uri=CELEX:31991L0271>
- [7] Ali Esmail Al-Snafi: *A Review on Nasturtium Officinale: A Potential Medicinal Plant*. IOSR Journal of Pharmacy Series. I., 10/9. (2020) 33–43.



INTERDISZCIPLINÁRIS MI-KUTATÁSI MÓDSZERTAN

INTERDISCIPLINARY AI RESEARCH METHODOLOGY

Kolcsár Levente,¹ Bakó László²

¹ Sapiientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Villamosmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, kolcsar.levente@ms.sapiientia.ro

² Sapiientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Villamosmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia, lbako@ms.sapiientia.ro

Abstract

The use of artificial intelligence (AI) in our time is becoming more and more extensive, so it is no question that there is a need for new AI concepts. We have developed our research methodology to accommodate new cognitive science theories, which we present through a concrete example: how Integrated Information Theory (IIT) was born and what it is good for. IIT is one of the main theories of consciousness in cognitive neuroscience and phenomenology. The main pillar of our methodology is the philosophy of science, which puts IIT into context, examines its origin and usability. This serves the purpose of a framework to be able to interpret ideas from the most diverse fields and to rank them according to their engineering applicability, so that we can create new, useful AI toolkits from them.

Keywords: *AI, research, philosophy of science, IIT.*

Összefoglalás

Korunk mesterségesintelligencia- (MI) felhasználása egyre jobban kiterjed, ezért nem kérdés, hogy új MI-konceptiókra igény van. Kutatási módszertanunkat a kognitív tudományokból érkező új elméletek befogadására dolgoztuk ki, amelyet egy konkrét példán keresztül be is mutatunk: hogyan született, és mire jó az integrált-információ-teória (IIT), amely a kognitív idegtudományok és a fenomenológia egyik fő elmélete a tudatról. Módszertanunk alappillére a tudományfilozófiai gondolkodásmód, amely kontextusba helyezi az IIT-t, megvizsgálja annak eredetét és felhasználhatóságát. Módszertanunk azt a célt szolgálja, hogy e keretrendszerrel a legkülönbözőbb területekről érkező ötleteket is képesek legyünk értelmezni és azokat rangsorolni mérnöki felhasználhatóságuk szerint, hogy ezekből új, hasznos MI-eszköztárakat készíthessünk.

Kulcsszavak: *MI, kutatás, tudományfilozófia, IIT.*

1. Bevezetés

A dolgozatunkban tárgyalt tudományfilozófiai módszertannal az MI-kutató a kognitív tudományok területéről érkező teóriákat kontextusba helyezi, és csak utána kezd dolgozni vele. Erre azért van szükség, mert az interdiszciplináris munkához a rendezettség és az egységes értelmezés igényli a jól körülírt keretrendszert. Ezzel a módszerrel a kutató megismeri magát a teóriát, az eredetét, a matematikai leírását és felhasználhatóságát. A módszertan szerkezetét megalkotó három fő tárgyat definiáljuk:

α. A filozófia olyan szisztematikus, nyelvi és gondolati struktúrák együttese, amelyek a világról alkotott elképzeléseinkből állnak. A filozófia fő kérdései: Mi a természet? Mi az eredete? Mi a fundamentuma? Kik vagyunk? Ezek az elképzelések nemcsak a megismerő módszereinkben, hanem a hétköznapi életvitelünkben is megjelennek.

β. A tudomány definíciónk szerint olyan elágazó folyamat, amely a filozófiához hasonlóan a természetet kívánja megismerni, de ezt a megismerést szisztematikus megfigyelésre és kísérletekre alapozza. Ebből következetesen látszik, hogy a két

terület átfedése az új tudományos elméletek megalkotásakor történik, hiszen a legelső fázisban, kísérlet nélkül csak a képzeletére hivatkozhat a kutató. Ebből is látszik, de historikusan is evidens [1], hogy a tudomány a filozófiából ered.

γ. A tudományfilozófia a filozófia azon ága, amely a tudományos gondolkodással és módszerrel foglalkozik. Fő célja: rendezetten irányítani és javítani a tudományos kutatást és módszertant, szem előtt tartva a tudományos gondolkodás problémáit és a humán részrehajlást. Néhány példa, ahol szerintünk fontos: atomfizika, kozmológia, biológia, kognitív tudományok, MI-kutatás, pszichológia, etika, humán tudományok. Néhány példa, ahol szerintünk kevésbé fontos: alkalmazott tudományok, technológiák, ipar és minden olyan terület, ahol a meglévő teóriákat érintetlenül felhasználják.

2. A módszertan szerkezete

Az MI-kutatónak a talált vagy újonnan kitalált teóriát a felsorolt kontextusokban kell elemeznie és dokumentálnia, mindegyik kontextusban külön aspektust vizsgál. A kontextusok a görög betűkkel definiált tárgyakhoz kapcsolódnak (α , β , γ):

- I. Historikus kontextus (α , β)
- II. Matematikai leírás (α , β , γ)
- III. Episztemológiai kontextus (β , γ)
- IV. Ontológiai kontextus (α , β , γ)
- V. Metodológiai kontextus (β , γ)
- VI. Tudományos eredmények (β)
- VII. MI-alkalmazhatóság (β)
- VIII. Axiológiai kontextus (α , γ)

Mindegyik kontextusban 1–5-ig való pontozást kell végezni (1. táblázat), annak függvényében, hogy az adott teória mennyire hangsúlyos abban a kontextusban. Ha egyáltalán nem releváns az adott kontextusra, akkor 1-es értéket kap, ha maximálisan releváns, akkor 5-ös értéket.

1. táblázat. Az IIT módszertani ponttáblája

Kontextus	Pontszám
I.	5
II.	5
III.	3
IV.	1
V.	4
VI.	4
VII.	3
VIII.	4

Például: az IIT-teória az MI-alkalmazhatósági kontextusban 3-as pontszámot kap. Ezt a táblázatot felhasználhatjuk arra, hogy eldöntsük, melyik teóriával érdemes nagyobb prioritással foglalkozni. A kutatónak a dokumentációban hivatkozni kell a megjelölt forrásokra, hogy a későbbi cikkírásnál már felhasználható legyen.

A módszertan végén feljegyezzük a teória általános tulajdonságait, és végzünk egy súlyozott, összesített pontozást, majd %-ban kifejezzük a teória MI-alkalmazhatóságát.

3. Módszertani példa

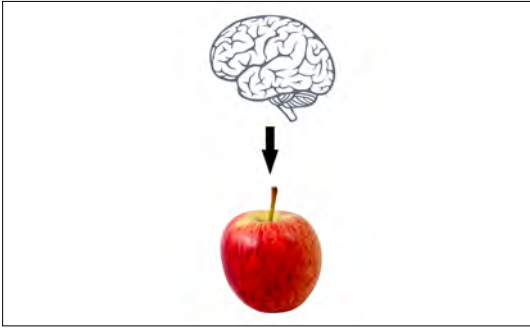
Egy olyan reprezentatív teóriát választottunk példaként, amely értelemszerűen műszaki területeken kívüli tudományágban született és erős I., illetve II. kontextusa van, és jó példa a tudományfilozófiai kérdéskörökre is.

- Megnevezés: Integrated Information Theory (IIT); [2]
- Tudományág: kognitív idegtudományok és fenomenológia;
- Főszerző: dr. Giulio Tononi agykutató;
- A teória: mekkora a kauzálisan integrált információ a hálózatban, ez egy mérce arra vonatkozóan, hogy mennyire lehet „tudatos” egy hálózat. Jelölése: Φ .

3.1. Historikus kontextus (I.)

Ebben a kontextusban azt vizsgáljuk, hogy a teóriát megelőző gondolkodási forma, esetleg tudományos eljárás mikor kezdődött el a történelem folyamán, esetleg milyen viszonyban van a klasszikus filozófiai irányzatokkal. Ez a fejezet sok esetben akár ki is hagyható, de ajánlott tájékozódni, mert vannak teóriák, amelyek hosszú múlttal rendelkeznek ebben. Az IIT ebben 5-ös pontszámot kap, mivel nagyon régi filozófiai problémából és kérdésből indul ki: Mi a tudat? Miért nehéz megmagyarázni? Az IIT szerzője, dr. Tononi erre nagyon jó historikus és irodalmi betekintést nyújt a Phi-könyvében [3]. Könyvében irodalmi formában elmagyarázza, hogy Galileo hogyan gondolkodott a tudat kérdéséről. A tudat problémáját a modern korunkban David Chalmers filozófus fogalmazta meg [4], ami úgy szól: hogyan lesz a biológiai mechanizmusból egy belső egységes és minőségi érzékelés? Miért látom pirosnak a pirosat? Miért sajátos és minőségi a tudatunk?

Erre a tudatproblémára építette fel az IIT az axiómáit. (1. ábra)



1. ábra. A tudat problémája. Illusztráció [5]

3.2. Matematikai leírás (II.)

A matematikai leírásban a teória formális leírását tanulmányozzuk, ide minden olyan axióma, egyenlet és matematikai összefüggés leírásra kerül, amely a teória alapjait képezi. Az axióma az általános megfigyelésből származó tulajdonság, a posztulátum az ebből származó törvényszerűség kijelentése teoretikus formában és a matematikai kifejezés a posztulátum formális leírása.

Erre a fejezetre 5 pontot kap az IIT.

3.2.1. Létezés

Axióma: A tudat létezik, ezért hatással kell rendelkeznie.

Posztulátum: A hálózat ok-okozati hatással kell, hogy rendelkezzen.

Matematikai kifejezés: Adott egy sztochasztikus hálózat x_t állapotban. Adott a hálózat átmeneti valószínűségek mátrixa T , amely leírja az átmenetek valószínűségét az x_t állapotokból az x_{t+1} -be. Ebből felírható a hálózat feltételes valószínűségi ok-okozati repertoárja:

$$\begin{aligned} P_{\text{cause}}(x_{t-1} | x_t) \\ P_{\text{effect}}(x_{t+1} | x_t) \end{aligned} \quad (1)$$

3.2.2. Kompozíció

Axióma: A tudat megkülönböztethető fenomenológiai elemekből épül fel. Pl. hangok, színek, érzetek.

Posztulátum: A hálózatnak olyan mechanizmusok komplexumát (elemek részhalmazait) kell formálnia, amelyek együttesen korlátozzák az ok-okozati repertoárt.

Matematikai kifejezés: Ha például az adott hálózat teljesen összekapcsolt, 3 elemű csomópontból áll, akkor:

$$M = \{A, B, C, AB, AC, BC, ABC\} \quad (2)$$

ahol M a mechanizmusok halmaza, amelyből minden mechanizmus egy komplexum, ha az arra

a számolt $\Phi > 0$. (A mechanizmusok tartalmazzák a kétirányú kapcsolatokat. Pl. $AB = \{AB, BA\}$)

3.2.3. Információ

Axióma: Minden tudatos tapasztalat specifikus, amely eltér más lehetséges tudatos állapotoktól.

Posztulátum: A hálózatnak differenciált ok-okozati struktúrát kell meghatározni. (Nagy információs eltérés a véletlenszerűségtől.)

Matematikai kifejezés:

$$EI_{\text{cause}} = D(P_{\text{cause}}, P_{\text{max}})$$

$$EI_{\text{effect}} = D(P_{\text{effect}}, P_{\text{max}})$$

$$EI = \min(EI_{\text{cause}}, EI_{\text{effect}}), \quad (3)$$

ahol:

EI_{cause} – effektívok-információ;

EI_{effect} – effektívokozat-információ;

P_{max} – a maximális entrópia eloszlása;

EI – effektív információ;

D – két eloszlás közti távolság, amely lehet Earth's Mover Distance vagy Kullback–Leibler-divergencia.

3.2.4. Integráció

Axióma: A tudat egységes, nem redukálható független részekre.

Posztulátum: Az integrált információ (Φ) azt reprezentálja, hogy mennyire irreducibilis az információ egy mechanizmusban.

Matematikai kifejezés: A hálózat bipartíciói:

$$\{\{A\}, \{B, C\}\}, \{\{B\}, \{A, C\}\}, \{\{C\}, \{A, B\}\}$$

$$\Phi = \min_{MIP} [D(P_{\text{total}}, P_{\text{partitioned}})] \quad (4)$$

ahol:

$\Phi > 0$, ha a részhálózat irreducibilis;

P_{total} – teljes hálózat ok-okozati repertoárja;

$P_{\text{partitioned}}$ – partícionált hálózat ok-okozati repertoárja;

MIP – minimum információs partíció;

3.2.5. Exklúzió

Axióma: A tudat tartalmilag időben és térben jól meghatározott állapotot, amely kizár más állapotokat.

Posztulátum: A hálózatban az a legnagyobb komplexum, amely a legnagyobb Φ -vel rendelkezik.

Matematikai kifejezés:

$$\Phi_{\text{max}} = \arg \max_{m \in M} \{\Phi(m)\} \quad (5)$$

3.3. Episztemológiai kontextus (III.)

Ez a fejezet azt vizsgálja, hogy a teória mennyire bővíti ki a jelenlegi tudásunkat, mekkora magya-

rázó erővel bír. Ez fontos szempont az alkalmazhatóság miatt. Az MI-ben szeretnénk minél több hasznos tulajdonságot implementálni, amelyekkel jobb problémamegoldó mesterséges ágenst kapunk.

Természetes ágens → Mesterséges ágens
(élőlény) (MI)

A természetes ágens tulajdonságaiból származtatjuk a mesterséges ágens tulajdonságait. A kognitív tudományok az ember kognitív tulajdonságait tanulmányozzák. Az IIT a tudatra megalkotja annak kvantifikált értékét, a Φ -t. Erre a fejezetre átlagos 3 pontot kap a teória.

3.4. Ontológiai kontextus (IV.)

Ez a kontextus azzal foglalkozik, hogy a teória milyen közegparadigmát használ a magyarázatában. Ez a közeg lehet elektromágnesesség, sejtek, atomok és egyéb jól ismert tudományos modellek, de lehet akár egy teljesen más paradigma is, mint a megszokottak.

Jelen esetben az IIT ontológiailag független, akárcsak Shannon információs elmélete, ami azt jelenti, bármilyen közegre érvényes, mivel állapotbeli dinamikákat tárgyal, és nem azt, hogy milyen folyamatok és elemek alkotják azt az állapotot. Az IIT számolható idegsejtekre és logikai kapukra is. Ez az ontológiai függetlenség hasznos fogalom az MI-kutatásban, hiszen adaptálható sok ilyen teória a műszaki területen is. Mivel az IIT-nek nincs ilyen alapja, ezért 1 pontot adunk erre.

3.5. Metodológiai kontextus (V.)

Ez a fejezet azt vizsgálja, hogy a teórián mennyire végezhető el az egyik tudományos kutatási módszertani eljárás:

Deduktív eljárás: 0. Tájékozódás → 1. Teória → 2. Predikciós módszer → 3. Tesztelni a predikciót (Mérés) → 4. A predikció ellenőrzése → 5. A teóriát elfogadjuk vagy elvetjük.

Induktív eljárás: 0. Tájékozódás → 1. Megfigyelés (Mérés) → 2. Minták felismerése → 3. Generalizáció → 3. Teória → 4. Teória ellenőrzése → 5. A teóriát elfogadjuk vagy elvetjük.

Az IIT egy deduktív eljárással készült teória. Mivel az IIT már felmutatott agykutatási eredményeket, feltételezzük, hogy a deduktív módszertan elvégezhető rajta. Mivel sokelemű hálózatokra a számolása erőforrás-igényes (NP-nehéz), így approximációt igényel, ezért 4 pontot kap erre a fejezetre.

3.6. Tudományos eredmények (VI.)

Azt vizsgáljuk itt, hogy a teória mennyire validált megfigyelési és kísérleti módszerekkel. Ha sok kísérletben felmutatott eredményt, akkor az azt igazolja, hogy a természeti jelenséget jól tudja magyarázni.

Az IIT ebben a kontextusban 4 pontot kap, mivel a szintén ismert Global Workspace Theory tudat-teóriával holtversenyben tudott predikciós eredményeket felmutatni [6]. Ha a teória még nem mutatott fel kísérleti eredményt, akkor ebben a kontextusban 1-es pontszámot adunk. Az agykutatásban további elért eredmények: [7, 8]

3.7. MI-alkalmazhatóság (VII.)

Az IIT teóriára kidolgoztak egy publikus Python könyvtárat (pyphi), amely szabadon felhasználható, ha a hozzákötődő publikációra mindig hivatkozunk. [9] A könyvtárral tetszőleges n elemű sztochasztikus hálózatra lehet számolni Φ -t.

A 2. ábra szemlélteti a példánkat, amelyben egy logikai kapukból felépített hálózatra számolunk Φ -t.

Python-kód:

#A csomópontok neve és sorrendje:

```
node_labels = ('OR','AND','XOR')
```

#A 2. ábra szerinti kezdeti állapotvektor [n]:

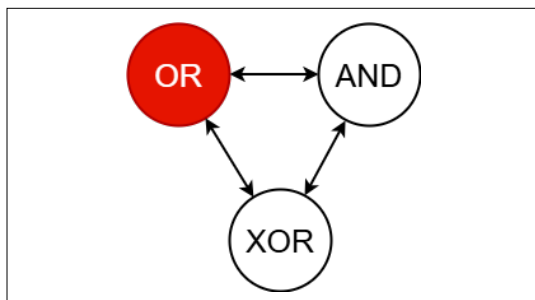
```
state = (1, 0, 0)
```

#Kapcsolati mátrix [n * n]:

```
cm = np.array ([[0,1,1],
                [1,0,1],
                [1,1,0]])
```

#Átmeneti valószínűségek mátrixa [2ⁿ * 2ⁿ]:

```
tpm = np.array ([[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
                 [0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0],
                 [0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0],
                 [0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
                 [0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
                 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1],
                 [0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0],
                 [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]])
```



2. ábra. Példa hálózat (vörös "1", fehér "0")

#Megjegyzés:

A cm kapcsolati mátrix értékei 1 és 0 értéket vehetnek fel. A főátló jelen esetben azért 0, mert a példahálózat nem tartalmaz olyan csomópontot, amelynek van önmagával kapcsolata.

A tpm olyan mátrix, amely felírja az összes lehetséges t állapotból (sorindex) az összes lehetséges t+1 állapotba (oszlopindex) átmenő valószínűségi értékeket. (0–1 közötti értékek)

#Létrehozzuk a hálózatot:

```
net = pyphi.Network(tpm, cm, node_labels)
```

#Kiszámoljuk a hálózat legnagyobb komplexumát:

```
mct = pyphi.compute.major_complex(net, state)
```

#Felhasználjuk a komplexum Φ -jét:

```
phi_maxt = mc.phi
```

```
# $\Phi_{maxt} = 1.916$ 
```

Jelenleg azt tudjuk mondani, hogy az IIT arra jó, hogy hálózatanalízist végezzünk arra vonatkozóan, hogy mennyire rekurrens (visszacsatolt) egy hálózat, ugyanis a visszacsatolások növelik a Φ értékét. A modell szerint, minél több rekurrens ág van egy hálózatban, annál integráltabb a hálózat. Ez a tulajdonság dinamikus memóriaként is értelmezhető, amit nemcsak a csomópontok pillanatnyi állapotai, hanem a hálózat topológiája is meghatároz. Mivel ez egy hálózatanalízis, egyelőre nem látjuk a teória direkt hasznát az MI-ban, ezért az MI alkalmazhatóságra egyelőre semleges: 3 pontot adunk. Lehetséges felhasználás: Az IIT Φ -je tanítási kritériumként használható változó topológiájú hálózatokban, illetve a jövőre nézve a Φ egy mérce lehet az MI-rendszerek etikai besorolásánál. Ez a kontextus további analízist igényel részünkről, mivel úgy gondoljuk, hálózatoptimizálásokban és szenzorfüzúios problémákban is alkalmazható lehet.

3.8. Axiológiai kontextus (VIII.)

Ez a fejezet azt vizsgálja, hogy a teória mennyire kötődik az MI etikai kérdésköréhez.

Az MI jelenlegi etikai témaköre egyre fontosabb kérdés, ezért ez a kontextus sok modellnél fontos lehet. A nonprofit Eleos AI szerint [10] két fő veszély fenyegeti az MI evolúcióját:

- túlbecsüljük (humán tulajdonságokkal ruházuk fel);
- alulbecsüljük a képességeit.

Az IIT ebben a kontextusban 4-es pontszámot kap, mivel a Φ mérceje szerint logikai kapukból is építhetünk „tudatos” MI-t. Persze, ebben a kérdéskörben kritikusak vagyunk a teóriával kapcsolatban. Vigyázni kell azzal, hogy az MI-t ne ruházzuk fel túl gyorsan humán tulajdonságokkal, ezért

egyelőre a Φ számunkra csak egy metrika, de nem több. Az viszont szerintünk jó, hogy elindultunk ezzel is a tudat megértése felé. Szerintünk ez csak egy változó a sok közül, ami a tudat tulajdonsága lehet. A tudatot és az intelligenciát szándékosan nem definiáltuk, mert az idegtudományokban máig egy nyitott kérdéskör. Szeretnénk nyitottnak hagyni az MI körében is, hogy új modelleket készíthessünk. Az IIT szerint a tudatosság belső folyamat, és megkülönböztethető az intelligenciától, ami csak kimeneti tulajdonság.

3.9. Módszertani összefoglaló

A dokumentáció végén lejegyezzük az IIT-teória általános tulajdonságait:

- agyi működésből inspirálódott? Igen;
- hagyományos/statistikai MI? Nem;
- top-down modell? Csak módszerében;
- bottom-up modell? Nem.
- induktív vagy deduktív? Deduktív.

A kontextusok pontjait (1. táblázat) felhasználva végzünk egy súlyozott összpontosítást az MI-alkalmazhatóságot (VII.) legjobban hangsúlyozva, de még jelentősnek számít a matematikai leírás (II.) és a tudományos eredmények (VI.). Ha vannak tudományos eredmények, feltételezzük, hogy az a teória alkalmazhatóbb lehet, hiszen a természetben már egy funkcióra jó predikciót nyújtott. Úgy gondoljuk, hogy a III., IV., V., VIII. kontextus csak indirekt járul hozzá az alkalmazhatósághoz, de az I. semennyire, hiszen történelmi fejezet. Az IV. kontextus fordított előjelű, mert minél hangsúlyosabb valami ontológiailag, annál nehezebb a teóriát interdiszciplinárisan áthozni. Ez a súlyozás még módszertani tapasztalatot és fejlesztést igényel.

$$\text{sum} = \text{I.} * 0 + \text{II.} * 0.5 + \text{III.} * 0.25 - \text{IV.} * 0.25 + \text{V.} * 0.25 + \text{VI.} * 0.5 + \text{VII.} * 1 + \text{VIII.} * 0.1$$

Az összeget hármasszabállyal átalakítjuk %-ra:

$$IIT_{rating} = 74\%.$$

4. Következtetések

A módszertanunk egy kiindulási irány ahhoz, hogy kognitív teóriákból hasznos MI-eszközöket készítsünk. A módszertan természetesen fejlesztést igényel, de ahhoz sok teóriára kell alkalmaznunk. A cél az, hogy bármilyen teóriát és modellt elemezni tudjunk, függetlenül attól, hogy milyen kognitív tudományból származik. Ha van egy ilyen tárházunk, akkor sokkal könnyebb új modellt megalkotni, mert már ismerjük a témaköri elképzeléseket és problémákat. Ha a tárházunkból találunk ígéretes alkalmazási ötletet, azt megvalósítjuk.

A módszertan által elemzett, reprezentatív IIT-teória további analízist igényel részünkről MI-alkalmazhatóságban, ami egy külön feladat lesz számunkra a közeljövőben.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Quack M.: *Science and Arts, Philosophy and Science: Why after All? Why Not?*, Helvetica Chimica Acta, 106/4. (2023) 1–3.
<https://doi.org/10.1002/hlca.202200174>
- [2] Oizumi M., Albantakis L., Tononi G.: *From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Integrated Information Theory 3.0*. PLoS Computational Biology, 2014, 1–25.
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003588>
- [3] G.: *Phi: A Voyage from the Brain to the Soul*. 1. ed. Pantheon Books, New York, 2012, 1–38.
- [4] Chalmers D.: *Facing up to the Problem of Consciousness*. Journal of Consciousness Studies, 2/3. (1995) 200–219.
<https://philpapers.org/rec/CHAFUT>
- [5] UI Here free samples. <https://www.uihere.com/> (2025.02.22)
- [6] Cogitate Consortium, Ferrante O., Gorska-Klimowski U., et al.: *An Adversarial Collaboration to Critically Evaluate Theories of Consciousness*. bioRxiv 2023.06.23.546249, 1–68.
<https://doi.org/10.1101/2023.06.23.546249>
- [7] Ferrarelli F., Massimini M., Sarasso S., Casali A., Riedner B.A., Angelini G., Tononi G., Pearce R.A.: *Breakdown in Cortical Effective Connectivity during Midazolam-Induced Loss of Consciousness*. Proc Natl Acad Sci USA. 107/6. (2010) 2681–2686.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0913008107>
- [8] Casali A.G., Gosseries O.: *A Theoretically Based Index of Consciousness Independent of Sensory Processing and Behavior*. Science Translational Medicine, 5. (2013) 1–12.
<https://hdl.handle.net/2268/171542>
- [9] Mayner W.G.P., Marshall W., Albantakis L., Findlay G., Marchman R., Tononi G.: *PyPhi: A Toolbox for Integrated Information Theory*. PLoS Computational Biology, 14/7. (2018) 1–21.
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006343>
- [10] Long R., Sebo J., Butlin P., Finlinson K., Fish K., Harding J., Pfau J., Sims T., Birch J., Chalmers D.: *Taking AI Welfare Seriously*. arXiv:2411.00986, (2024) 1–3.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.00986>



FA TARTÓSZERKEZETI ELEMÉK 3PHV60-TÍPUSÚ MŰGYANTÁVAL VALÓ HELYREÁLLÍTÁSÁNAK VÉGESELEMES MODELLEZÉSE

FINITE ELEMENT MODELLING OF THE RESTORATION OF WOODEN STRUCTURAL ELEMENTS WITH 3PHV60 TYPE EPOXY RESIN

Márton Péter,¹ Varga Kristóf Renátó,² Köllő Gábor³

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, marton.peter17@gmail.com

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Budapest, Magyarország, k.r.varga1211@gmail.com

³ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, Gavril.Kollo@cfdp.utcluj.ro

Abstract

This article deals with the issue of repairing wooden structural elements with 3PHV60 type epoxy resin. The primary objective of this paper is to model the effects of cracking. Finite element design software has been used to study this issue and the results obtained have been compared with the results of previously performed destructive tests. The results of the damaged specimens were compared with the results of the resin-restored specimens.

Keywords: *finite element modelling, structural timber, timber repair, epoxy resin, consolidation.*

Összefoglalás

Jelen cikk a fa tartószerkezetek 3PHV60-típusú műgyantával történő javításának kérdéskörével foglalkozik. Ezen kérdéskörön belül a repedés hatásának modellezése a tanulmány elsődleges célja. A kérdéskör tanulmányozására végeselemes szoftvert használtunk, és az így kapott eredményeket összehasonlítottuk a korábban elvégzett roncsolásos vizsgálatok eredményeivel. A károsodott próbatestek eredményeit összehasonlítottuk a műgyantával helyreállított változatokkal.

Kulcsszavak: *végeselemes modellezés, tartószerkezeti fa, műgyanta, farehabilitálás, megerősítés.*

1. Bevezetés

Napjainkban az épületek rehabilitációja kiemelt fontossággal bír, viszont egy épület felújítása során a károsodott tartószerkezeti elemek helyreállítása számos kihívást rejteget. A tartószerkezetek helyreállítása felelős mérnöki hozzáállást igényel, melynek része a gazdaságos és környezettudatos szemlélet is. A gazdaságos és környezettudatos szemlélet egyik fő irányelve a károsodás mértékéhez igazodó helyreállítás/beavatkozás.

A több szakaszból álló kutatás célja a helyileg károsodott fa tartószerkezeti elemek műgyantával történő lokális helyreállításának vizsgálata.

A kutatás központi kérdése, hogy a műgyanta képes-e növelni a károsodott fa tartószerkezeti elemek teherbírását és merevségét.

2. Alaphelyzet

A kutatás első lépése a fa tartószerkezeti elemek helyreállításhoz alkalmazandó, 3PHV60-típusú műgyanta mechanikai tulajdonságainak vizsgálata volt, amellyel az előzetesen már közölt *A 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek összehasonlítása a C24 szilárdsági osztályú puha-fák anyagjellemzőivel* [1] már részletesen foglalkozott. Az alkalmazott 3PHV60-típusú műgyanta mechanikai tulajdonságainak feltérképezésére

töréskeresztteken alapuló vizsgálatokat hajtottunk végre. Az ismereteinket a gyártó által szolgáltatott információkkal egészítettük ki. A műgyanta mechanikai tulajdonságainak megismerése után, a műgyanta fán történő alkalmazhatóságát vizsgáltuk. Bővebben ezzel a kérdéskörrel az *A 3PHV60 típusú műgyanta alkalmazása a faszerkezetek javítására/Application of 3PHV60 Type Epoxy Resin for the Repair of Timber Structures* [2] című tanulmány foglalkozik.

3. A vizsgált próbatetek bemutatása

A vizsgálat során a fa tartószerkezeti elemeken levő repedések hatását vizsgáltuk. A hajlított tartók nyírófeszültségeinek számításánál az Eurocode 5 egy k_{cr} felrepedési tényezőt alkalmaz a hatékony keresztmetszeti szélesség kiszámítására. A nyírási teherbírás meghatározásakor a figyelembe vehető elemszélességet a $b_{ef} = k_{cr} \cdot b$ összefüggéssel számítjuk. A fűrészelt és rétegelt-ragasztott fa esetén a k_{cr} értéke 0,67. Ezt az értéket alapul véve a vizsgált keresztmetszet egyharmad részéig hajtottunk végre szabályos gyengítést a próbatest teljes hosszán.

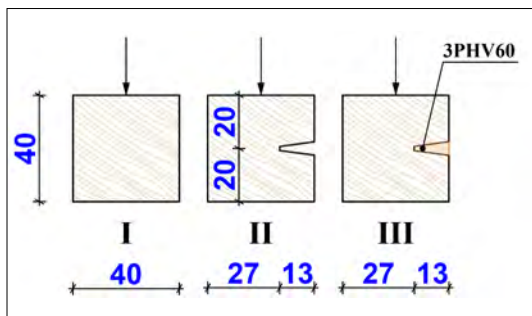
Kiindulásként sérülésmentes próbatesteket vizsgáltunk. Ezt követően az egyoldali gyengített próbatestek és műgyantával helyreállított próbatestek vizsgálatával folytattuk a kutatást. A vizsgált esetek eredményeit összehasonlítottuk.

A roncsolásos vizsgálatok és végeselemes modellek során a 2–4. ábrákon szemléltetett statikai modellt alkalmaztuk az MSZ EN 408:2010+A1:2012 [3] szabvány előírásait figyelembe véve.

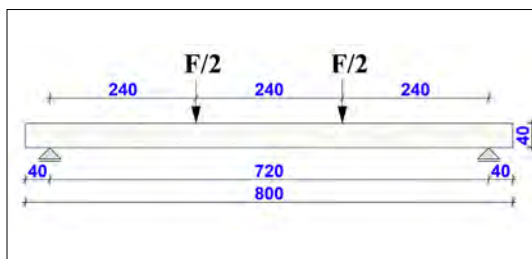
A roncsolásos vizsgálatok során mértük a fesztség felénél a függőleges elmozdulást és a törés pillanatában az F erőt. *The Use of Epoxy Resin in the Repair of Cracked Wooden Structural Elements* [4] tanulmányban a roncsolásos vizsgálatok eredményeinek részletes kimutatása található.

4. Végeselemes modellezés

A roncsolásos vizsgálatokat követően a kísérleteket végeselemes módszerrel is modelleztük az ANSYS 2024 R2 szoftver segítségével, majd a kapott erő-elmozdulás diagramokat összehasonlítottuk a roncsolásmentes vizsgálatok során kapott diagramokkal. A nemlineáris számítás során a fa próbatestet SOLID45-típusú elemekből építettük fel, lineárisan rugalmas ortotróp anyagot feltételezve, húzásra felkeményedő, míg nyomásra tökéletes képlékenyedő anyagmodellel. A műgyanta-megerősítést SOLID185 elemtípus használatával és lineárisan rugalmas, izotróp anyagot figyelembe véve modelleztük.



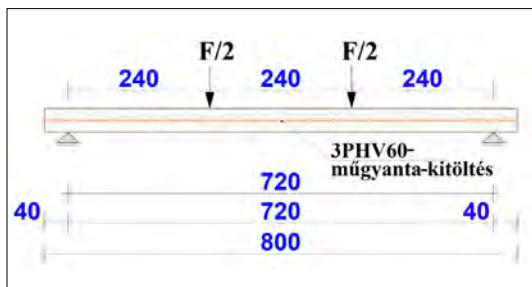
1. ábra. A vizsgált próbatetek keresztmetszete



2. ábra. Az ép fa próbatetek vizsgálata során alkalmazott kísérleti elrendezés



3. ábra. Az egyik oldalán berepedt fa próbatetek vizsgálata során alkalmazott statikai modell



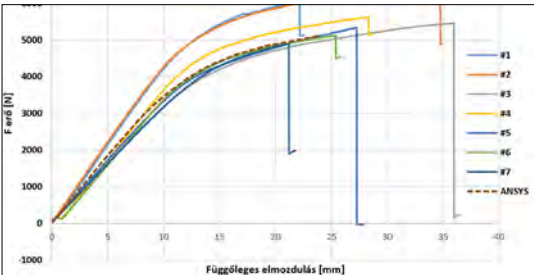
4. ábra. A műgyantával helyreállított fa próbatetek vizsgálata során alkalmazott statikai modell

A két anyag között tökéletes együttlőgozást feltételezve, az eltérő elemek közös csomópontjaiban az elmozdulásokat összekapcsoltuk, így azok azonosak a számítás teljes folyamata során. A gerenda egyik végén csuklós, másik végén görögös megtámasztásokat definiáltunk. A terheket a harmadoló pontokban elhelyezett, 40×40 mm-es merev, teherelosztó lapokon, kis időlépéses elmozdulás vezérelt terheléssel helyeztük a gerendára. Az elemek 5 mm×5 mm×5 mm méretű végelemekből épülnek fel.

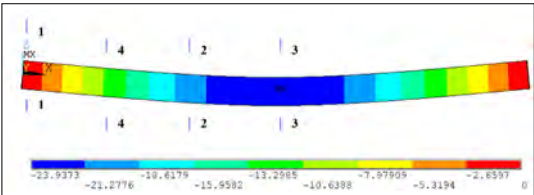
Az elméleti modellben az anyagok rugalmassági modulusait, Poisson-tényezőit és határfeszültségi értékeit a roncsolásos vizsgálatok eredményei és a szakirodalomban található adatok alapján vettük figyelembe. A fa anyagmodell paramétereit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

4.1. Sérülésmentes próbatetek

A sérülésmentes próbatetek roncsolásos vizsgálatai során kapott erő-elmozdulás diagramjaira szerkesztettük a végeselemes modellben kapott diagramokat, ezáltal a modell helyességét is tudtuk ellenőrizni. A 5. ábra a sérülésmentes próbatetek roncsolásos és végeselemes (ANSYS) erő-elmozdulás diagramjait szemlélteti. A szaggatott vonal jelöli az elméleti modell erő-elmozdulás függvényét. Az elméleti modellben a tönkremenetel pillanatában mért függőleges elmozdulásokat a 6. ábra szemlélteti. Az 7. ábrán a normálfeszültségek alakulása, a 8. ábrán pedig a nyírófeszültségek alakulása látható.



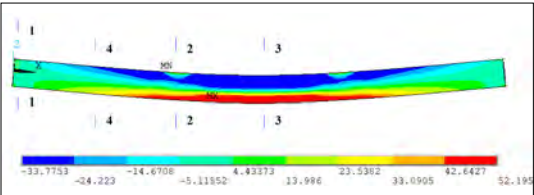
5. ábra. A sérülésmentes próbatetek erő-elmozdulás diagramja



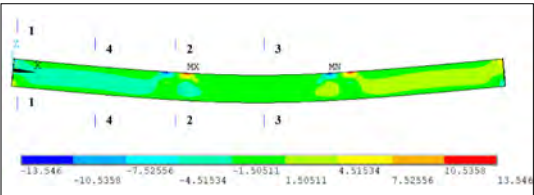
6. ábra. A sérülésmentes próbatetek elmozdulás-ábrája az ANSYS végeselemes szoftverben

1. táblázat. A végeselemes modellekben alkalmazott fa mechanikai tulajdonságai

Mechanikai tulajdonság	Érték
Young-modulus (x irány)	11000 N/mm ²
Young-modulus (y irány)	649 N/mm ²
Young-modulus (z irány)	1408 N/mm ²
Poisson-tényező (xy irány)	0,462
Poisson-tényező (yz irány)	0,255
Poisson-tényező (xz irány)	0,422
Nyírási rugalmassági modulus (xy)	1364 N/mm ²
Nyírási rugalmassági modulus (yz)	110 N/mm ²
Nyírási rugalmassági modulus (xz)	1320 N/mm ²
Folyáshatár (húzás, x irány)	50 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (húzás, x irány)	500 N/mm ²
Folyáshatár (húzás, y irány)	5 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (húzás, y irány)	100 N/mm ²
Folyáshatár (húzás, z irány)	5 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (húzás, z irány)	100 N/mm ²
Folyáshatár (nyomás, x irány)	30 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (nyomás, x irány)	0 N/mm ²
Folyáshatár (nyomás, y irány)	50 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (nyomás, y irány)	0 N/mm ²
Folyáshatár (nyomás, z irány)	50 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (nyomás, z irány)	0 N/mm ²



7. ábra. A sérülésmentes próbatetek normálfeszültség-ábrája az ANSYS végeselemes szoftverben



8. ábra. A sérülésmentes próbatetek normálfeszültség-ábrája az ANSYS végeselemes szoftverben

A végeselemes modellben a műgyanta Young-modulusa minden irányban 650 N/mm^2 , a Poisson-tényező pedig 0,3 értékű.

A roncsolásos vizsgálat során az F törőerők átlagértéke 5569 N volt, a feszítávolság közepén mért átlagos függőleges elmozdulás értéke $28,26 \text{ mm}$. Az elméleti modellben a törőerő értéke 5106 N , a feszítávolság közepén mért, átlagos függőleges elmozdulás értéke $23,86 \text{ mm}$.

4.2. Az egyik oldalukon berepedt próbatestek

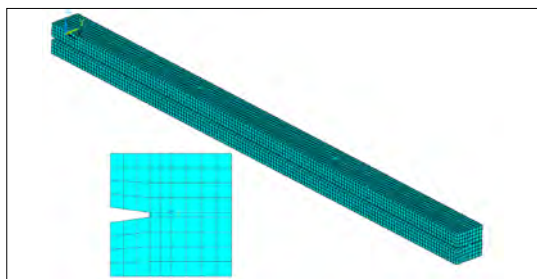
A roncsolásos vizsgálatokat követően végeselemes módszerrel vizsgáltuk azt az elemet is, melynek semleges tengelyénél, az elem egyik oldalán repedést szimuláltunk. A 9. ábra a végeselemes szoftverrel behálózott próbatestet szemlélteti. A 10. ábrán a végeselemes modell erő-elmozdulás diagramja és a roncsolásos vizsgálat erő-elmozdulás diagramjai láthatók. A 11. ábrán a repedt elem függőleges elmozdulásai láthatók mm-ben. A 12. ábra a repedt elem normálfeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm^2 -ben. A 13. ábra a repedt elem nyírófeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm^2 -ben.

A végeselemes szoftverrel modellezett elem erő-elmozdulás diagramja jól igazodik az eltört próbatestek diagramjaihoz.

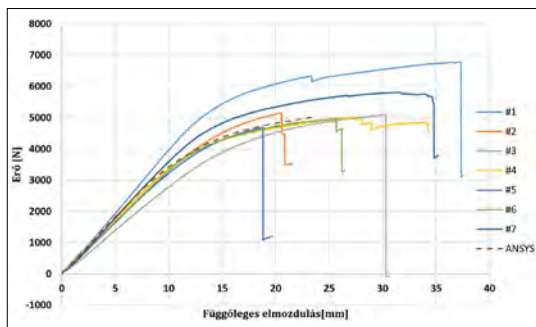
A roncsolásos vizsgálatok során kapott törőerők átlagértéke 5363 N , a feszítávolság felénél mért elmozdulások átlagértéke pedig $29,33 \text{ mm}$ volt. A végeselemes módszerrel kapott törőerő értéke 5018 N volt, melyhez $23,43 \text{ mm}$ elmozdulás társul.

4.3. A műgyantával helyreállított próbatestek

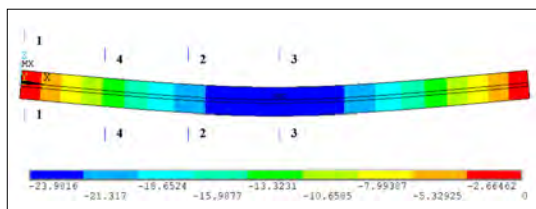
A repedt próbatestek geometriája alapján készítettük el a műgyantával helyreállított elemeket. A 14. ábra a roncsolásos vizsgálat és elméleti modell erő-elmozdulás diagramjait összegzi. A végeselemes modell erő-elmozdulás függvényét a szaggatott vonallal jelöltük.



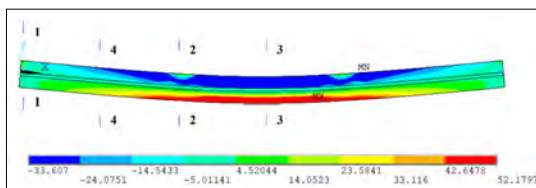
9. ábra. Az egyik oldalán berepedt próbatest végeselemes modellje



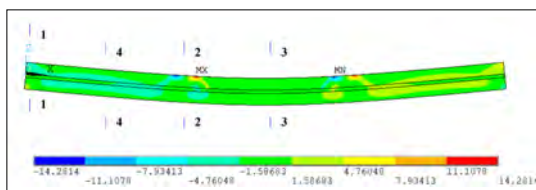
10. ábra. A sérülésmentes próbatestek erő-elmozdulás diagramja



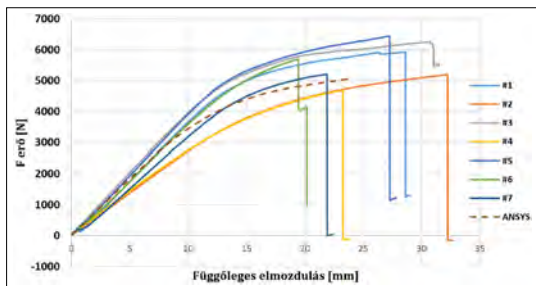
11. ábra. A repedt elem függőleges elmozdulásai



12. ábra. A repedt elem normálfeszültségeinek alakulása



13. ábra. A repedt elem nyírófeszültségeinek alakulása



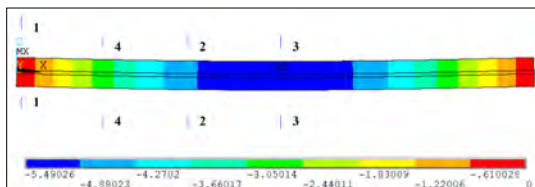
14. ábra. A helyreállított próbatestek erő-elmozdulás diagramja

A helyreállított próbatestek esetében a roncsolás vizsgálat során eredményül kapott törőerők átlagértéke 5631 N, a feszítávolság felénél mért függőleges elmozdulások átlagértéke 26,76 mm volt. Az elméleti modell esetében a törőerők átlagértéke 5065,64 N, a feszítávolság felénél mért függőleges elmozdulások átlagértéke 23,86 mm volt. A 15. ábrán a műgyantával helyreállított próbatest függőleges elmozdulásai láthatók mm-ben.

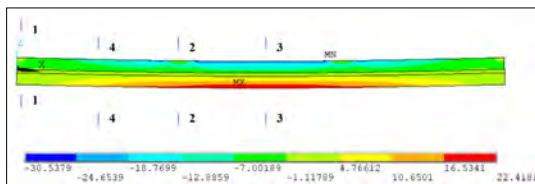
A 16. ábra a műgyantával helyreállított elem normálfeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm²-ben. A 17. ábra a helyreállított elem nyírófeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm²-ben.

4.4. A repedt és műgyantával helyreállított esetek összehasonlítása

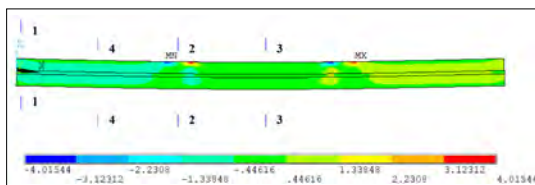
A műgyanta hatását a vége-selemes modellekben felvett metszetek normál- és nyírófeszültség ábráinak összehasonlításával analizáltuk. A feszítávolság felénél (3-3) és a támasztól számított 120 m-re (4-4) vettük fel a metszeteket. A 3-3 metszetben maximum normálfeszültségi pont van, a 4-4 metszetben pedig maximum nyírófeszültség (18–27. ábra). A támaszoknál és az erőbevezetéseknel ezúttal nem vizsgáljuk a feszültségek eloszlását a lokális hatások elkerülése érdekében.



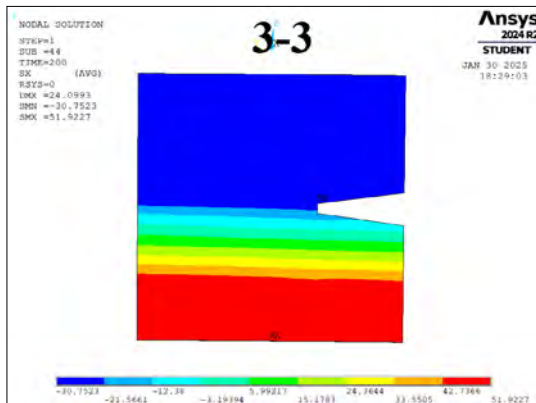
15. ábra. A műgyantával helyreállított elem függőleges elmozdulásai



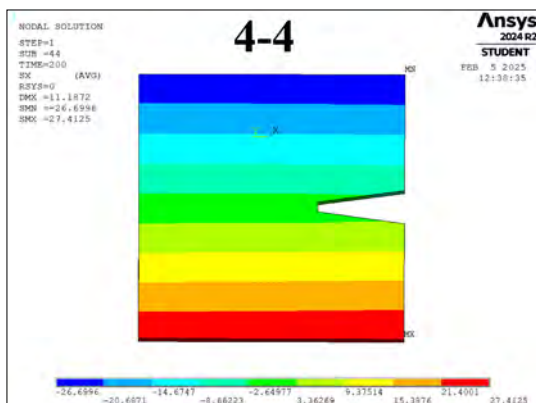
16. ábra. A műgyantával helyreállított elem normálfeszültségeinek alakulása



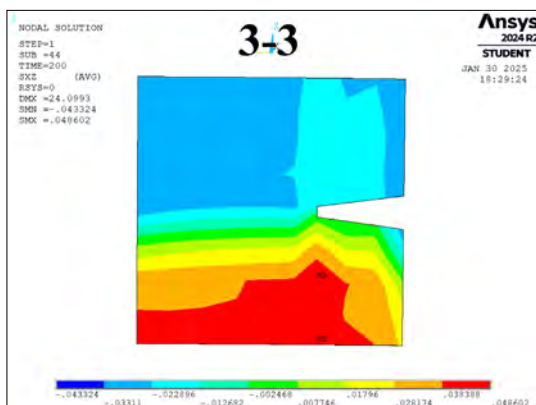
17. ábra. A műgyantával helyreállított elem nyírófeszültségeinek alakulása



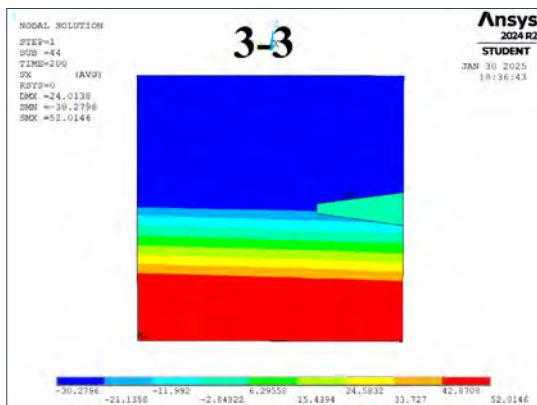
18. ábra. Normálfeszültség alakulása a 3-3 metszetben a repedt próbatest esetén



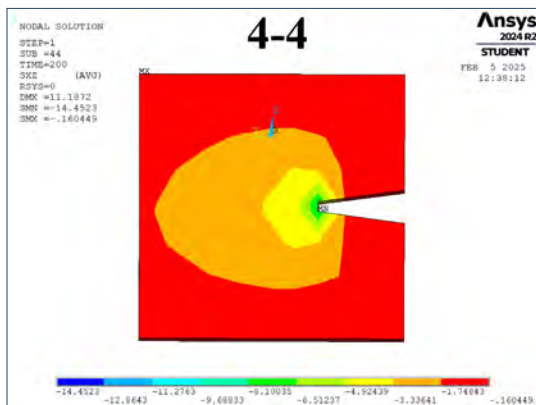
19. ábra. Normálfeszültség alakulása a 4-4 metszetben a repedt próbatest esetén



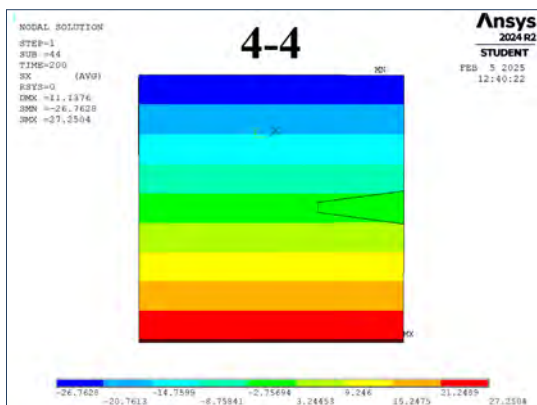
20. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 3-3 metszetben a repedt próbatest esetén



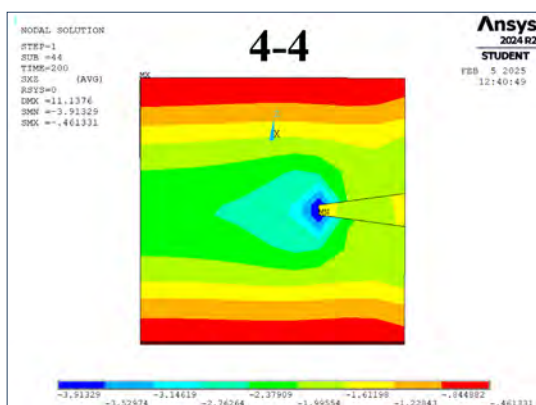
21. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 3-3 metszetben a helyreállított próbatest esetén



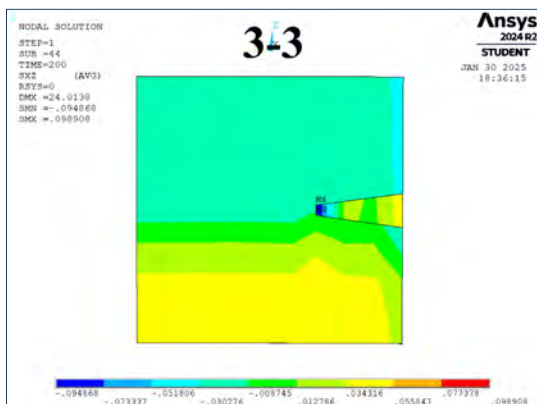
24. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 4-4 metszetben a repedt próbatest esetén



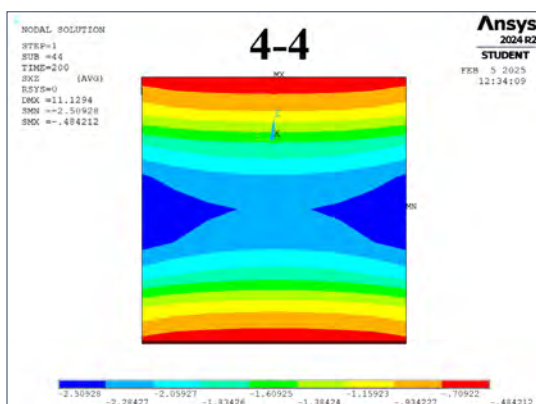
22. ábra. Normál feszültség alakulása a 4-4 metszetben a helyreállított próbatest esetén



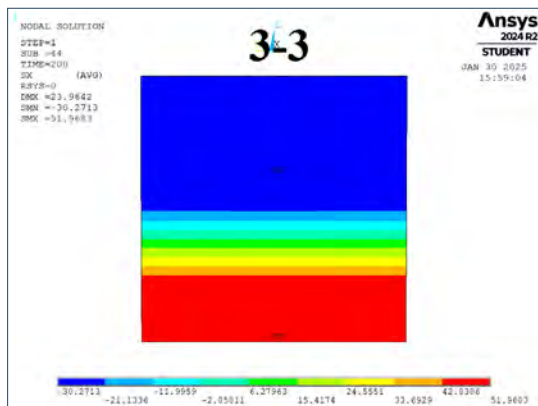
25. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 4-4 metszetben a helyreállított próbatest esetén



23. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 3-3 metszetben a helyreállított próbatest esetén



26. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 4-4 metszetben az ép fa próbatest esetén



27. ábra. Normálfeszültség alakulása a 3-3 metszetben az ép fa próbatest esetén

5. Következtetések

A normálfeszültségek alakulása szempontjából egyik esetben sem számottevő a repedés hatása. Ez a jelenség a repedésnek az elem keresztmetszeten belüli, semleges tengelynél levő pozíciójával magyarázható. Emiatt a törési erők sem térnek nagyban el egymástól. A törés a normálfeszültségek határfeszültségének túlhaladása miatt következik be ennél a mélységű és pozíciójú repedésnél.

A nyírófeszültségek alakulása szempontjából viszont a repedésnek meghatározó szerepe van. A repedés a várható nyírófeszültség maximumánál helyezkedik el. A 18. ábra az ép próbatestek nyírófeszültségének alakulását szemlélteti, ahol a várt módon, a keresztmetszet közepén éri el az XZ-nyírófeszültség a csúcspot.

A 16. ábra a repedt próbatest nyírófeszültség-ábráját szemlélteti a 4-4 keresztmetszetben. A repedés környezetében megfigyelhető egy feszültségcsúcs 8N/mm^2 feszültségi csúcserővel, amely több mint háromszoros érték az ép próbatest megfelelő pontjához hasonlítva.

A 17. ábrán a műgyantával helyreállított próbatest esetében a műgyanta alkalmazása kedvezően hat a nyírófeszültségek alakulására. A helyreállított repedés csúcspontjában megtalálható a feszültségi maximumpont, de ennek értéke több

mint 2-szer kisebb, mint a repedt elem esetében. A műgyanta alkalmazásával sikerült a feszültségcsúcsokat csökkenteni és a nyírófeszültségek alakulása szempontjából az ép keresztmetszethez közeli értékeket kapni.

A kutatás további lépéseiben a keresztmetszet mindkét oldalán levő repedéseinek hatását és annak műgyantával való helyreállítását célozzuk meg vizsgálni. Ezt követően olyan eseteket is vizsgálni szeretnénk, ahol a gyengítés pozíciója a normálfeszültség alakulását befolyásolhatja.

Köszönetyilvánítás

Köszönettel tartozunk Armuth Miklós címzetes egyetemi tanárnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Sebestyén Ottó technikusnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Karádi Dániel építésztechnikus doktoranduszának (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) és Baróthy Miklós vegyészmérnöknek (POLINVENT Kft.), akik a tanulmány megfelelő fázisaiban segítettek, támogatták a kutatást.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Márton P.: A 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek összehasonlítása a C24 szilárdosági osztályú puhafák anyagjellemzőivel/Determination and Comparison of the Mechanical Properties of Epoxy Resin Type 3PHV60 with C24 Structural Graded Softwood. Hungarian Technical Scientific Society of Transilvania, Technical Review, 84. (2023) 23–37.
<https://ojs.emt.ro/muszakiszemle/article/view/1495>
- [2] Márton P.: A 3PHV60-típusú műgyanta alkalmazása a faszerkezetek javítására/Application of 3PHV60 Type Epoxy Resin for the Repair of Timber Structures, Acta Materialia Transylvanica 7/1. (2024) 29–38.
<https://doi.org/10.33923/amt-2024-01-06>
- [3] MSZ EN 408:2010+A1:2012 Faszerkezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása
- [4] Márton P.: The Use of Epoxy Resin in the Repair of Cracked Wooden Structural Elements – The 18th International Conference Interdisciplinarity in Engineering – INTER-ENG, Springer Nature, 2024.



A LÉZERSUGÁR VESZÉLYEI

HAZARDS OF LASER BEAM

Nagy Balázs Ákos,¹ Kovács Tünde Anna²

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország, nagy.balazs@bgk.uni-obuda.hu

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

Abstract

Lasers are now indispensable tools in industry, medicine, communications, and scientific research. Their precision and efficiency have led to widespread adoption. However, their use demands significant caution, as laser radiation poses a serious hazard to the human body, especially the eyes and skin. Due to this reason, most laser sources are isolated from the environment (protective enclosure), however, there are applications where the operator is in the same airspace as the equipment emitting hazardous radiation. In an industrial environment, cutting, welding, and cleaning tasks can be performed with manual laser equipment. In this case, not only does the laser radiation pose a potential risk, but also the smoke gases and aerosols generated during the interaction between the laser light and the material, which can lead to respiratory diseases. To ensure safe operation, the proper use of protective equipment – such as laser safety goggles and specialized clothing – is crucial, along with meticulous workspace design and adherence to international standards. Ensuring radiation safety is not only essential for protecting individual health, but also a fundamental requirement for the sustainable and safe application of laser technology.

Keywords: *laser beam, scattered radiation, wavelength, handheld laser source, photon-matter interaction.*

Összefoglalás

A lézerek napjainkban az ipar, az orvostudomány, a kommunikáció és a tudományos kutatások meghatározó eszközei. Precizitásuk és hatékonyságuk miatt széles körben elterjedtek, ugyanakkor használatuk jelentős figyelmet igényel, mivel a lézersugárzás komoly veszélyt jelenthet az emberi szervezetre, különösen a szemre és a bőrre. Ebből fakadóan a legtöbb lézerforrás el van szigetelve a környezettől (védőburkolat), viszont vannak olyan alkalmazások, melyeknél az üzemeltető egy légtérben tartózkodik a veszélyes sugárzást kicsatoló berendezéssel. Az ipari környezetben a kézi lézeres berendezésekkel vágási, hegesztési és tisztítási feladatok végezhetők, ez esetben a nemcsak a lézersugárzás jelent potenciális kockázatot, hanem a lézerfény-alapanyag kölcsönhatása során keletkező füstgázok és aeroszolok is, amelyek légúti megbetegedésekhez vezethetnek. A biztonságos működtetés érdekében kulcsfontosságú a megfelelő védőeszközök – például lézerszemüvegek és speciális ruházat – alkalmazása, a munkakörnyezet gondos tervezése és a nemzetközi szabványok betartása. A sugárvédelem biztosítása nemcsak az egyéni egészség megóvásának, hanem a lézertechnológia fenntartható és biztonságos alkalmazásának alapfeltétele.

Kulcsszavak: *lézersugár, szórt sugárzás, hullámhossz, kézi lézerforrás, fény-anyag kölcsönhatás.*

1. Bevezetés

Az első lézerfényt kibocsátó berendezés megalkotásától (Theodore Maiman, Hughes Research Laboratory, California, 1960.) fogva mára nélkülözhetetlen szerepet töltenek be az emberek

mindennapjaiban a lézeres technikák [1]. Ennek oka a lézerfény speciális tulajdonságaiban rejlik: hagyományos fényforráshoz képest a sugárnyaláb kis divergenciájú (kis sugárszéttartás), monokromatikus (egyszínű) és koherens, azaz állandó

frekvenciájú és fázisú elektromágneses sugárzás (1. ábra) [2, 3, 4]. Az első két tulajdonság indokolja a nagyfokú alkalmazásukat (méréstechnika, orvostudomány, szórakoztatóipar), viszont ipari anyagmegmunkálás szempontjából fontos a besugárzott felület energiaeloszlása és a nagy teljesítménysűrűség biztosítása [1]. Utóbbi miatt teljesítménylézereknek is hívhatjuk az ilyen berendezéseket, hiszen több kilowatt teljesítményleadásra képesek [2, 3].

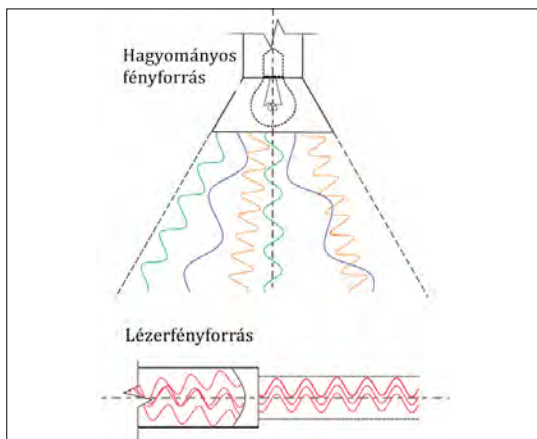
Ilyen nagy teljesítményre gázlézerek közül a CO_2 gázmédiumú ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He} / \text{H}_2\text{O}$ gőz 1:1:8 arányú gázkeverék) és a szilárdtestlézerek képesek [2]. Először CO_2 -lézerekkel sikerült nagy teljesítményű berendezéseket alkotni, viszont bonyolult kialakítása és üzemeltetési, karbantartási költségei miatt visszaszorulóban vannak, de nem elhanyagolhatóak [1]. Ilyen kialakításban a lézeraktív anyag (amelyet gerjesztünk) a CO_2 molekula, a többi gáz/gőz a kettőnél több energianívós rendszer fenntartása érdekében van jelen (2. ábra). Ennek biztosítása elengedhetetlen a folyamatos üzemmódú (Continuous Wave) sugárzás eléréséhez, ami nélkül vágási, felületkezelési és egyes hegesztési feladatok elképzelhetetlenek lennének. A sugárzás 10 600 nm hullámhosszúságon törtenik, melyet a CO_2 vibrációs energiájának (mechanikai mozgásának) köszönhetünk [2, 3].

A fejlesztés iránya a szilárdtestlézerek felé fordult az elmúlt 30 évben, főleg a fiberkivitélű (szál, rost) gerjesztés irányában [5, 6]. Az egyik indok, hogy a még a legrobosztusabban kialakított rúd-lézerek (régi irányzat) sem vetekednek a CO_2 lézerek gerjesztőkörének méreteivel. Ezenfelül üzemeltetésük és hatásfokuk is kedvezőbb [7], bár karbantartások speciális alkatrészeket/szer-

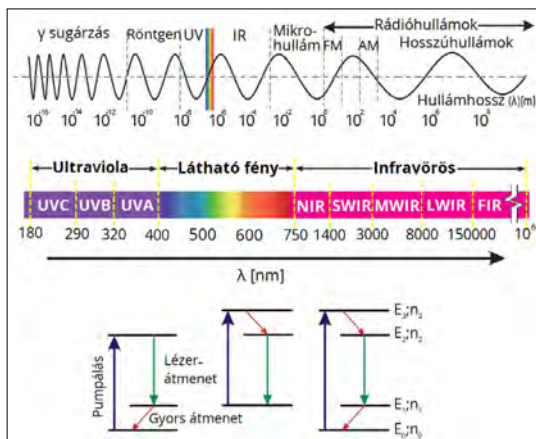
számokat igényelhet [1]. Nem utolsósorban a szilárdtestlézergépből kicsatolt fény tulajdonságai bővítik a lézerek alkalmazhatóságának palettáját [2, 3].

Az ilyen típusú lézergerjesztők lézermédiuma egy optikailag közvetítő közeg (kristály), mely lézeraktív anyaggal szennyeznek. A legelterjedtebb a YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$: ittrium-alumínium-gránát) kristály- neodímiumionokkal (Nd^{3+}) szennyezve, de más anyag ionjait is alkalmazhatják (pl.: itterbium, erbium, holmium) [1, 2]. A berendezésből kicsatolható fény hullámhossza a szennyezőtől függ, neodímium esetében 1064 nm (2. ábra). Ezen NIR (közel infravörös) tartományban sugárzó lézereknek köszönhetően képesek vagyunk olyan anyagokat (Al, Cu, Ti stb.) is megmunkálni, amit CO_2 esetében komplikált lenne [1, 2, 8].

Utalva az előzőekben megállapítottakra, a szál-lézeres technikák terjednek leginkább [8, 9]. Oka a gerjesztőkör kis méretéből és a könnyedén megvalósítható sugárvezetéséből fakad [1, 2]. Ezen tulajdonságok maximalizálása mellett születtek meg a kézi lézerforrások [5, 6, 8]. Az ilyen berendezéseket több funkcióra alkották (3 in 1: vágás, hegesztés, felülettisztítás), melyekhez készülékeket (lézerfejeket) is kapunk megvásárlása esetén. Sok esetben különálló huzalelőtőló egységet is mellékelnek, melynek köszönhetően a hegesztési sebesség állandó hozaganyagos eljárás folyamán (a huzalelőtőló sebességétől függ). Szintén hozzájárul a kézi lézerforrások terjedéséhez, hogy könnyedén integrálható kollaboratív robotkarra, elősegítve a hozaganyagmentes hegesztés sebességének állandó értéken tartását és a reprodukálhatóságot (3. ábra). CNC-programozással képesek vagyunk virtuális munkateret definiálni, abból



1. ábra. Sematikus ábra a hagyományos fényforrás és a lézerfény különbségeiről



2. ábra. Sugárzások hullámhosszai és 3, illetve 4 energianívós rendszer sematikus ábrázolása



3. ábra. Kézi lézerforrások (bal) és azok integrált rendszere kobottal (jobb) [6]

kilépve lézersugarat nem enged a rendszer kicsatolni [6].

Napjainkban már a 4. generációs kézi lézerberendezésekről beszélünk, gyártásuk a Közel-Ketlekre összpontosul. Áruk kedvezőbb a kötött munkatérrel rendelkező, CNC-vezérlésű ipari lézerekénél (10.000 € körül), sajnos ebből fakadóan az ilyen berendezések a biztonságos üzemeltetési követelményeket csak részben teljesítik (pl.: EN ISO 11553-2; CE stb.). Üzemeltetésük folyamán ezt is figyelembe kell venni a környezet helyes kialakítása és a személyi védelem biztosítása mellett [5, 6].

2. Lézerosztályok

A lézerfényt kibocsátó eszközöket veszélyességük alapján az EN 60825-1 (jelenleg hatályos a 2014. évi) szabványosztályokba rendezte. A csoportosítás a lézerfény teljesítményének (W, mW), hullámhosszának (nm, μm), az expozíció idejének (s) és a sugárzás típusának (folyamatos üzemű, impulzusos üzemű) függvényében történt [8, 10]. 4 osztályt különböztetnek meg, egyes osztályokon belül külön betűvel alcsoportokat hoztak létre. Az M jelölés az angol magnification (nagyítás) szóból származik, jelentése a szabványra nézve az, hogy az adott, eredetileg „veszélytelen” osztályába tartozó berendezés ártalmassá válik, ha optikai eszközt helyezünk a forrás elé (Class 1M, Class 2M). Az R betű a reduced (csökkentett) angol kifejezést jelenti, azaz csökkentett kockázatúak az ilyen berendezések, de közvetlen expozíció esetén ugyanúgy veszélyesek (Class 3R). A B jelölés a szabvány korábbi változatából maradt (Class 3B) meg, külön jelentése nincs (az 1994-es verzióban a 3A a mostani 3R alosztály, a 3B maradt) [11, 12, 13].

Az 1. osztályú lézerek zárt rendszerűek, és nem jelentenek veszélyt az emberi szervezetre (pl.: CD-olvasó). Az 1M osztály 302,5–400 nm közötti hullámhosszú lézereket tartalmaz, amelyek szabad szemmel biztonságosak, de optikai eszközzel veszélyesek lehetnek (pl.: lézeres mutató).



4. ábra. Figyelmeztetések és kötelezettségek jelzései (ISO 7010 szerint)

A 2. osztályú lézerek (400–700 nm, max. 1 mW) a szem pislogási reflexe révén nem jelentenek veszélyt rövid expozíció esetén (pl.: lézermutató). A 2M osztály ugyanilyen paraméterekkel rendelkezik, de optikai eszközzel nézve káros lehet (pl.: jelölőlézerek). A 3R osztály lézerei 1–5 mW teljesítményűek (400–700 nm). Rövid ideig nem veszélyesek, de hosszabb expozíció károsíthatja a szemet. Figyelmeztető jelzések (4. ábra) és védőszemüveg ajánlott (pl.: lézervágók). A 3B osztály (5–500 mW) közvetlen és szórt sugárzás esetén is káros. Védőszemüveg kötelező (pl.: ipari/orvosi lézerek). A 4. osztály súlyos szem- és bőrkárosodást, valamint tűzveszélyt okozhat. Védőfelszerelés és szigorú biztonsági intézkedések szükségesek (pl.: ipari anyagmegmunkáló lézerek) [10, 11, 13].

A lézergépgyártók kiemelt figyelmet fordítanak arra, hogy termékeik megfeleljenek a legszigorúbb biztonsági előírásoknak, ezért törekednek arra, hogy a forgalomba hozott berendezéseik az 1. osztályba tartozzanak, így rendeltetésszerű használat mellett nem jelentenek veszélyt a felhasználókra [1, 10, 12]. Fontos megjegyezni, hogy az eredetileg magasabb veszélyességi osztályba tartozó berendezések biztonsági burkolatának eltávolítása esetén (karbantartás folytán) a berendezés tényleges lézerosztálya magasabbra változik, és így jelentős biztonsági kockázatot jelenthet az ott-tartózkodók számára [5, 10].

3. Biológiai károsodások és védekezés

A cikk küldetése, hogy megismertesse az olvasóval a szórt lézersugár biológiai szervezetre gyakorolt hatásait. A veszélyeztetett szervek, szervrendszerek a szem és a bőr. Minden esetben

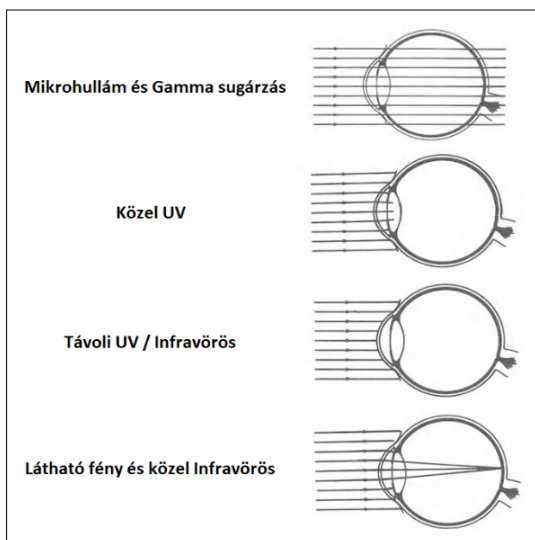
biztosítani kell akkreditált védőeszközöket az előírások és törvények betartása mellett [14].

Az emberi test legérzékenyebb szerve a szem a sugárzás szempontjából, ezért elsődleges fontosságú a megfelelő védőeszközök biztosítása a munkavégzés során [4, 5, 10]. Az 5. ábra szemlélteti, hogyan reagál a szem különböző sugárbehatásokra.

Láthatjuk, hogy a CO₂-lézerek infravörös tartományú sugárzása (10600 nm) a szaruhártyában abszorbeál, annak szerkezetét és a csarnokvíz összetételét módosíthatja, rövid expozíció esetén reverzibilis folyamat [1, 12]. A közeli infravörös tartományban nem ilyen kedvező a helyzet: jellemző hullámhosszát képes közvetíteni a szemlencse szerkezete, fókuszálva a retinára, mely lokális koagulációhoz vezethet [3, 4, 11]. Ezért speciális védőszemüvegeket fejlesztettek ki, amelyek különböző törésmutatójú lencsékkel rendelkeznek attól függően, hogy milyen hullámhosszú sugárzást kell kiszűrniük. Az ilyen termékekre vonatkozó legismertebb szabvány az EN 207:2020, amely szigorú követelményeket ír elő, szemben az amerikai megfelelőjével (ANSI Z136.1), ami csak az optikai sűrűség meghatározására tér ki [4, 5, 6].

Az optikai sűrűség (Optical Density) a lézersugárzás elleni védelem hatékonyságát jelzi, amelyet a védőszemüvegek piacra kerülés előtt különböző tesztekkel határoznak meg. Az OD értéke a sugárzás csillapításának logaritmikus mértéke:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{M_i}{M_t} \right), \quad (1)$$



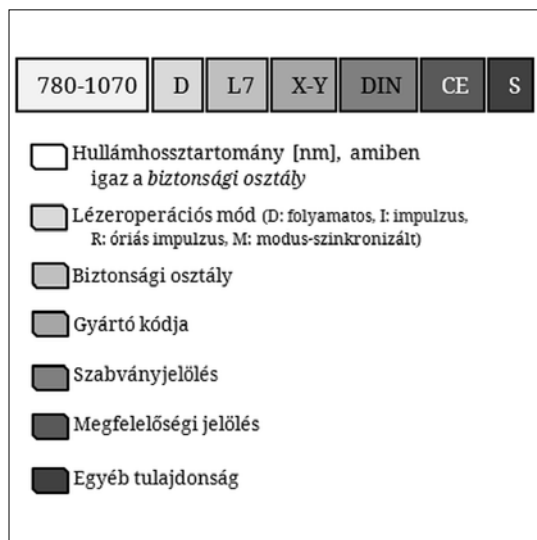
5. ábra. Sematikus ábra az emberi szem reakciójáról különböző sugárzásokra

ahol M_i a beeső sugár teljesítménye (W), M_t pedig a továbbított sugár teljesítménye (W) [1, 4, 12]. Minél nagyobb az OD értéke, annál hatékonyabb a védelem, ugyanakkor a költségek is növekednek, ezért fontos a szükséges minimális védelmi szint meghatározása [12]. Az OD és a maximálisan megengedett expozíció (Maximum Permissible Exposure; J/m²) között a következő összefüggés áll fenn:

$$OD = \log_{10} \left(\frac{E}{MPE} \right), \quad (2)$$

ahol E az expozíció mértéke (J/m²). A megfelelő védőszemüveg kiválasztásához figyelembe kell venni a lézergép működési paramétereit, mint a hullámhossz, teljesítmény (P ; W), nyalábátmérő (A ; mm²) és üzemmód [4, 12]. Az EN 207:2020 szabvány táblázata segít a minimális biztonsági osztály meghatározásában, amelyet a szemüvegnek teljesítenie kell a biztonságos használatához. A védőszemüvegek műszaki dokumentációjában található diagramok az adott hullámhosszhoz tartozó áteresztőképességet és optikai sűrűséget mutatják, így ezek figyelembevételével lehet kiválasztani a megfelelő védőeszközt [5, 6, 12]. Védelemmaximalizálás érdekében pajzskivitelű eszközt válasszunk, hogy az archórt is védjük, és hogy semmilyen irányból ne juthasson sugárzás a szembe [5, 8, 9]. A védőszemüvegek jelölésrendszerét a 6. ábra mutatja [15].

Lézervédelmi szemüvegek lencsési készülhetnek üvegből és polikarbonátból. Az üveglencsék kiváló fényvezető képességgel rendelkeznek, így



6. ábra. Lézervédelmi szemüvegek jelölésrendszere az EN 207 szerint

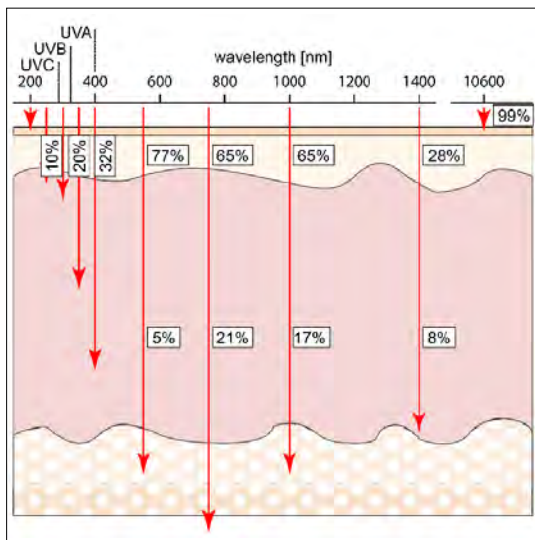
nagyobb látható fényáteresztést (Visible Light Transmission) biztosítanak, azonban ezek drágábbak, nehezebbek és törékenyebbek. Ezzel szemben a polikarbonát lencsék költségköltséghatékonyabbak, könnyebbek és ütésállóbbak, viszont kevesebb látható fényt engednek át [4]. Ergonómiai szempontok miatt érdemes a VLT értékét 35% föléltetni választani [4, 5, 8].

A lézervédő szemüvegek lencséire vékony réteget juttatnak föl a szűrőteltjesítmény fokozásáért. A legelterjedtebb bevonási eljárások közé tartozik az elektronsugaras porlasztás, amely során a bevonóanyag (SiO_2 , HfO_2) vákuumban történő elpárolgatásával hoznak létre vékony rétegeket az optikai felületeken. Ezt az eljárást gyakran egészítik ki ionasszisztált bevonással, amely az ionnyaláb segítségével tömöríti a bevonatot, csökkentve annak porozitását és növelve a lézerállóságot. Az ionsugaras porlasztás további előnyt nyújt azért, hogy rendkívül sűrű és alacsony szórású rétegeket eredményez (Al_2O_3 , Ta_2O_5), ezáltal növelve a védőszemüvegek tartósságát és optikai teljesítményét. A megfelelő anyagválasztás kulcsfontosságú, hiszen az optikai rétegeknek nemcsak a lézersugárzás ellen kell védelmet nyújtaniuk, hanem biztosítaniuk kell a megfelelő fényáteresztést és látási komfortot is. Az MLD, vagyis multirétegű dielektromos rácsok (SiO_2 és HfO_2 kombinációja) lehetővé teszik, hogy a szilárdtestlézerekhez készült védőlencsék optimálisan kombinálják a nagy optikai sűrűséget a minimális fényvesztéssel. Az egyes rétegek vastagsága

és az alkalmazott anyagok törésmutatója gondos tervezést igényel annak érdekében, hogy a végső bevonat hatékonyan csökkentse a veszélyes visszaverődéseket és maximalizálja a védelmet [4, 12].

Az emberi bőr természetes védelmet nyújt a környezeti hatásokkal szemben, azonban a mesterséges sugárzás ellen kevésbé hatékony. A különböző hullámhosszú lézersugárzás különböző mélységig hatolhat a bőrbe, és ennek megfelelően eltérő károsodási mechanizmusokat okoz [4, 10, 11]. A 7. ábra szemlélteti, hogy jelentős különbség van az egyes lézertípusok hatása között.

A CO_2 -lézer (10,6 μm hullámhossz) sugárzása csak a bőr felső rétegéig hatol, ahol hővezetés révén okoz károsodást. A szövet túlmelegedhet, ami koagulációhoz vezethet [12]. Ezzel szemben a szilárdtestlézerek egy nagyságrenddel rövidebb hullámhosszú sugárzása mélyebben behatol a bőrbe, ahol a szövetekben lévő víz elpárolgatásával és a vérben levő hemoglobin (Fe^{2+} és Fe^{3+} ionok) túlgerjesztésekor bekövetkező „vérsejt-robbanás” okoz károsodást [4, 9, 11]. Utóbbi a vérrögök kialakulásához vezethet, mely például a szem hajszálereit könnyen elzárhatja [4, 12]. A bőrsérülések megelőzése érdekében a test minden részét megfelelő védőruházattal kell fedni. A ruházat anyagának el kell nyelnie a lézersugárzást anélkül, hogy károsodna [5, 9, 10]. CO_2 -lézerek esetén a hagyományos marhabőr hegesztőruházat megfelelő védelmet nyújt. Szilárdtestlézerek ellen speciális, kompozitanyagokból készült ruházat



7. ábra. Az emberi bőrbe különböző sugárzások behatolási mélysége [15]



8. ábra. Ajánlott egyéni védőfelszerelések (internet)

szükséges, általában rozsdamentes acélszállal (reflektál) szőtt szövetek (abszorbeál) [12, 16]. Az emberi testet teljesen be kell borítani, így kabátok, nadrágok és kesztyűk is készülnek ilyen anyagokból [18]. Minden esetben ellenőrizni kell, hogy a védőfelszerelés megfelelő védelmet biztosít-e az adott lézertípus és -teljesítmény ellen [4, 10].

4. Környezeti megoldások

Az említett károsodások elkerülését erősíti az az elv, hogy minden lézerforrást az első csoportba tudhassuk [1, 10, 12]. Iparban használatos teljesítménylézerek CNC-rendszerekkel vezetik a sugarat kötött munkaterületen, mely kijelöli a berendezés határait, könnyedén elburkolható a külvilágtól [2, 12]. Kézi lézerforrások használatakor feltételezzük, hogy manuálisan vezérelt, így kezelője komoly szórt sugárzásnak van kitéve [5, 6, 9]. Hagyományos hegesztési technikák alkalmazásakor is elkerítik a munkaterületet, hogy azon a területen kívül tartózkodók ne szenvedjenek sérülést az UV-sugárzástól [3]. Az ilyen hegesztőállomásokot függönyökkel és paravánokkal kerítik el [3, 10]. Véleményem szerint ez nem elegendő NIR-sugárzás ellen, hiszen az ilyen rendszerek nem szigetelnek hermetikusan. Ennek ellenére léteznek kifejezetten ezen hullámhossz ellen alkotott hegesztőparavánok és függönyök. Ezek közül kiemelendők a lézeraktív rendszerek, amelyek össze vannak kötve a lézerforrással, és direkt sugárzás esetén leállítják a fotonok áramlását [5, 8, 17].

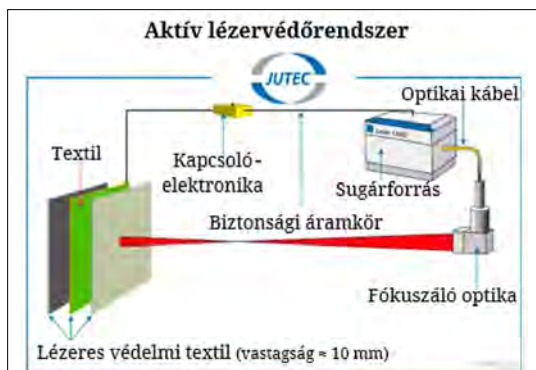
Ha sikerült bezárni egy „dobozba” a berendezést a kezelőjével, akkor megvédtük a munkatérrel kívüli levőket, viszont belül a különböző helyzetű, abszorpciós tényezőjű, felületi érdességű anyagok növelik a szórt sugárzás értékét, diffúzan tükröződik [4, 5, 9]. Mérséklésére különböző VANTA

BLACK-típusú festékeket használnak, de egyéb reflektálóanyag (Al) bevonatolása vagy szendvics-panelek felhasználása is jó megoldásnak bizonyul [3, 4, 12]. Utóbbi megoldásokat alkalmazzák lézerhegesztő konténerek készítésénél. A teljesen elburkolt hegesztőállomásnak legalább egy megfigyelő ablakkal kell rendelkeznie, hogy a munkaterületen kívül tartózkodók folyamatosan ellenőrizhessék az üzemeltető egészségi állapotát, és időben észlelhessék az esetleges baleseteket [4, 18]. Az ilyen ablakok kiválasztásakor a szemüvegeknél taglalt szempontokat kell figyelembe venni [12].

A lézerhasználati területeken a hozzáférés-szabályozás kulcsfontosságú, gondoskodni kell az egyértelmű figyelmeztető jelzések (figyelmeztetések és kötelezettségek; 4. ábra) és beléptető-rendszerek elhelyezéséről. Intézkedések, például reteszelvek vagy zárt ajtók javasoltak az illetéktelen behatolás megelőzése érdekében [4, 8, 18]. Fontos környezeti tényezők közé tartozik a megfelelő megvilágítás és szellőzés. Fémek lézerrel való megmunkálásakor az alapanyag túlgerjesztése miatt fémgőz és egyéb füstgázok keletkeznek, melyek komoly légúti megbetegedésekhez vezethetnek [1, 4, 10]. A munkatér teljes szellőztetése, vagy lokális elszívás javasolt [16, 18]. A teret úgy kell megtervezni, hogy megfeleljen a biztonsági protokolloknak, és a sugárutakat úgy kell kialakítani, hogy elkerüljék a véletlen expozíciót. Nagy teljesítményű lézergépek üzemeltetéséhez sugárfelelőst kell választani [4, 10, 18].

5. Összefoglaló

Manapság egyre több felhasználó fordul a kézi lézerforrások felé sokoldalú alkalmazhatóságuk és alacsony beruházási, üzemeltetési költségei okán. Kis méretük és rugalmas sugárvezetésük révén könnyen kezelhetők, valamint kollaboratív robotkarokra is integrálhatók, ami növeli a termelékenységet és a folyamatok automatizálhatóságát [2, 5, 6]. Bár kedvező árú és sokoldalúságuk miatt egyre népszerűbbek, biztonsági szempontból kihívásokat jelentenek, mivel használatuk során a kezelő közvetlenül ki van téve a szórt lézersugárzásnak [4, 10, 11]. A megfelelő védelem érdekében fontos a munkaterület elhatárolása megfelelő anyagokkal, a terület tervezésekor érdemes a LEAN-elveket szem előtt tartani [1, 12, 16]. A kézi lézerek biztonságos használatához nemcsak a megfelelő személyi védőfelszerelések – például speciális szemüvegek és védőruházat – elengedhetetlenek, hanem a munkakörnyezet



9. ábra. Lézeraktív rendszer sematikus ábrája [17]

átgondolt kialakítása is, amely magában foglalja a hozzáférés szabályozását, a veszélyforrások feltűntetését, a figyelmeztetőrendszerek alkalmazását és a megfelelő szellőzést a keletkező füstgázok eltávolítására [4, 10, 18].

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Elijah Kannatey-Asibu Jr.: *Principles of Laser Materials Processing. Developments and Applications*. 2nd edition, Wiley, Hoboken, NJ, 2023.
- [2] Buza Gábor: *Lézersugaras technológiák I.* Edutus Főiskola. Budapest, 2012.
- [3] Bitay Enikő: *Lézeres felületkezelés és modellezés*. Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2007.
<https://doi.org/10.36242/mtf-04>
- [4] Ken Barat: *Laser Safety: Tools and Training*. Second Edition, Taylor & Francis LTD, Broken Sound Parkway, 2017.
- [5] Halász Gábor: *A kézi lézeres berendezések biztonságos használata*. Hegesztéstechnika, XXXV/1. (2024) 41–47.
- [6] Gáti József, Kovács Tünde, Nagy Balázs: *Gépesített kézi lézeres hegesztés gyakorlati tapasztalatai*. Hegesztéstechnika, XXXIV/4. (2024) 43–47.
- [7] <https://www.techmonitor.hu/piacmonitor/az-optikai-szalas-lezer-es-a-co2-lezer-osszehasonlitas-a-20230310> (megtekintve: 2024.12.)
- [8] 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
- [9] Buza Gábor: *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
- [10] Bagyinszki Gyula: *Lézerek alkalmazásának technológiai és biztonságtechnikai szempontjai*. XI. Nemzetközi és IV. GTE-MHtE-DVS Hegesztési Konferencia, Budapest, 2004. augusztus 23–26., 14–29.
- [11] Andraws Andrew, Kovács-Coskun Tünde: *Lézervágás biztonságtechnikai kérdései*. Műszaki Tudományos Közlemények, 5. (2016) 65–68.
<https://doi.org/10.33895/mtk-2016.05.07>
- [12] Roy Henderson, Karl Schulmeister: *Laser Safety*. 1st edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2003.
- [13] EN 60825-1: Safety of Laser Products - Part 1: Equipment Classification and Requirements, 2014.
- [14] 2012. évi I. törvény a munka törvénykönyvéről: 51. § és 86. §
- [15] EN 207:2017: Personal Eye-Protection Equipment - Filters and Eye-Protectors against Laser Radiation (Laser Eye-Protectors)
- [16] Penny J. Smaller: *Laser Safety: Risks, Hazards, and Control Measures*. Laser Therapy, 20/2. (2011) 95–106.
- [17] <https://www.jutec.com> (megtekintve: 2024.11.)
- [18] California Institute of Technology: *Laser Safety Manual*, Caltech Environmental Health and Safety Office, California, 2023.



ACÉLSZERKEZETEK A MŰEMLÉK ÉPÜLETEK FELÚJÍTÁSÁBAN

STEEL IN ARCHITECTURAL HERITAGE PROTECTION

Nagy Zsolt,¹ Kelemen Andrea,² Sánduly Annabella³

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, zsolt.nagy@dst.utcluj.ro

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, andrea.kelemen@gordias.ro

³ Lodzi Műszaki Egyetem, Łódź, Lengyelország, annabella.sanduly@dokt.p.lodz.pl

Abstract

The current article presents some steel structural solutions implemented in archaeological and architectural heritage protection applied in Romania using case studies. The paper summarizes also some of the engineering challenges of the project team during the design process.

Keywords: *steel structure, design challenges, historical monument, ruin protection.*

Összefoglalás

Cikkünk néhány acélszerkezeti megoldást mutat be esettanulmányok segítségével, amelyeket Romániában alkalmaztunk régészeti és építészeti örökségvédelem során. A tanulmány bemutat pár, a tervezési folyamat során a projektszempont előtt álló mérnöki kihívást is.

Kulcsszavak: *acélszerkezet, tervezési kihívások, műemlék, romvédelem.*

1. Bevezetés

Az épített örökség megőrzése napjainkban egyre inkább interdiszciplináris megközelítést igényel, amelyben az építészeti, régészeti és mérnöki tudományterületek szoros együttműködése elengedhetetlen. E kontextusban az acélszerkezetek korszerű megoldásokat kínálnak a történeti értékkel bíró épületek és régészeti lelőhelyek védelmére. Az acélszerkezetek alkalmazása lehetőséget teremt ideiglenes vagy állandó megerősítések kialakítására, a meglévő épületszövet minimális beavatkozással történő tehermentesítésére, illetve transzparens, mégis tartós lefedések és szerkezeti elemek létrehozására. Az ilyen jellegű beavatkozások azonban komoly mérnöki és műemlékvédelmi kihívásokat is felvetnek, hiszen a kortárs szerkezeti megoldásoknak összhangban kell lenniük az örökségvédelmi szempontokkal és az adott helyszín történeti kontextusával. Dolgozatunk 4 olyan esettanulmányt összegez, amelyek tervezése és kivitelezése során a szerzők sikeresen alkalmaztak acélszerkezeteket.

2. Esettanulmányok műemlékek és régészeti romok védelmére

Egyedi projektek során gyakran olyan gyakorlati megoldások és döntések születnek, amelyek nem találhatók meg a szabványos kézikönyvekben vagy elméleti tananyagokban. Az esettanulmányok lehetővé teszik e tapasztalatok rendszerezett és reflektált formában történő közlését. Az olyan komplex területeken, mint az épített örökség védelme, az esettanulmányok segítenek feltárni, hogyan működhet együtt az építészet, mérnöki tudomány, műemlékvédelem és régészet. Továbbá, új anyagok, szerkezeti rendszerek vagy tervezési módszerek gyakran először egyedi projektekben kerülnek kipróbálásra.

2.1. A tordai castrum

Az első esettanulmány a romániai Tordán (ókorin nevéen Potaissa) található V. Macedonica római légió erődjének régészeti maradványait védő építészeti beavatkozást mutatja be, kiemelve az alkalmazott acélszerkezeti megoldásokat és a

tervezés során felmerülő mérnöki kihívásokat. A projekt célja egy nagy fesztávú fedőszerkezet létrehozása és az arra részben felfüggesztett járófelületek megoldására kialakított acélépítmény létrehozása volt, amely egyrészt védi a feltárt romokat az időjárási hatásokkal szemben, másrészt lehetővé teszi a látogatók számára a lelőhely közvetlen megtekintését anélkül, hogy az károsodna. A mintegy 40,35 méter széles és 70,35 méter hosszú lefedés egy felfüggesztett járófelületi rendszer is magában foglal, amely négy irányban – két hosszirányú és két keresztirányú –, összesen mintegy 230 méter hosszúságban biztosít gyalogos közlekedést. A beavatkozás során különös figyelmet kellett fordítani a történeti kontextus megőrzésére, a minimálisan invazív megoldások alkalmazására (például a romok közé befűrt acél mikrocölöpök alkalmazása kisebb alapok kialakítása céljából), valamint a szerkezeti stabilitás és a látogatói biztonság egyidejű biztosítására. A tanulmány részletesen elemzi a projektcsapat által alkalmazott műszaki megoldásokat, valamint azokat a komplex kihívásokat, amelyek az örökségvédelmi szempontok és a korszerű mérnöki tervezés integrálása során merültek fel. Részletesen az [1]-es tanulmányunkban írtunk erről a munkáról.

A bemutatott projekt arra is nagyon jó példa, hogy kiemeli azokat a szerepeket, amelyeket a szerkezet tervezőmérnöke egy adott építkezési projekten belül betölt [2].

2.2. Bolyai utca 11.

A második esettanulmány egy történelmi épület rehabilitációs folyamatát mutatja be, melynek helyszíne Marosvásárhely városközpontjához kötött, amelynek során az eredeti, barokk stílusú tetőszerkezet formáját egy korszerű fémszerkezet alkalmazásával rekonstruáltuk. A tanulmány elsősorban a tetőszerkezet és a fémszerkezet

feljárólépcső tervezésére fókuszál. Az összetett formájú, több tetősíkkal rendelkező, szabálytalan geometriájú tetőszerkezetet méretezni, részletezni kellett, majd a megerősített téglafalakra lett elhelyezve. A fő közlekedő lépcső – amely acéllemezről készült, és különleges statikai rendszerrel rendelkezik – fejlett számítási módszereket igényelt ellenőrzés céljából. Cikkünk [3] ismerteti azokat a mérnöki kihívásokat, amelyek a tervezés és kivitelezés során merültek fel, valamint ezek megoldásait: 3D-szkenneléssel készített felmérés szolgált referenciarendszerként az acélszerkezeti egység számára (2. ábra); kezelni kellett a téglafal és acélszerkezet közötti illesztési eltéréseket; valamint a szabálytalan geometria kialakítását a terepi adottságokból fakadó korlátozások figyelembevételével kellett megoldani.

A projekt tervezési és kivitelezési fázisában alkalmazott módszerek kiemelkedően fontos szerepet játszottak az összetett geometriai és szerkezeti kihívások kezelésében. Egy ilyen bonyolultságú szerkezet méretezése és részletezése gyakorlatilag kivitelezhetetlen lett volna korszerű, digitális technológiák alkalmazása nélkül. A meglévő állapot pontos felmérése lézerszkennelési technológiával történt, amely nagy felbontású adatokat szolgáltatott az épület aktuális geometriai konfigurációjáról, valamint azokról a kivitelezés közben keletkezett eltérésekről, amelyek jelentősen befolyásolták a szerkezeti tervezést. Az így létrejött háromdimenziós pontfelhő alapjául szolgált a digitális modellépítésnek és a részlettervezésnek.

A projekt során BIM- (Building Information Modelling) alapú szoftverkörnyezetet alkalmaztunk, amely lehetővé tette a különböző szakterületek – például statikus mérnökök, építészek, gépészek – hatékony együttműködését egy közös, térbeli modellben. Ez a modell tartalmazta az összes releváns szerkezeti, geometriai és anyagjellemzőt,



1. ábra. A tordai castrum fénypompában a Múzeumok éjszakáján (Forrás: TurdaNews)



2. ábra. A marosvásárhelyi Bolyai utca 11. épületének 3D-modellje

és lehetőséget adott a valós idejű koordinációra és az esetleges ütközések megelőzésére.

Kihívást jelentett a véletlenszerűen tájolt szerkezeti elemek részletezése egy pontos vonatkoztatási rendszer hiányában. E probléma megoldására a projektcsapat saját koordinátarendszert alakított ki, ehhez igazítottuk az acélszerkezeti elemek háromdimenziós illesztési pontjait. Az elemek helyzetét, orientációját és alakját több lépcsőben, ismételt lézerszkennelések segítségével ellenőriztük, biztosítva ezzel a végleges modell pontosságát és a gyártási hibák elkerülését.

A módszertan egyik legfontosabb tanulsága, hogy a különböző szakterületek célkitűzései időnként eltérő vagy ellentmondásos szempontokat tükrözhetnek. A projekt sikere nagymértékben a felek közötti nyitott kommunikáción, a multidiszciplináris együttműködésen és a kompromisszumos megoldások kidolgozásán múlott.

2.3. A sebesvári vár felújítása

A harmadik esettanulmány a sebesvári középkori várrom (román nevén Bologa) látogatók előtti megnyitását és az ezt feltételező biztonságossá tételének tervezési munkáit mutatja be. A **4. ábra** a Gordias mérnöki iroda által készített szerkezeti modellt és a bástya jelenlegi állapotát mutatja.

A munkálatok során a vár területét megtisztították a burjánzó növényzettől, kijavították a falakat, tereprendezési munkálatokat végeztek, a falkoronát gyeptéglával szigetelték, feljárókat építettek, és belülről is látogathatóvá tették az öregtoronyt acélszerkezetű építmények segítségével. A felújítást végző cég a hiányzó falrészeket részben visszaépítette, olyannyira, hogy ha néhány száz évet hirtelen visszamennénk az időben, s ellenséges

sereg közeledne, jelenlegi állapotában a vár készen állna egy ostrom visszaverésére **[4]**.

Az acélszerkezetek szerepe a sebesvári középkori várrom látogathatóvá tételében több szempontból is kulcsfontosságú, különösen ha figyelembe vesszük a műemléki környezet komplex kihívásait. Az alábbi pontokban összefoglalható, hogy miért tekinthető az acél ideális választásnak ebben a projektben:

– *Reverzibilitás és minimális beavatkozás:*

A műemlékvédelem egyik alapelve, hogy a beavatkozások legyenek visszafordíthatók (reverzibilisek), azaz ne tegyenek visszavonhatatlan változtatásokat az eredeti szerkezeten. Az acélszerkezetek jól illeszkednek ehhez az elvhez, mivel pontszerűen rögzíthetők, kis beavatkozási felülettel, és szükség esetén könnyen eltávolíthatók.

– *Nagy teherbírás kis keresztmetszettel:*

Egy romos vár esetén korlátozott a terhelhetőség – az évszázados falak nem viselhetnek el bármekkora plusz terhelést. Az acél nagy teherbírású, mégis könnyű és karcsú szerkezeteket tesz lehetővé, amelyek nem terhelik túl a meglévő falazatot.

– *Statikai stabilitás nehéz terepen:*

A középkori várak gyakran meredek, nehezen megközelíthető helyszíneken épültek. Acélszerkezetekből jól kialakíthatók ideiglenes vagy állandó hidak, lépcsők, járófelületek, amelyek minimálisan terhelik a talajt vagy a romokat, ugyanakkor lehetővé teszik a biztonságos közlekedést a látogatók számára.

– *Illeszkedés a kortárs értelmezéshez:*

A modern beavatkozásnak gyakran az a célja, hogy vizuálisan is megkülönböztesse magát az



3. ábra. A marosvásárhelyi Bolyai utca 11. épületének tetőszerkezete építés közben



4. ábra. A tervezett és a kivitelezett bástya lépcsőinek szerkezete

eredeti szerkezettől. Az acél anyaghasználata, letisztult formavilága jól illeszkedik a kortárs építészeti nyelvezethez, miközben nem próbálja utánozni a történeti megjelenést – ezzel tisztelőben tartva az autenticitás elvét.

–Előregyárthatóság és gyors szerelhetőség:

A nehezen megközelíthető helyszínek miatt fontos, hogy a szerkezetek előregyárthatók és gyorsan szerelhetők legyenek a helyszínen. Az acélszerkezetek pontosan megfelelnek ennek az igénynek: üzemben gyárthatók, és helyszíni munkával gyorsan összeállíthatók.

Összegzésként, habár ennek a munkának az esetében szükséges volt a helyszíni hegesztéseket is alkalmazni, sikerült esztétikusan megoldani az elemek illesztését és egy kellemes látványt biztosítani a látogatók számára (**6. ábra**).

2.4. Szent Mihály-templom toronylépcső

A negyedik esettanulmány a kolozsvári Szent Mihály-templom tornyának látogathatóvá tételét feltételező acéllépcsők tervezési munkáinak összefoglalóját mutatja be. A **7. ábra** a Gordias mérnöki iroda által készített vizualizációs képet és a kivitelezés alatti munka egy köztes fázisát, valamint a végső állapotot mutatja a javasolt lép-

csőszerkezetről, tükrözve a kiviteli munkákban okozott nehézségeket is a szűk tér, valamint a munkafelületekhez való hozzáférés hiánya miatt.

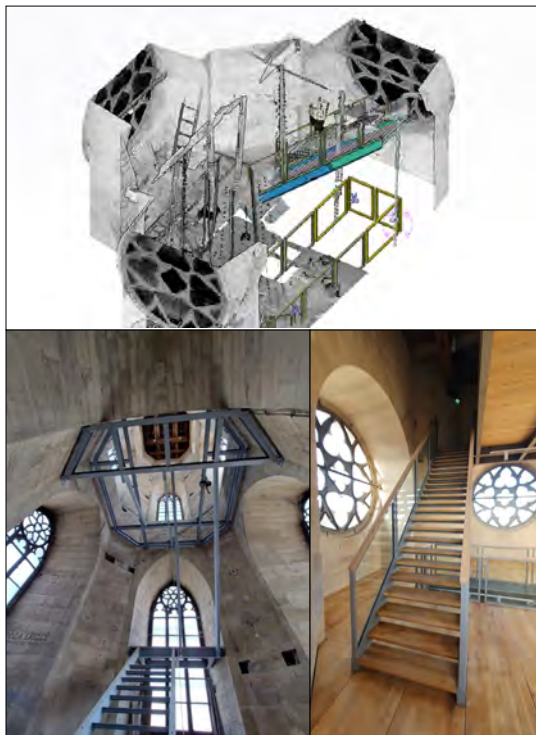
A torony felújítása során a korábbi felméréseknél súlyosabb szerkezeti problémákra derült fény. A 19. századi neogótikus torony építéséből származó jelentős önsúly miatt a középkori falrészekben 20 cm-es süllyedés volt észlelhető, amely a 3D-szkennelés alapján lett mérhető. Ezek a problémák az új, acélszerkezetű lépcső tervezését és kivitelezését is befolyásolták, mivel a szerkezetek „szabásának” tökéletesen alkalmazkodnia kellett a meglévő falak állapotához, szabálytalan síkjaihoz, és a süllyedésekből származó szintkülönbségekhez is. A korlátozott terek miatt a lépcső szerkezetének darabjait kétkezi erővel is beemelhető alkotóelemek kialakítását kellett lehetővé tenni. A Szent Mihály-templom toronylépcsőinek felújítása és a torony látogathatóvá tétele hozzájárult a templom kulturális és vallási szerepének erősítéséhez, miközben biztosította a műemlék megőrzését, és a látogatók számára is élvezetes élményt nyújt. A Szent Mihály-templom felújítása a megőrzés és adaptív újrahásznosítás kategóriában 2024-ben Europa Nostra (Európai Örökség)-díjat kapott.



5. ábra. A sebesvári vár felújítás előtti állapota



6. ábra. A sebesvári vár felújítás utáni állapota



7. ábra. A tervezett és a kivitelezett lépcsők szerkezete (köztes és végső fázis)

3. Kortárs szerkezeti beavatkozások műemléki környezetben

A négy tárgyalt esettanulmány – különböző történeti korszakokból származó, eltérő funkciójú épített örökségi elemekhez kapcsolódva – közös alapelveket, tervezési stratégiákat és mérnöki válaszokat vonultat fel. Ezek az esetek jól példázzák, hogyan találkozik a kortárs statikai gondolkodás a műemlékvédelem eszmerendszerével a 21. századi elvárások tükrében.

A tordai castrum és a sebesvári várrom látogathatóvá tételének elsődlegesen a történeti struktúrák fizikai védelmét és a turisták számára való hozzáférhetővé tételét célozták.

A Szent Mihály-templom toronylepcsőinek rekonstrukciója és a Bolyai 11. barokk tetőszerkezet újjáépítése ezzel szemben a meglévő műemlékek funkcionális megújítására koncentráltak – a kulturális élmény, valamint a használhatóság újraformálásával.

Mind a négy projekt esetében az acélszerkezet nem pusztán építéstechnikai választásként, hanem tartalmi állásfoglalásként jelenik meg: Karcúsága és szilárdsága révén az acél lehetővé teszi a minimális beavatkozást az eredeti szerkezetbe. Reverzibilitása és egyértelmű kortárs megjelenése révén biztosítja az új és a régi megkülönböztethetőségét – elkerülve az építészeti hamisítást. Előregyárthatóságának és könnyű szerelhetőségének köszönhetően jól alkalmazkodik nehezen megközelíthető vagy történetileg érzékeny helyszínekhez.

A digitalizált felmérési és tervezési eszközök döntő szerepet játszottak: A lézerszkennelés és pontfelhőalapú modellezés révén pontosan dokumentálhatóvá váltak az elmozdult, deformált vagy nem szabályos geometriák. A BIM-rendszerek alkalmazása lehetővé tette a különböző szakterületek közötti koordinációt, valamint a geometriailag bonyolult kapcsolatok pontos részlettervezését. Több esetben (pl. Szent Mihály-templom) a kivitelezés során feltárt, rejtett szerkezeti károk a tervezett megoldások folyamatos felülbírálását tették szükségessé.

Az eltérő anyagok (pl. kő és acél) csatlakozási részletei, valamint a statikai teherátadások finomhangolása komoly mérnöki innovációkat igényeltek.

4. Következtetések

A vizsgált esettanulmányok tükrében, az alábbi következtetések fogalmazhatóak meg:

4.1. Anyaghasználati szempontok – az acélszerkezetek előnyei műemléki környezetben

A sebesvári középkori várrom látogathatóvá tételének egyik legnagyobb kihívása az volt, hogyan lehet a történeti szerkezethez méltó módon biztosítani a mai kor elvárásainak megfelelő biztonságot és használhatóságot. Az acélszerkezetek alkalmazása több szempontból is indokolt és előnyös választásnak bizonyult:

- *Reverzibilitás:* az acélszerkezetek visszabontható, nem invazív megoldásokat tesznek lehetővé, ezáltal nem sértik a műemlék épségét, és később akár módosíthatók is.
- *Kis tömeg – nagy teherbírás:* a korszerű acélprofilok lehetővé teszik a könnyű, de statikailag stabil szerkezetek kialakítását, így nem terhelik túl a történeti falazatot.
- *Előregyártás és szerelhetőség:* az acélelemek üzemi környezetben gyárthatók, és gyorsan, minimális helyszíni munkával szerelhetők össze, ami különösen előnyös nehezen megközelíthető romterületeken.
- *Kortárs megjelenés:* az acél jól megkülönböztethető az eredeti kő és téglanyaghasználattól, így elkerülhető az építészeti hamisítás. Ezzel megfelel az ún. „anastylose” (megkülönböztethető helyreállítás) elvének is.

4.2. Kortárs szerkezeti megoldások a műemlékvédelemben – acélszerkezetek szerepe a sebesvári vár- és a tordai castrum-projektek esetében:

A látogatók biztonságos közlekedésének biztosítása érdekében a projekt során több helyen is acélszerkezeti beavatkozásra volt szükség. Ezek elsősorban a következő funkciókat látták el:

- Feljárók és járófelületek létesítése a vár különböző pontjaira, úgy, hogy azok ne terheljék túl a meglévő romszerkezetet.
- Kilátópontok, korlátok és kiegészítő építmények elhelyezése, amelyek a látogatói élmény részévé váltak, miközben biztonsági funkciót is betöltenek.
- Speciális rögzítési és illesztési technikák alkalmazása, amelyek lehetővé tették az eltérő anyagú (pl. kő és acél) elemek összehangolt kapcsolatát.
- Terepadottságokhoz való igazodás: a lejtős, sziklás terepen az acélszerkezetek flexibilitása lehetővé tette az egyedi illesztéseket és a testreszabott megoldások kidolgozását.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Nagy Zs., Kelemen A., Sánduly A., Moldovan P., Moldovan A.: *Acél a műemlékvédelemben: a Tor-dai Castrum*. XXVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia – ÉPKO, Csíksomlyó, Románia, 2024. 120–125.
<https://ojs.emt.ro/EPKO/article/view/1655>
- [2] Nagy Zs. (szerk.): *Rolul Inginerului Proiectant de Structuri*, Editura AICPS, 2022. ISBN 978-973-0-36192-6.
- [3] Nagy Zs., Nagy Ö., Kelemen A., Kiss Z., Ambrus Á., Calian C.-F.: *Proiectarea unei șarpante de formă barocă folosind structură metalică*. In: "Construiește cu STEEL" Lucrările celei de-a XVIII-a Conferințe Naționale de Construcții Metalice, Kolozsvár, Románia, 2024. 208-228.
<https://con-steel-resources.s3.eu-central-1.amazonaws.com/CM18-2024.pdf>
- [4] Pengő Z.: *Túraajánló karcsú kalandvagyóknak: felújították a sebesvári várat*. Maszol.ro portál
<https://maszol.ro/belfold/Turaajanlo-karcsu-kalandvagyoknak-felujitottak-a-sebesvari-varat?>
(letöltve: 2024. november 15.).



A NUMERIKUS MECHANIKA SZEREPE NAPJAINKBAN

THE ROLE OF COMPUTATIONAL MECHANICS TODAY

Páczelt István

¹ Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet, Miskolc, Magyarország, istvan.paczelt@uni-miskolc.hu

Abstract

With the proliferation of computers, mechanical problems arising in mechanical engineering practice can be effectively solved. Among the many numerical methods, the present article reports on the development of the finite element method, its development directions, its application possibilities, the importance of error estimation, the requirements supported by the programs and the author's experiences, presenting some numerical examples.

Keywords: *finite element method, approximation, accuracy, variational methods.*

Összefoglalás

A számítógépek elterjedésével a gépészmérnöki gyakorlatban felmerülő mechanikai problémák hatékony megoldására kerülhet sor. Számos numerikus eljárás közül a végelem-módszer kialakulásával, fejlődési irányával, alkalmazásának lehetőségeivel, a hibabecslés fontosságával, a programokkal szemben támasztott követelményekkel, saját tapasztalatokkal foglalkozik a jelen cikk, néhány számpéldát is bemutatva.

Kulcsszavak: *végelem-módszer, approximáció, pontosság, variációs módszerek.*

1. Bevezetés

A mechanika tudománya több évszázados múlt-ra tekint vissza, és ma sem veszít fontosságából. Sőt, a számítástechnikai lehetőségek bővülésével a valóságos viszonyok mind jobb leírására, modellezésére van lehetőség. A mérnök által meghatározott mechanikai modell megoldásának mikéntje jelentősen befolyásolja a sikert, a kapott eredmény valóságát. A jelen cikk az egyik legjelentősebb közelítő számítási eljárás: a végelem-módszer 70 éves múltjára, a közelítési módok lehetőségeire, a hibabecslés fontosságára hívja fel a figyelmet, továbbá saját tapasztalatok bemutatásán, gyakorlati problémák elemzésén keresztül szemlélteti a számítási módszer sokoldalúságát.

1.1. A mechanika kezdete

A bolygók mozgása már régóta izgatta az emberiséget: milyen pályán mozognak, miért látjuk azokat különböző pozíciókban az évszaktól függően, stb. Jelentős áttörést Nikolausz Kopernikusz (1473–1543) megállapításai (nem a Föld a világ

közepe), Johannes Kepler (1571–1630) nézetei a bolygók mozgástörvényeiről jelentettek, továbbá Galileo Galilei (1561–1642) szabadeséssel és a lejtőn való mozgással kapcsolatos kísérletei, Isaac Newton (1643–1727) által a gravitáció megértése, a mozgástörvények megalkotása, majd Gottfried Wilhelm Leibnitzhez köthetően (1646–1716) a differenciálszámítás megalkotása jelentették azt a matematikai alapot, amellyel a mozgások leírása tudományosan létrejöhett. Ezek után számosan, a középkor „óriásai”, Daniel Bernoulli (1700–1782), Leonhard Euler (1707–1783), Jean Le Rond d’Alembert (1717–1783), Joseph-Louis Lagrange (1736–1813), Johann Carl Friedrich Gauss (1777–1855), Simeon-Denis Poisson (1781–1841), Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836), Augustin Louis Cauchy (1789–1857), Sir George Biddell Airy (1801–1892), William Rowan Hamilton (1805–1865) Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887), Lord John William Strutt Rayleigh (1842–1919) voltak azok, akik jelenős mértékben járultak hozzá az ún. klasszikus mechanika kialakításához.

1.2. Mechanika az 1900-as évektől

Az ipar fejlődésével, a modern eszközök tervezésével fontos igényként jelent meg a megbízható szilárdsági, dinamikai számítások elvégezhetősége. Az egyszerűbb alakokra kidolgozott, pontos megoldásokat fel kellett, hogy váltsa valami közelítő módszer. Először Walter Ritznek (1878–1909), majd Boris Grigorievich Galerkinnek (1871–1945) sikerült variációs módszer révén a differenciálegyenlet-rendszert algebrai egyenletrendszerként kezelni. Eric Reissner (1913–1996) az elmozdulásmező mellett a feszültségmezőt is közelítette, ezzel az ún. többmezős variációs elvek kutatását indította el.

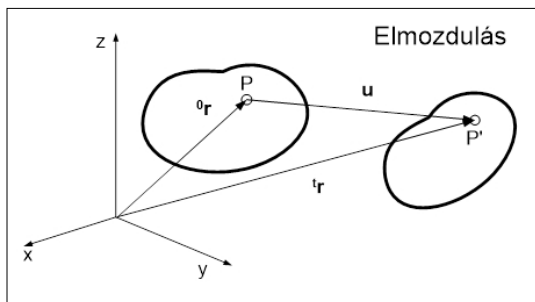
A szilárd testek mechanikájában az alábbi alapmennyiségekkel operálunk: elmozdulásmező $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t)$, alakváltozási tenzormező $\mathbf{A} = \mathbf{A}(x, y, z, t)$, feszültségi tenzormező $\mathbf{T} = \mathbf{T}(x, y, z, t)$, amelyek $3+6+6=15$ ismeretlen skalármezőt jelentenek a test tetszőleges pontjában. Meghatározásukra lineáris elmélet szerint az $\mathbf{A} = 0.5(\mathbf{u} \cdot \nabla + \nabla \cdot \mathbf{u})$ geometriai egyenlet, a $\mathbf{T} = \mathbf{T}(\mathbf{A}(\mathbf{u}))$ anyagtörvény és a $\mathbf{T} \cdot \nabla + \mathbf{b} = \rho \ddot{\mathbf{u}}$ mozgásegyenlet (időtől független esetben a $\nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{b} = 0$ egyensúlyi egyenlet) szolgál, a feszültségi $\mathbf{T} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{t}$, $\mathbf{r} \in S_t$ és a kinematikai $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t) = \mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{r} \in S_u$ peremfeltételekkel, továbbá dinamikai esetben az alábbi kezdeti feltételekkel:

$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0(x, y, z, t=0)$, $\dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}_0(x, y, z, t=0)$. Itt $\mathbf{u}_0$, $\mathbf{t}$, $\mathbf{u}_0(t=0)$, $\dot{\mathbf{u}}_0(t=0)$ adottak, ∇ nábla diff. operátor, „ $\cdot$ ”- a diadikus, „ $\cdot$ ” a skaláris szorzás jele, $\mathbf{n}$ a felületi normális vektora, S_p , S_u a felületi altartományok jele, $\mathbf{r}$ a helyvektor.

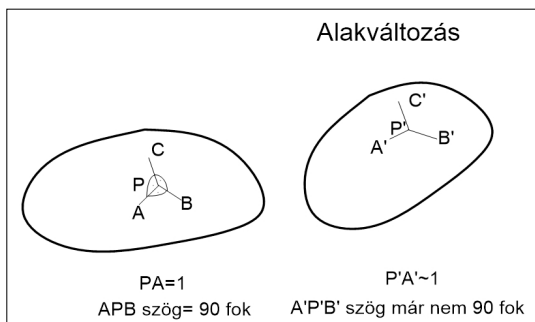
Ezen mennyiségeket szemléltetjük az 1–3. ábrán.

A 15 ismeretlen mező meghatározásra az elmozdulásmezőre, ill. a feszültségmezőre vonatkozó parciális differenciálegyenlet-rendszer vezethető le. Általában ezek pontos megoldása csak kevés geometriára és speciális peremfeltételekre adott.

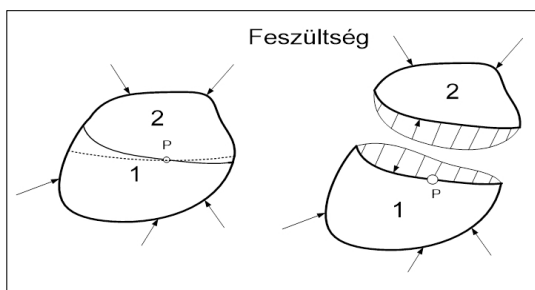
Ismeretes, hogy speciális geometria esetén a háromdimenziós, 3D-s feladatot redukálni lehet 1D-s, ún. rúd-, 2D-s lemez-, ill. héjfeladatokra. Rudaknál a Jacob Bernoulli-, a Stephen P. Timoshenko-féle (1878–1972) modellek terjedtek el, míg lemeznél a nyírási alakváltozást is figyelembe vevő Raymond David Mindlin-féle (1906–1987) modell, míg héjaknál a Paul M. Naghdi-féle (1924–1994) modell. A klasszikus lemez- és héjmodellek a Gustav Robert Kirchhoff-elvre (1824–1887) épülnek fel (a normális az alakváltozás során is merőleges marad meggömbült középfelületre).



1. ábra. Elmozdulási vektor



2. ábra. Alakváltozás érzékeltetése a P pontbeli kisérő trideren

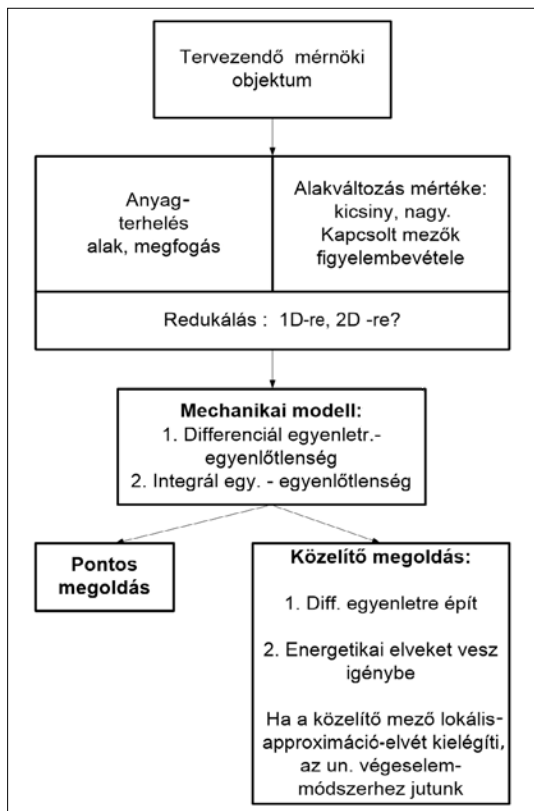


3. ábra. Az egyensúlyt biztosító, belső felületi megoszló terhelés, azaz feszültség

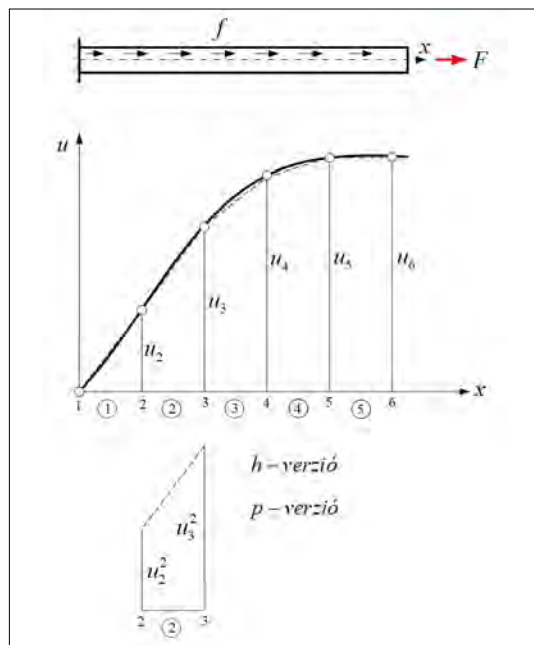
Ezekkel a modellekkel a mérnöki gyakorlatban számos feladatot sikeresen oldottak meg, oktatásuk a mai műszaki felsőoktatásban továbbra is létjogosult.

A gyakorlati életben a tervezés egy fontos oldala a megtervezendő objektum lényeges tulajdonságainak még a megvalósítás előtti előrejelzése, az optimális kialakítás elérése érdekében. Ehhez a mechanikai számítások megbízható elvégzése is szükséges, amihez egy modell kell elkészíteni. A 4. ábrán láthatjuk a különféle szempontok figyelembevételének lehetőségét.

A továbbiakban a közelítő megoldással kapcsolatos végeselem-módszer [1, 2, 3] történetét vizsgáljuk fel.



4. ábra. A modellezés főbb szempontjai



5. ábra. Elmozdulásmező közelítése végelem-módszerrel

2. Végelem-módszer

A módszer lényegét az 5. ábrán vázolt húzott rúd példáján keresztül lehet könnyen megmagyarázni. A rudat elemekre bontjuk fel, az elemek határán lévő pontokat csomópontoknak nevezzük. Ezekben a pontokban az elmozdulás legyen u_i , $i = 1, \dots, 6$. Közelítsük elemeken belül az elmozdulást lineáris függvénnyel (szaggatott vonal). Nyilván, ha több elemet veszünk fel, az elemeken belüli szaggatott, lineáris függvény közelebb kerül a ténylegeshez. Mivel kezdetben a megoldás nem ismert, ennek közelített függvényét a potenciális energia minimumelvből kaphatjuk meg, azaz algebrai egyenletrendszerből a csomópontbeli elmozdulásokat fogjuk kiszámolni. Érezzük, hogy több elemmel pontosabb megoldást fogunk kapni.

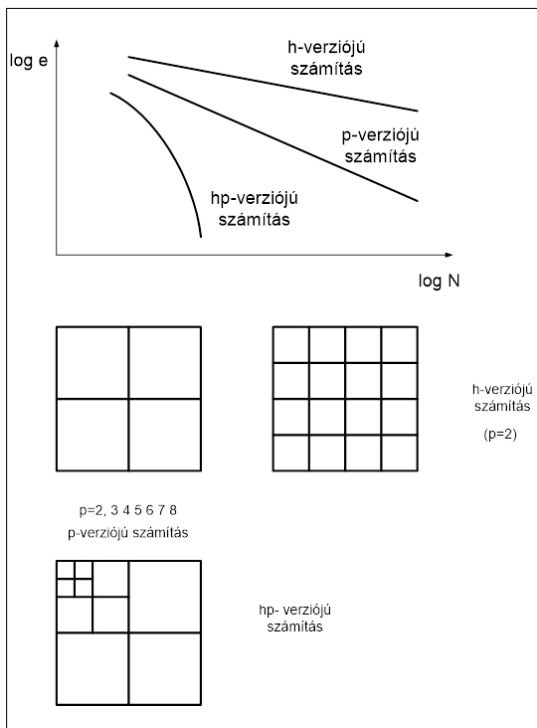
Mivel az elemek hossz méretét csökkentettük, ezt a közelítő megoldást h verziós számításnak nevezzük.

Egy másik megoldási mód is lehetséges. Nem az elemek számát növeljük, hanem az elemen belüli közelítő polinom fokszámát. Ezt a világon először 1973-ban Szabó Barna javasolta (jelenleg az MTA külső tagja, a St Louis-i Washington Egyetem professor emeritusa). Javaslata a matematikusok elkezdtek foglalkozni ezzel a p verziós közelítési módszerrel, vizsgálva a megoldás konvergenciájának a mértékét is. Azokat a felosztási technikákat, ahol a feszültségi szingularitási helyek környezetében az elemek méretét is csökkentik a foksám növelésével együtt, az eljárást hp verziójú számításnak nevezzük. Alakváltozási energiák hibájának log-értéke az ismeretlenek össz-számának log-értékében jelentősen, más és más függvény szerint változik, amit a 6. ábra szemléltet. A leglassúbb konvergenciával a h verziós technika rendelkezik [1, 2, 3]. Tehát érdemes a p , hp verziós számításokra alkalmas programokat használni konkrét feladatok megoldásakor.

Bizonyított [1], hogy a hiba $\|e\| \leq kN^{-\lambda}$ szerint számolható, ahol N a megoldandó feladat ismeretlenjeinek a száma.

Mivel az e -ben a pontos megoldás energiája sem ismert, továbbá a k és λ paraméterek sem, ezért a hiba mértékének becsléséhez minimum 3 számítást kell elvégezni különböző rendű approximációval.

A módszer kialakulásának történetével kapcsolatban megemlítjük, hogy az 1956-ban megjelent, M. J. Turner és társai által írt cikket tekintjük az elsőnek, majd 1960-ban R. W. Clough nevéhez kötődik a végelem elnevezés. Rövid időn belül számos nagy programrendszer nyert kidolgozást



6. ábra. A megoldás konvergenciája

(1964: ASKA, 1969: SAP, NONSAP, 1969: MARC, ANSYS, NASTRAN).

1967-ben kiadásra kerül az első, O. C. Zienkiewicz, Y. K. Cheung által írt, végelem-módszerrel kapcsolatos könyv. További programrendszereket alkottak: 1972 ABAQUS, ADINA, 1976 DYNA, 1980-as években SYSTUS, COSAR, LSDYNA, PROBE, StressCheck, RASNA, I-DEAS, COSMOS/M, FEAP, FLUENT, SYSWELD, ProCAST, DEFORM.

Elméleti vonalon 1981-ben a p , 1984-ban a hp verziós számítás konvergenciája nyert bizonyítást. 1991-ben a hierarchikus modellezés kap megfogalmazást, 2006-ba az ASME szabványosítja a végelem-program helyes használatának feltételeit, ill. 2012-ben elindul a számítás megbízhatóságának megfogalmazása.

Végelem-programokkal szemben megfogalmazott feltételek:

- Geometria kényelmes leírása (saját rendszerbeli programmal vagy más rendszerből átvett adatokra támaszkodva).
- Bő elemkészlet (alacsony és magas fokszámú elemek).
- Az automatikus elemfelosztás lehetősége.
- Megfogások, egyéb külső hatások egyszerű megadása.

- Speciális modellezési fogások lehetősége (pl. alszerkezet-technika).
- Anyagtörvények bő választéka.
- Lineáris, nemlineáris elméletek használati lehetősége.
- A terhelések széles választéka.
- Gyors számítás (többprocesszoros algoritmus, hatékony egyenletrendszer-megoldók: direkt megoldóval, ill. iterációval).
- Hibaanalízis. A számítás pontosításának lehetősége. Az eredmények kombinálása, grafikus szemléltetése.

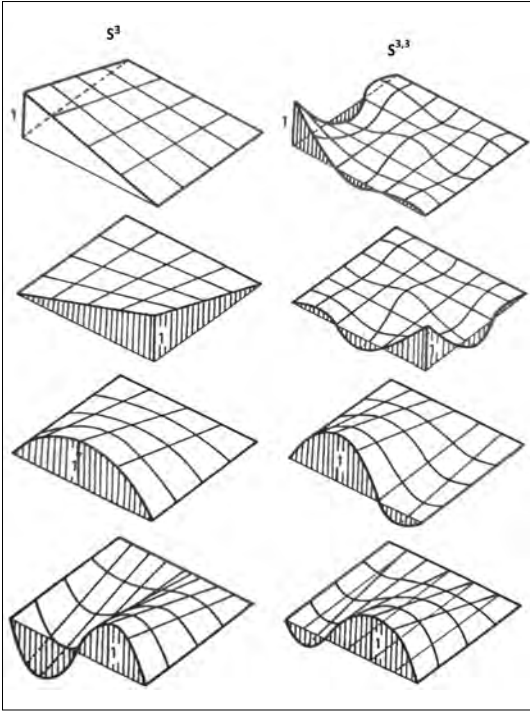
A kezdeti időkből a végelem-programrendszerek nagy központi számítógépekre voltak telepítve, amelyek terminálokon keresztül voltak elérhetők. A 80-as évektől kezdődően, a személyi számítógépek megjelenését követően a végelem közel került a felhasználóhoz, sőt a grafikai lehetőségek felhasználóbarátta tették a módszer használatát. A téma fontosságára tekintettel a felsőoktatási intézményekben külön kurzusokat szerveztek a módszer ismertetésére, annak számítógépes termekkel való közvetlen elérésére. Jelentősen megnövekedett a kutatás is új elemek, eljárások alkotására, ipari elterjesztésére fókuszálva. Számos konferencia szerveződött a végelemmel foglalkozók részére, gyümölcsöző kapcsolatok kiépítésére.

Tanszékünkön is számos program került kifejlesztésre az embargó akkori hátrányait leküzdendő: többek között kidolgozást nyert a héjak, tartályok számítására a TESZGA, autóbuszvázak számítására az AUTOBUSZVAZ (az AUTÓKUT támogatását is kihasználva), BANYAVAG a KBFI, LAPÁT a GANZ-MÁVAG részére, ROBOT és SIK a VIDEOTON részére, ABRONCS 1, 2, 3 a TAURUS megbízásából, továbbá a FEM3D, a bonyolult felépítésű rugalmas szerkezetek szilárdsági és dinamikai problémáinak a megoldására szolgáló, végelelemes programrendszer.

Érdekes összehasonlítani a klasszikus Lagrange-alakfüggvényekkel operáló, h verziós számításoknál használt négyszögletes elemek alakfüggvényeit és a p verziós számításokhoz használt, Legendre-függvényekkel, ill. az ezekből levonható számítástechnikai előnyöket, hátrányokat is elemezni.

A 7. ábra bal oldalán a p verziójú alkalmazott, az elem első oldalához kötött alakfüggvények láthatók, hasonlóan a jobb oldalon a Lagrange-függvényeket használó h verziós elem [3].

Látjuk, hogy a p verziójú a p növelésével, $p=1$ -hez a felső két ábra tartozik, $p=2$ -nél belép egy újabb négyzetes függvény, majd lentebb a



7. ábra. Alakfüggvények a p és h verziós elemeknél

7. ábrán a köbös függvény. Ha tehát $p=2$ -s a közelítés, az elemen csak a $p=1$ és $p=2$ -höz tartozó függvények dolgoznak, ha $p=3$ lesz, akkor újabb függvények lépnek be, nem elrontva a korábbiakat. Ez a h verziós, jobb oldalon vázolt esetben már nem áll fenn. Négyzetes közelítésnél a sarokpontokon kívül az oldalfelező pontok jelennek meg, azaz összesen nyolc pont, míg a köbös közelítésnél az oldalakon újabb 1-1, vagyis összesen 12 csomópontunk van, de a felvett alakfüggvények már nem azonosak a korábbiakkal, hiszen a Lagrange-függvények kötelesek a csomópontokban zérusnak lenni, kivéve egy pontot. Ez azt jelenti, hogy az alacsonyabb rendű közelítésnél kiszármolt merevségi mátrix már nem lesz felhasználható, míg a p verziónál a korábbi, az újabb egy részének fog megfelelni. Az a követelmény, hogy minimum 3 számítást végezzünk el, a p verziónál nagyon jól programozható (lásd pl. StressCheck program [4]).

Formálisan a diszkretizálás után a

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f} \quad (1)$$

differentiálegyenletet kapjuk, ahol $\mathbf{M}$ a tömeg, $\mathbf{C}$ a csillapítási, $\mathbf{K}$ a merevségi mátrix, $\mathbf{f}$ a terhelési vektor, $\mathbf{q}$ a csomóponti elmozdulások vektora (ismeretlen).

Nemlineáris (statikai) esetben a növekményekre vonatkozólag írható fel egyenlet

$$\mathbf{K}_T \Delta \mathbf{q} = \mathbf{f}_n - \mathbf{f}_{\sigma_n}. \quad (2)$$

A csomópontok elhelyezéséből adódóan a fenti mátrixok szalagstruktúrával rendelkeznek. A szalag sáv szélességének csökkentése a számítási idő csökkentését adja, emiatt sávcsökkentő eljárásokat is tartalmaznak az igényes végelem-programrendszerek.

A számításnál fellépő hibák csökkentésére automatikus hálójárasztási stratégiák is kifejlesztésre kerültek.

Nemlineáris feladatok külön osztályát jelöli ki a testek közötti érintkezési viszonyok tisztázása. Ekkor az érintkezési felületeken egyenlőtlenségek írhatók fel [5]. Tehát egyenlőtlenségi rendszert kell megoldani!

Ezek megoldására a matematikai programozás eljárásait, ill. speciális iterációs módszereket lehet alkalmazni érintkezési végelemek létrehozásával.

Az alakváltozás utáni hézag a testek között a szóba jöhető érintkezési tartományon (lásd 8. ábra):

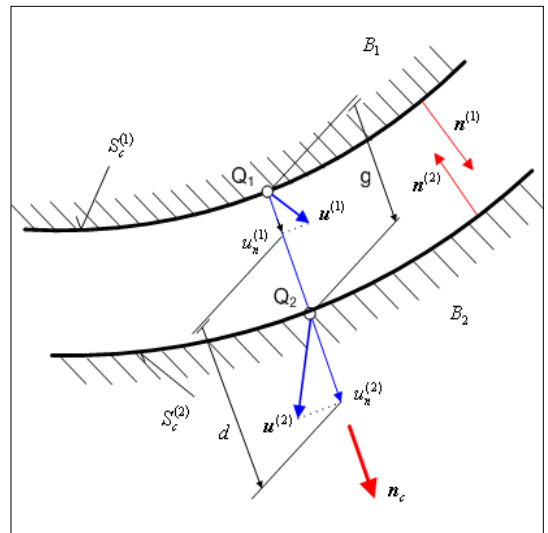
$$d = u_n^{(2)} - u_n^{(1)} + g \quad \mathbf{r} \in S_c = S_0 \cup S_p \quad (3)$$

Ha

$$d \geq 0, p_n = 0 \quad \mathbf{r} \in S_0 \text{ rész,}$$

$$d = 0 \quad p_n \geq 0 \quad \mathbf{r} \in S_p \text{ érintkezés,} \quad (4)$$

de $d p_n = 0 \quad \mathbf{r} \in S_c$



8. ábra. Érintkezési elmozdulások és a kezdeti rés g

3. Példák

Itt csak két egyszerűbb feladatot mutatunk be.

3.1. Hengeres testek érintkezése

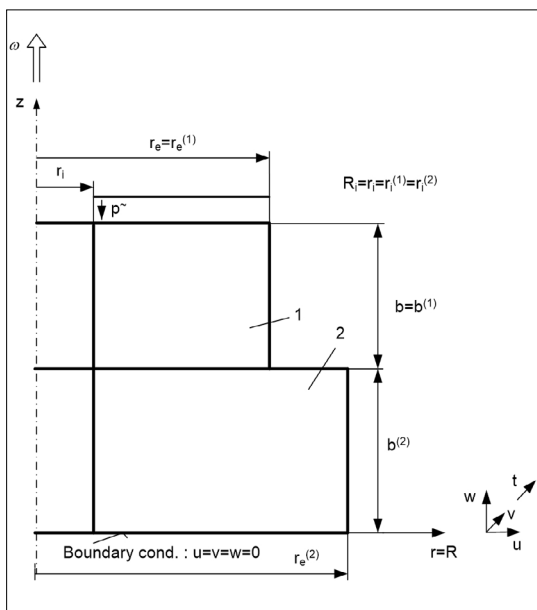
Vizsgáljuk két azonos anyagú hengeres test érintkezését. A belső furatok sugara $r_i = 20$ mm, a külsőké $r_e^{(1)} = 120$ mm, $r_e^{(2)} = 140$ mm, míg a magasságuk $b = b^{(1)} = b^{(2)} = 100$ mm (9. ábra). A B_1 felső henger alsó meridiánja az alábbi függvény-nel jellemzett:

$$g = 0,0035(r - 20)^2, \quad (5)$$

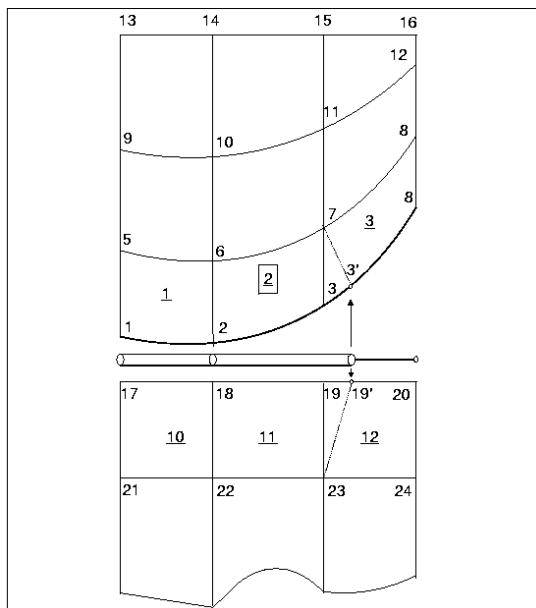
ami egyúttal a testek közötti kezdeti hézagnak felel meg. A testek anyagának Young-modulusa $E = 2 \cdot 10^5$ MPa és Poisson tényezője $\nu = 0,3$. A B_1 test felső peremének függőleges elmozdulása adott: $w_0 = 0,15$ mm.

A megoldást $p=8$ fokú végelemekkel modellezzük. A kezdeti hálót ún. mozgatási technikával módosítjuk oly módon, hogy az érintkezési határra essék a végelem csomópontja [6]. Ezzel a feszültségek oszcilláció-mentességét tudjuk elérni. A 10. ábrán az érintkezési tartomány vége nem esik egybe a 2. és a 11. elem jobb oldali végével, tehát el kell mozgatni a 3. és a 19. jelű csomópontokat. A 11. ábra ezt mutatja 7×5 -ös hálónál, illetve a σ_z normálfeszültség megoszlását láthatjuk a 12. ábrán.

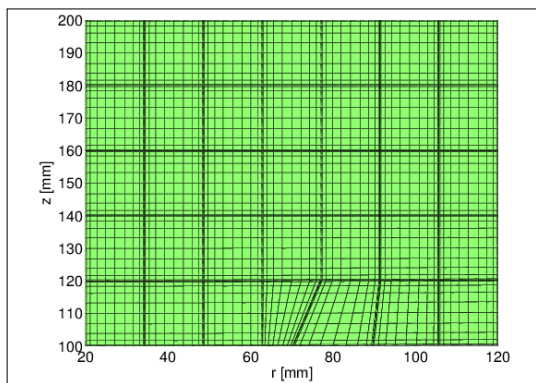
A további pontosító megoldási technikákat lásd a [7] alatti tanulmányban.



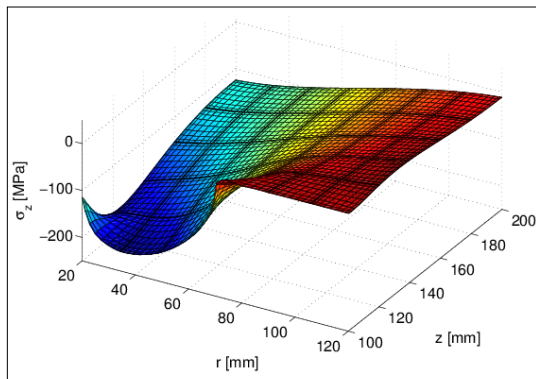
9. ábra. Két hengeres test érintkezése



10. ábra. A 3 → 3', 19 → 19' csomópontok mozgatása



11. ábra. Módosított 7×5 -ös háló, az érintkezési tartomány szélének sugara $r_p = 70,37$ mm



12. ábra. σ_z normálfeszültség megoszlása

3.2. Görgő lekerekítése

Az előzőekben leírtakhoz képest egy teljesen más típusú feladatot vizsgálunk most meg. Egy henger-görgő lekerekítését kell oly módon meghatározni, hogy a nyomás a meridián síkjában általunk megadott lefutású legyen. Ezt az érintkezési nyomás részleges vezérlésével tudjuk elérni [5, 8].

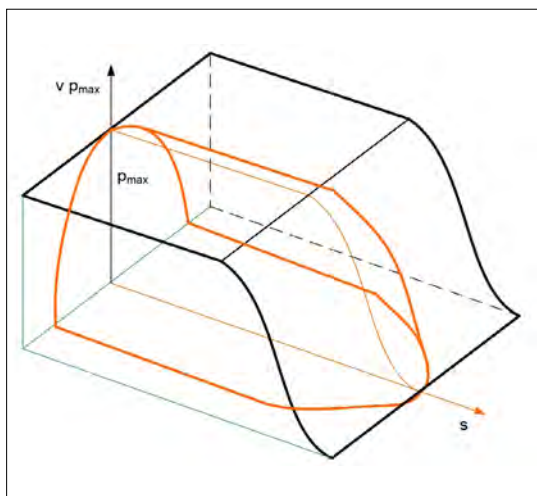
A módszer alapötletét jól mutatja a 13. ábra.

Van egy „háztetőnk”, amely alatt kell, hogy elhelyezkedjen a nyomás. Mivel a legnagyobb érték a meridiánsíkban lép fel, itt a nyomás hozzáér a háztetőhöz, a többi helyen alatta van. A meridiánsík-beli nyomás lefutását spline (Hermite-) függvényekkel írhatjuk elő. Ábrán a görgő fele látható. Az állandó szakasz hosszától függően különböző magasságú és lefutású nyomásokat fogunk kapni. A tervezőnek kell eldönteni, melyik variáns tartja a legjobbnak. Döntő lehet pl. görgőscsapágnál a kifáradási határ előírási kritériuma.

A 14. ábrán az optimalizálási feladat megoldásából kapott sugar változását, a meridiánba eső nyomást, az eredeti, állandó sugarú görgőnél kapott, a végén magasra emelkedő nyomást, ill.

az optimális, lekerekített görgő nyomását láthatjuk, a megoldás egynegyedét szemlélve.

A vezérlő függvény biztosítja, hogy a görgő végén a nyomás és az s szerinti deriváltja is zérus legyen. A feladat felállításánál a rugalmas testeket a rugalmas féltérre vonatkozó, Boussinesq-féle megoldásból kapott hatásfüggvény révén vettük számításba [5]. A felvett felületi elemek száma 10×40 . A terhelés 8000 N , a görgő sugara $3,5\text{ mm}$, a vizsgált érintkezési tartomány $0,2 \times 7\text{ mm}$.



13. ábra. A nyomás részleges vezérlését előíró függvény

4. A végeelem-módszer jövője

Tény, hogy amíg az 50-es években a lineáris feszültségi analízisben a mérés 95%-os arányt képviselt, a 70-es években 50%-ot, a 90-es években már csak 1%-ot a 99%-os számítógépes szimulálás mellett. A numerikus mechanika lehetőségei egyre nőnek a mindennapok gyakorlatában, s ezek gyakorlati haszna egyértelmű.

Azt is tapasztaljuk, hogy a megrendezésre kerülő hazai, nemzetközi konferenciák számos esetben a numerikus kutatásokra fókuszálnak, bemutatva a tervezői mérnöki feladatok sokszínűségét is. Pl. az 1997-ben San Franciscóban megrendezésre kerülő USACM (USA, számítógépesmechanika-kongresszus)-on 96 szekcióban 450 előadás szerepelt.

Európában az ECCOMAS szervez 4 évente hasonló konferenciákat.

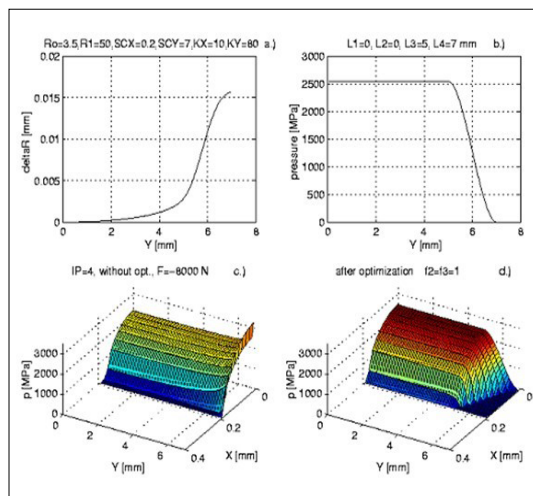
A nagyszámú résztvevő is jelzi a kutatások fontosságát, illetve azt a tényt, hogy komoly erők munkálkodnak a mechanika területén is, újabb és újabb területeket meghódítva.

A végeelemmel foglalkozó folyóiratok nagy száma, a megjelent könyvek minősége aláhúzzák e tudományterület fontosságát, élni akarását, az utánpótlás nevelésének sürgető igényét.

5. Következtetések

Megállapíthatjuk, hogy egy új szakma jelent meg, amely

- mechanikai problémák analízisével, optimalizálásával,
- speciális szoftverek fejlesztésével,
- modellek identifikálásával,



14. ábra. A görgőlekerekítés eredménye

- számítógépes rendszerek betanításával, telepítésével,
- a mechanikai numerikus módszerek fejlesztésével, tanításával foglalkozik.

Mindezzel összefüggésben azt is állíthatjuk, hogy a mechanika szerepe felértékelődik, erősödik, hiszen

- pontosított modellek építhetők fel,
- összetett rendszerek (szilárd test-folyadék/gáz alkotta rendszer, piezoelektromos elemeket tartalmazó intelligens szerkezetek) statikai, dinamikai vizsgálatára nyílik lehetőség.
- Új gépek, szerkezetek tervezésekor, gépgyártás-technológiai folyamatok vizsgálatakor a mechanikai állapotok szimulálására szolgáló nagy szabadságfokú végelem-/peremelem-módszerre alapozott numerikus technikákkal kényelmesen kezelhetővé váltak a megoldandó problémák.
- A hibabecslés és az eredmények automatikus pontosítása a programtól elvárt, megkívánt szolgáltatás.
- Komplex tervezői rendszerek állnak rendelkezésre, amelyekhez könnyen csatlakoztathatók a mechanikai modellek analízisére alkalmas számítógépi programok.
- Az új termékek és technológiák fejlesztésével kapcsolatos, éles piaci versenyben a korszerű szilárdságtani, dinamikai, multidiszciplináris ismeretek stratégiai fontossággal bírnak, és mindez nagyban növeli az ezen ismeretekkel bíró mérnökök értékét.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Szabó B., Babuska I.: *Finite Element Analysis*. New York, Wiley-Interscience, 1991.
- [2] Szabó B., Babuska I.: *Introduction to Finite Element Analysis, Formulation, Verification and Validation*. A John Wiley and Sons, Ltd., Chichester, UK, 2011.
- [3] Páczelt I.: *Végelem-módszer a mérnöki gyakorlatban*. I. és II. kötet. Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 1999, 2025.
- [4] Engineering Software Research and Development, Inc. (ESRD): StressCheck program <https://www.esrd.com/>
- [5] Páczelt I.: *Iterative Methods for Solution of Contact Optimization Problems*. Archives of Mechanics, 52. (2000) 685–711.
- [6] Páczelt I., Szabó B., Szabó T.: *Solution of Contact Problem Using the Hp-Version of the Finite Element Method*. Computers and Mathematics with Applications, 38. (1999) 49–69. [https://doi.org/10.1016/S0898-1221\(99\)00261-8](https://doi.org/10.1016/S0898-1221(99)00261-8)
- [7] Páczelt I., Baksa A., Szabó T.: *Formulation of the P-Extension Finite Elements for the Solution of Normal Contact Problems*. Journal of Computational and Applied Mechanics, 15/2. (2020) 135–172. <https://doi.org/10.32973/jcam.2020.009>
- [8] Páczelt I., Baksa A., Szabó T.: *Product Design Using a Contact-Optimization Technique*. Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 53/7-8. (2007) 442–461.



FOGPÓTLÁSOK NAGY PONTOSSÁGÚ MODELLEZÉSE ÉS SZILÁRDSÁGTANI ANALÍZISE

HIGH PRECISION MODELLING AND STRENGTH ANALYSIS OF TOOTH IMPLANTS

Papp Klaudia,¹ Piros István Attila,¹ Deák Bálint²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, papp.klaudia@nje.hu

² Szegedi Tudományegyetem, Fogorvostudományi Kar, Szeged, Magyarország, deakbalint7@gmail.com

Abstract

The design and mechanical analysis of patient-specific dental prostheses play a crucial role in modern dentistry and biomechanical research. With the advancement of digital design and simulation tools, it has become possible to create customized dental prostheses tailored to individual patients, ensuring not only anatomical compatibility but also optimal mechanical stability.

In our study, we present the design and finite element analysis of a bridge-type dental prosthesis, which was created based on the reconstruction of a real mandible. Our goal was to examine the behavior of the dental prosthesis and mandible under load, with a particular focus on stress distribution and deformations.

Keywords: *Tooth implants, NURBS modeling, Finite element analysis, von Mises stress distribution.*

Összefoglalás

A betegspecifikus fogpótlások tervezése és mechanikai vizsgálata kulcsfontosságú a modern fogászatban és biomechanikai kutatásokban. A digitális tervezési és szimulációs eszközök fejlődésével lehetőség nyílik arra, hogy egyedi páciensek számára optimalizált fogpótlásokat hozzunk létre, amelyek nemcsak anatómiailag illeszkednek, hanem mechanikai szempontból is megfelelő stabilitást biztosítanak.

Tanulmányunkban egy hídtípusú fogpótlás tervezését és végeselemes analízisét mutatjuk be, amelyet egy valódi állkapocs rekonstrukciójára alapozva készítettünk el. A célunk az volt, hogy megvizsgáljuk a fogpótlás és az állkapocs terhelés alatti viselkedését, különös tekintettel a feszültségeloszlásra és a deformációkra.

Kulcsszavak: *fogpótlás, NURBS-modellezés, végeselem-analízis, Von Mises-feszültségeloszlás.*

1. A fogak és az alsó állkapocs rekonstrukciója

Kutatásunk célja egy nagy pontosságú, részletes geometriai rekonstrukció létrehozása volt az alsó állkapocsról és a fogakról, CT-felvételek alapján. Az elkészült modell alapot szolgáltatott további biomechanikai és szilárdságtani vizsgálatokhoz, amelyek segítenek a fogpótlások optimális kialakításában, valamint a fog-állkapocs rendszer mechanikai viselkedésének pontosabb megértésében.

Első lépésként az állkapocs rekonstrukcióját végeztük el. Ehhez a CT-felvételeket három fő síkban – axiális, szagittális és kórtikális – készített metszetek segítségével szegmentáltuk a 3D Slicer programban [1]. Ez a folyamat lehetővé tette a csontos és lágy szövetek hatékonyabb elkülönítését, amely elősegítette a pontosabb modellezést [2]. A szegmentált metszeteket ezt követően a PTC Creo 11 tervezőszoftverbe importáltuk, ahol a rekonstrukció során NURBS-görbéket hoztunk létre, majd ezekre NURBS felületeket feszített-

tünk. Külön figyelmet fordítottunk arra, hogy a görbék tangenciálisan érintkezzenek egymással, valamint arra, hogy a felületek száma a lehető legkevesebb legyen, hiszen a túlzottan bonyolult geometria megnehezítheti a későbbi szimulációs vizsgálatokat [3]. Az alsó állkapocs rekonstrukcióját követően annak szerkezetét két rétegre bontottuk: spongiosa és kortikális csontállományra, hogy jobban modellezni tudjuk az eltérő mechanikai tulajdonságaikat [4].

A következő lépésben a fogak rekonstrukcióját végeztük el, hasonló elvek alapján, mint az állkapocs esetében. Egyenként modelleztük vissza a fogakat a CT-felvételek alapján, kezdetben tömör szerkezetként. Elsődleges célunk ebben a fázisban a fogak pontos geometriai visszaállítása volt, valamint azoknak a hibáknak és pontatlanságoknak a korrigálása, amelyek a nyers CT-adatokban előfordulhattak. Ezek közé tartoztak például az indokolatlan üregek, kisebb topológiai egyenetlenségek vagy a zajos felületek [5]. Ebben a kezdeti állapotban a fogakat még nem bontottuk rétegekre, mivel először a külső alakjuk pontos visszaállítására fókuszáltunk.

Az elkészült, visszamodellezett alsó állkapocs az **1. ábrán** látható.

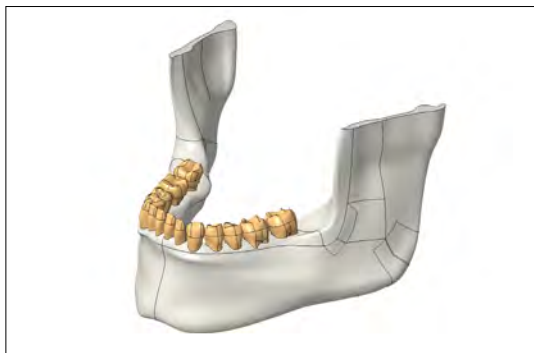
A teljes modell létrehozása lehetőséget biztosított arra, hogy későbbi biomechanikai és szilárdságtani vizsgálatokkal elemezzük a fog-állkapocs rendszer mechanikai terhelhetőségét, valamint a fogpótlások és implantátumok viselkedését különböző terhelési körülmények között. Az alkalmazott rekonstrukciós módszerek biztosították a modell nagy felbontását és sima topológiáját, amelyek elengedhetetlenek a precíz szimulációs vizsgálatokhoz és az orvosi alkalmazásokhoz.

2. Fogpótlás tervezése és modellezése

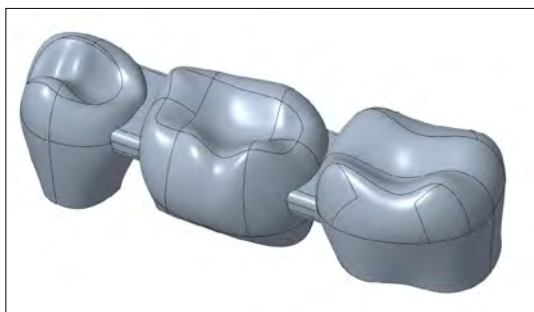
2.1. Fogpótlás nagy pontosságú modellezése

Kutatásunk során az alsó állkapocs és a fogak precíz visszamodellezését követően célunk egy betegspecifikus fogpótlás létrehozása volt, amely pontosan illeszkedik az eredeti anatómiai struktúrához. Az elkészült fogpótlás egy híd típusú restauráció, amelyet két lecsiszolt fogra terveztünk. A híd ragasztással kapcsolódik a lecsiszolt fogakra. Ez a megoldás rögzített fogpótlásnak minősül, amely hídként orvosolja a foghiányt, valamint tartós, funkcionálisan terhelhető pótlást biztosít a páciens számára. A meglévő fogakra tervezett híd a **2. ábrán** látható.

A híd geometriáját az eredeti fogak felületeitől geometriai eltolással hoztuk létre, ezáltal biztosít-



1. ábra. A CT-felvételek alapján visszamodellezett alsó állkapocs



2. ábra. A híd típusú fogpótlás



3. ábra. A fogpótlás illeszkedése és kapcsolódása a lecsiszolt fogakkal

va a fogpótlás megfelelő illeszkedését a lecsiszolt fogak felszínére [6].

Az elkészült fogpótlás illeszkedése a lecsiszolt fogakra a **3. ábrán** látható.

A képen a rózsaszínnel jelölt terület az állkapocs spongiosa-rétege, amely a fogak tartószerkezetének részét képezi, valamint a két lecsiszolt fog, amelyekre a híd támaszkodik. Ezen részek egymással kötött módon kapcsolódnak egymáshoz, ezzel megakadályozva az elmozdulást [7].

A fogpótlás geometriája pontosan követi a páciens egyéni anatómiai adottságait, hogy biztosítsa a megfelelő illeszkedést és stabilitást. A híd szerkezeti kialakítása olyan módon történt, hogy a rágóerők megfelelően oszoljanak el a pillérfogakon, minimalizálva a túlterhelés kockázatát.

Az így létrehozott híd típusú fogpótlás lehetőséget biztosít a további mechanikai elemzésekre, amelyek segíthetnek optimalizálni a végleges kialakítást, és elősegíthetik a klinikai alkalmazásra való felkészítést.

2.2. A fogpótlás szilárdságtani analízise

A betegspecifikus, híd típusú fogpótlás tervezését követően szilárdságtani elemzést végeztünk a PTC Creo 11 szoftverben, az integrált Ansys szimulációs modul segítségével. Célunk az volt, hogy megvizsgáljuk a fogpótlás mechanikai viselkedését és ellenálló képességét egy statikus terhelési környezetben.

A végeselemes analízis során az alábbi peremfeltételeket és terheléseket alkalmaztuk:

- Peremfeltételek: Az állkapocs ízületi, és koronanyúlványát rögzítettük, hogy a fogpótlás terhelési viselkedését valóságos körülmények között vizsgálhassuk, ezenkívül, mivel a szimulációk gyorsabb lefuttatása érdekében csak a féldoldali alsó állkapcsot vizsgáltuk, az állnál, ahol elvágtuk ezt az alsó állkapcsot, megadtunk még egy szimmetriafeltételt is, ezáltal csak az elvágott felület tengelyén engedett meg az elmozdulás.
- Terhelés: A híd középső fogának rágófelületére 100 N nagyságú, függőleges irányú statikus erőt alkalmaztunk, amely egy átlagos rágóerőnek felel meg [8].

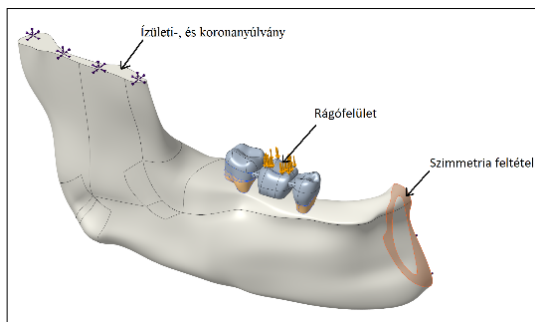
A felvett peremfeltételek és terhelések a **4. ábrán** láthatók.

A fogpótlás modellezése során ügyeltünk arra, hogy a rágófelületek külön, jól elhatárolt felületként legyenek definiálva [9]. Ahogy az **5. ábra** is mutatja, ez lehetővé tette a terhelés pontos kijelölését és a fogpótlás tényleges mechanikai igénybevételének precíz meghatározását.

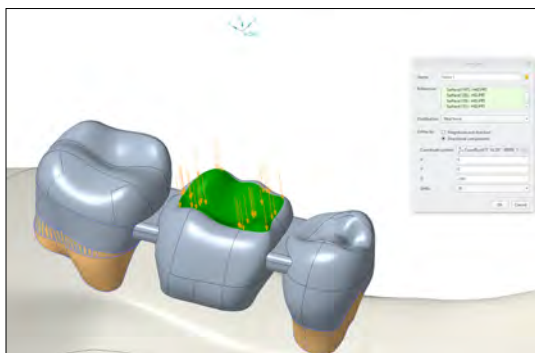
A szilárdságtani analízis elvégzése előtt az egész modellt végeselemes hálózással láttuk el, hogy biztosítsuk a numerikus számítások pontosságát [10]. Ez a hálózás látható a **6. ábrán**.

A hálózás során tetraédeses végeselemhálót alkalmaztunk, amely különösen alkalmas a bonyolult, szerves geometriák pontos leképezésére, mint amilyen az állkapocs és a fogpótlás alakja is [11].

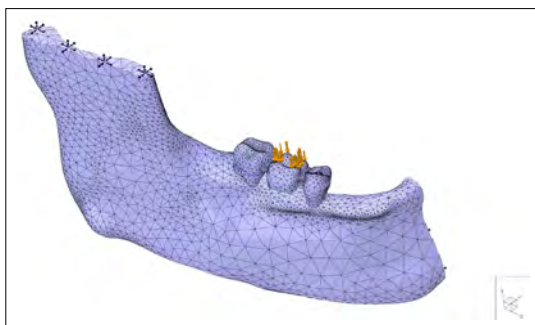
A tetraédeses hálózás az állkapocs és a fogpótlás ívelt, összetett formájához kiválóan illeszkedik, mivel a tetraédeses elemek hatékonyabban töltik



4. ábra. Terhelések és peremfeltételek



5. ábra. A terhelés felvétele a rágófelületre



6. ábra. Hálózás az állkapocson

ki a rendelkezésre álló térfogatot, mint a hagyományos hexaédeses elemek. Egy másik jelentős előnye, hogy automatikusan generálható, így kevesebb manuális beavatkozást igényel, ami gyorsabbá és egyszerűbbé teszi az alkalmazását az organikus formájú modellek esetében. Emellett a pontos feszültségeloszlási eredmények elérése érdekében lehetőség van az elemméret változtatására, így a kritikus területeken sűrűbb háló hozható létre, ami javítja az analízis pontosságát és megbízhatóságát. A tetraédeses elemek képesek kezelni az összetettebb peremfeltételeket és terhelési helyzeteket, ami a fogpótlás modellezése során különösen fontos szempont volt.

A hálózás elkészítésével biztosítottuk, hogy az állkapocs, a fogpótlás és a rögzített fogak megfelelő felbontásban jelenjenek meg a végelelemes analízis során, így pontosabb és részletesebb eredményeket kaptunk a terhelési viselkedésükről.

A végelelemes szimulációk során elsőként a teljes deformációt vizsgáltuk, amely megmutatta, hogy a statikus terhelés hatására a modell egyes részei milyen mértékben mozdulnak el az eredeti helyzetükhöz képest. Az eredmények a **7. ábrán** láthatók, amelyek alapján a legnagyobb deformáció az állkapocs alsó részén, az állcsúcson jelentkezett, ahol a maximális elmozdulás 0,1706 mm volt.

Ez az eredmény arra utal, hogy az állkapocs az alkalmazott 100 N-os rágóterhelés hatására minimális mértékben rugalmasan deformálódik, ami természetes jelenség. Az állkapocs alsó részén bekövetkező nagyobb elmozdulás azzal magyarázható, hogy ez a terület a legtávolabb helyezkedik el az egyik rögzített peremfeltételtől (állkapocsízület- és koronanyúlvány), így nagyobb szabadságfokkal képes elmozdulni [12].

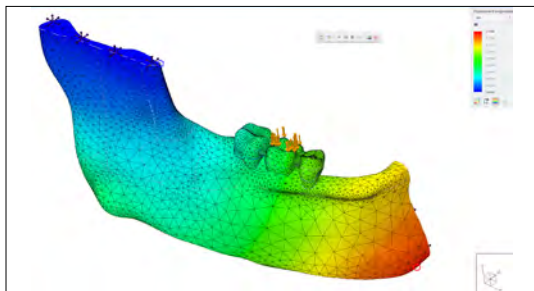
A végelelemes szimuláció következő lépéseként Von Mises-feszültségvizsgálatot végeztünk, amely a fogpótlás és az állkapocs anyagában kialakuló feszültségeloszlást elemezte a statikus terhelés hatására. A feszültségvizsgálat eredménye a **8. ábrán** látható.

Az állkapocs esetében a legnagyobb feszültség a ramus-régióban keletkezett, ahol a maximális érték meghaladta a 10 MPa-t. Ez az eredmény összhangban van azzal, hogy a rágóerő hatására a ramus a terhelés átvitelében kulcsszerepet játszik, így ezen a területen koncentrálódik a legnagyobb mechanikai igénybevétel [13].

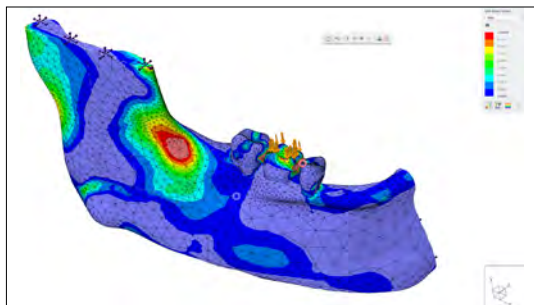
A fogpótlás esetében a legnagyobb feszültség a hidat alkotó szerkezeten jelentkezett, amely a két csiszolt fog között helyezkedik el. Itt a feszültség elérte a 33,9 MPa-t, ami azt jelzi, hogy a fogpótlás ezen része kiemelten terhelt zóna. Ez az érték azért is jelentős, mert a hidak fő terhelési pontja a középső rész, ahol a rágóerő hatására hajlító- és nyírófeszültségek keletkeznek [13].

A hídon ébredő csúcspontfeszültségek a **9. és 10. ábrán** láthatók.

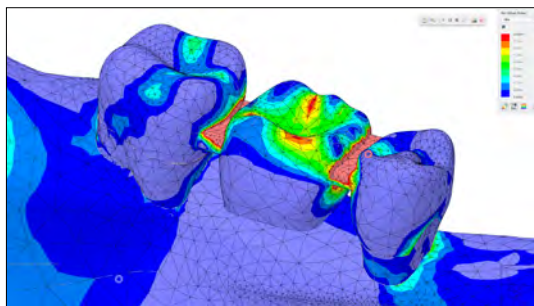
A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy mind az állkapocs, mind a fogpótlás szerkezete megfelelő mechanikai ellenállást mutat, hiszen az ébredő feszültségek a várható tartományon belül maradnak [14]. További finomhangolásként a fogpótlás geometriájának optimalizálása segíthet a feszültségcsúcsok csökkentésében és az erőhatások egyenletesebb eloszlásában.



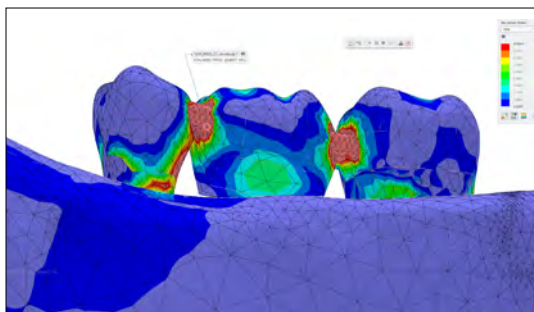
7. ábra. Teljes deformáció



8. ábra. Von Mises-feszültségvizsgálat



9. ábra. Csúcspontfeszültség a hídon felülnézetben



10. ábra. Csúcspontfeszültség a hídon alulnézetben

3. Következtetések

Kutatásunk célja egy betegspecifikus fogpótlás tervezése és mechanikai vizsgálata volt, amelyet egy valódi állkapocs geometriai rekonstrukciója

alapján készítettünk el. A tervezett fogpótlás egy híd típusú restauráció, amelyet két lecsiszolt fogra illesztettünk. A teljes modell létrehozása és a szimulációs vizsgálatok elvégzése a PTC Creo 11 szoftverben történt, az Ansys végelemes moduljának segítségével.

A szimulációs folyamat során első lépésként a teljes szerkezetet tetraédes, végelemes hálózattal láttuk el, amely a komplex geometria pontosabb lekövetésére kiválóan alkalmas. Ezt követően mechanikai analíziseket végeztünk, amelyek során az állkapocs ízületi és koronanyúlványát peremfeltétként, valamint az állcsontnál elvágott felületen szimmetriafeltételként kezeltük, míg a fogpótlás terhelését egy 100 N nagyságú, függőleges irányú statikus erővel modelleztük, amelyet a híd középso fogának rágófelületére helyeztünk.

Az eredmények alapján a teljes deformáció legnagyobb értéke 0,1706 mm volt, amely az állkapocs alsó részén, az állnál jelentkezett. A feszültségeloszlás vizsgálatok a legnagyobb Von Mises-feszültség az állkapocs ramus-részén alakult ki, meghaladva a 10 MPa értéket. A fogpótlás esetében a legterheltebb zóna a híd középso szakasza volt, ahol a feszültség 33,9 MPa-ra emelkedett.

A kapott eredmények segítenek a fogpótlás mechanikai viselkedésének megértésében, és iránymutatást adnak a további optimalizálás lehetőségeire, például a szerkezeti geometriák módosításával a feszültségcsúcsok csökkentése érdekében.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Wang C.-S., Lin M.-C., Wang C.-C., Chen C.-F., Hsieh J.-C.: *Feature Reconstruction for 3D Medical Images Processing*. In: Gao J.X., Xu D., Sun X., Wu Y. (eds.) *Proceedings of the 2013 6th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI 2013)*, Vol. 1 and 2, 69–74. IEEE, New York (2013).
<https://doi.org/10.1109/BMEI.2013.6746909>
- [2] Nguyen, V.S., Tran, M.H., Le, S.T.: *Visualization of Medical Images Data Based on Geometric Modeling*. In: Dang, T.K., Kng, J., Ta-kizawa, M., Bui, S.H. (eds.) *Future Data and Security Engineering. Lecture Notes in Computer Science*, pp. 560–576. Springer, Cham (2019).
https://doi.org/10.1007/978-3-030-35653-8_36
- [3] Aubin, C.-., Dansereau, J., Parent, F., Labelle, H., Guise, J.A.: *Morphometric Evaluations of Personalised 3D Reconstructions and Geometric Models of the Human Spine*. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 35/6. (1997) 611–618.
<https://doi.org/10.1007/BF02510968>
- [4] AlZubi, S., Jararweh, Y., Al-Zoubi, H., Elbes, M., Kanan, T., Gupta, B.: *Multiorientation Geometric Medical Volumes Segmentation Using 3D Multi-resolution Analysis*. *Multimedia Tools and Applications*, 78/17. 24223–24248 (2019)
<https://doi.org/10.1007/s11042-018-7003-4>
- [5] He, J., Chen, S., Zhang, H., Tao, X., Lin, W., Zhang, S., Zeng, D., Ma, J.: *Downsampled Imaging Geometric Modeling for Accurate CT Reconstruction via Deep Learning*. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 40/11. (2021) 2976–2985
<https://doi.org/10.1109/TMI.2021.3074783>
- [6] Liu, C.-C., Hsu, C.-H., Hsiao, I.-T., Lin, K.M.: *Effect of Geometric Models on Convergence Rate in Iterative PET Image Reconstructions*. *Journal of Instrumentation*, 4(05), 05010 (2009)
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/05/P05010>
- [7] Garrido, A.H., Cerra, P.P., Zapico, A.O., Lopez, M.D.G.: *Geometric Data Collection in Medical Imaging*. *DYNA*, 86/2. (2011) 222–231.
<https://doi.org/10.6036/3868>
- [8] Pemmada, R., Telang, V.S., Tandon, P., Thomas, V.: *Patient-Specific Mechanical Analysis of PCL Periodontal Membrane: Modeling and Simulation*. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 151. (2024) 106397
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106397>
- [9] Franchini, S., Gentile, A., Vassallo, G., Vitabile, S.: *Implementation and Evaluation of Medical Imaging Techniques Based on Conformal Geometric Algebra*. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 30/3. (2020) 415–433.
- [10] Abdel-Aziz, H.S., Zanaty, E.A., Ali, H.A., Saad, M.K.: *Generating Bezier Curves for Medical Image Reconstruction*. *Results in Physics*, 23. (2021) 103996
<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2021.103996>
- [11] Majeed, A., Mt Piaah, A.R., Rafique, M., Ab-dullah, J.Y., Rajion, Z.A.: *NURBS Curves with the Application of Multiple Bones Fracture Reconstruction*. *Applied Mathematics and Computation*, 315. (2017) 70–84.
<https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.05.061>
- [12] Lv, X., Fu, D.: *Research on Rapid Imitation of Human Tibia and Five-Axis CNC Machining Based on Computer-aided*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1648(3), 032130 (2020)
<https://doi.org/10.1088/17426596/1648/3/032130>
- [13] Yao, Q., Zhuang, Y., Aji, Y., Zhang, Q., Luo, Y., Li, S.: *Biomechanical Impact of Different Isthmus Positions in Mandibular First Molar Root Canals: a Finite Element Analysis*. *Clinical Oral Investigations*, 28/6. (2024) 311
<https://doi.org/10.1007/s00784-024-05715-1>
- [14] Demir, O., Uslan, I., Buyuk, M., Salamci, M.U.: *Development and Validation of a Digital Twin of the Human Lower Jaw under Impact Loading by Using Non-Linear Finite Element Analyses*. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 148, (2023) 106207.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106207>

TÁRCSÁS BORONÁVAL VALÓ TALAJMEGMUNKÁLÁS EREDMÉNYÉNEK SZEMLÉLTETÉSE SZÁMÍTÓGÉPES SZIMULÁCIÓVAL

COMPUTER SIMULATION TO VISUALIZE THE RESULTS OF SOIL TILLAGE WITH DISC HARROW

Pásztor Judit,¹ Tolvaly-Roşca Ferenc²

Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Marosvásárhely, Románia,

¹ pjudit@ms.sapientia.ro

² tferi@ms.sapientia.ro

Abstract

The disc harrow is the basic machine for shredding soil. It loosens, smooths and mixes the top layer of soil during shredding. It also chops and incorporates weeds and stalk residues into the soil. In this paper, we will explore the factors that influence the operation process of the disc harrow and apply them to the Bomet BTP 4×6 disc harrow. A body model of the Bomet BTP 4×6 disc harrow is prepared and the results of its operation process are simulated in three different operating situations.

Keywords: *disc harrow, computer simulation, operation process.*

Összefoglalás

A tárcsás borona a talaj aprításának alapgépe. Aprítás közben lazítja, egyengeti, enyhén keveri a talaj felső rétegét. A gyomok, szármadaradványok aprítását, talajba keverését is elvégzi. A dolgozatban feltérképezzük a tárcsás borona munkafolyamatát befolyásoló tényezőket, és alkalmazzuk a Bomet BTP 4×6 tárcsás boronára. Elkészítettük a Bomet BTP 4×6 tárcsás borona testmodelljét, majd a munkafolyamatának eredményét szimulációval szemléltetjük három különböző üzemeltetési helyzetben.

Kulcsszavak: *tárcsás borona, számítógépes szimuláció, munkafolyamat.*

1. A tárcsás borona ismertetése

A tárcsás borona a talaj aprításának alapgépe. Aprítás közben lazítja, egyengeti, enyhén keveri a talaj felső rétegét, így alkalmanként helyettesítheti a hagyományos talajforgatást [1].

A tárcsás borona (1. ábra) munkaeszközei a tárcsalevelek. A tárcsalevelek széle lehet ép vagy csipkézett. A tárcsalevelek tengelyre vannak fel-fűzve, közöttük távtartó hüvelyek tartják az állandó távolságot. A közös tengelyre fűzött tárcsalevelek tárcsatagot alkotnak. A tárcsatagok a kerethez vannak rögzítve. A tárcsatagok elrendezése alapján V- és X-elrendezésű tárcsás boronák vannak.



1. ábra. Bomet BTP 4×6 tárcsás borona felépítése

A tárcsás borona félaktív talajgép, vontatása közben a tárcsalevelek elfordulnak a kerethez képest. Működése közben a tárcsatag tengelye a haladási iránnyal γ támadószöget zár be, **2.a ábra**. A vontatás következtében a tengelyre szerelt tárcsalevelek elfordulnak, folyamatosan kívágnak egy darabot a talajból, **2.b ábra**. A talajdarabok a tárcsalevelek belső felületén megemelődnek, majd visszaesnek a talajra. Ezáltal megtörténik a talaj aprítása, lazítása, keverése, enyhe forgatása. A megmunkált talaj oldalirányban elszállítódik.

A tárcsás borona munkafolyamata eredményeként az átmunkált talaj alja nem egyenes, gerinc képződik a két tárcsalevél között, amely akár a felszínen is érzékelhető (**2.b ábra**, **2.c ábra**).

A tárcsás borona munkafolyamatának követelményei:

- legyen egyenletes a megmunkált talajfelszín, ne maradjon műveletlen sáv, **[2]**;
- a barázdafenék legyen minél egyenletesebb, a képződött gerinc magassága legyen a lehető legkisebb **[2, 3]**;
- a tárcsalevelek a szár- és tarlómaradványokat jól aprítva a talajba keverjék **[4]**.

Ennek érdekében a második tárcsatag felosztásban van elhelyezve az első tárcsatag mögött, így a hátsó tárcsalevél két, előzőleg megmunkált terület között dolgozik, **2. ábra**.

A második tagra fűzött tárcsalevelek visszaszálítják az oldalra elmozdított talajt.

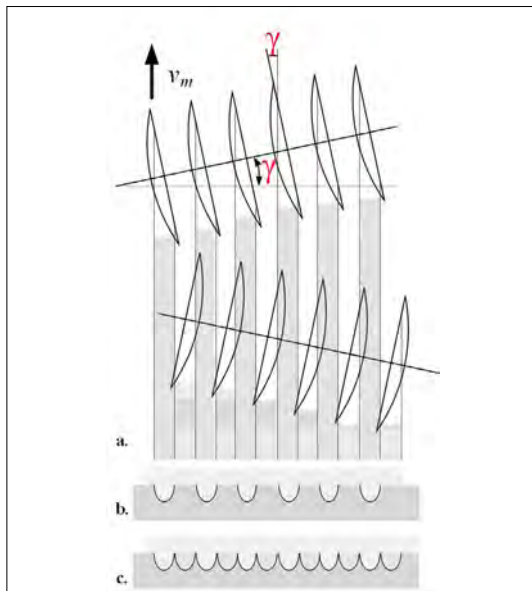
A jó aprítást a csipkézett élű tárcsalevelek végzik, az első tárcsatagok általában ezekkel vannak felszerelve.

A munkagép munkafolyamata gyors, emiatt megfigyelése, vizsgálata szántóföldi körülmények között nehézkes. A tárcsás borona működésének jobb megértése érdekében érdemes a munkafolyamatot számítógépes szimulációval megjeleníteni. Ezt tesszük ebben a dolgozatban.

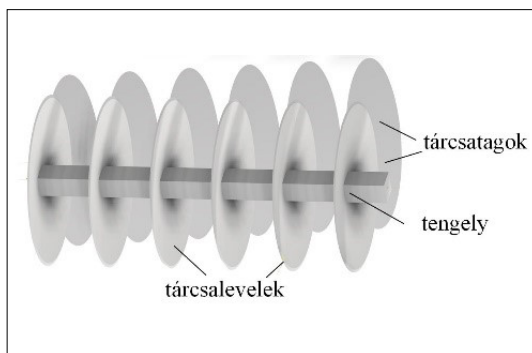
2. A tárcsás borona munkafolyamatának számítógépes szimulációja

Munkamódszer:

- elkészítjük a Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar gépudvarában található Bomet BTP 4×6 tárcsás borona testmodelljét;
- feltárjuk a tárcsás borona munkafolyamatát jellemző tényezőket;
- szimuláljuk a munkafolyamatot valós üzemeltetési adatok felhasználásával;
- megfigyeljük a jellemzők és munkafolyamat közötti kapcsolatokat.



2. ábra. Tárcsás boronatagok munkafolyamata: a) talajfelszínen; b) az első tárcsatag utáni barázdafenéken; c) az egymás mögött felosztásban haladó tárcsalevelek után kialakult barázdafenéken



3. ábra. Tárcsatagok testmodellje

2.1. A Bomet BTP 4×6 tárcsás borona testmodellje

A Bomet BTP 4×6 2,2 tárcsás borona 4 tárcsataggal rendelkezik, **1. ábra**. A tárcsatagok X elrendezésűek. Mindenik tag 6-6 darab tárcsalevéllal van szerelve.

A tárcsalevelek átmérője $\Phi 460$ mm, a közöttük lévő távolság 172 mm. A munkagép munkaszélessége 2200 mm, tömege 615 kg **[5]**.

Az egymás mögött haladó két tárcsatag testmodellje a **3. ábrán** látható. Ebben az esetben mindkét tárcsatag ép élű tárcsalevéllal van ábrázolva.

2.2. A tárcsás borona munkafolyamatát jellemző tényezők

Két egymás mellett haladó tárcsalevél által átmunkált talajkeresztmetszet és a tárcsalevelek geometriai összefüggései a 4. ábrán láthatók.

A tárcsás borona munkafolyamatának követelményei, vagyis a műveletlen sávok hiánya és az egyenletes barázdafenék az átmunkált talajkeresztmetszet és a gerinccsúcs magassága alapján értékelhetők.

Az S_d átmunkált talaj keresztmetszetének összefüggése [3]:

$$S_d = 2(a - c) \sin \gamma \sqrt{c(D - c)} + \frac{1}{8} D^2 (\varphi_c - \sin \varphi_c) \sin \gamma \text{ [mm}^2\text{]}, \quad (1)$$

ahol: a a munkamélység [mm]; c a megmunkálatlan talajgerinc magassága [mm]; γ a tárcsatag támadási szöge [°]; φ_c a tárcsalevél gerincmagasságnak megfelelő elméleti középponti szög [°].

A tárcsalevélen a gerincmagasságnak megfelelő elméleti középponti szög összefüggése [3]:

$$\varphi_c = 2 \arccos \left(1 - \frac{2c}{D} \right). \quad (2)$$

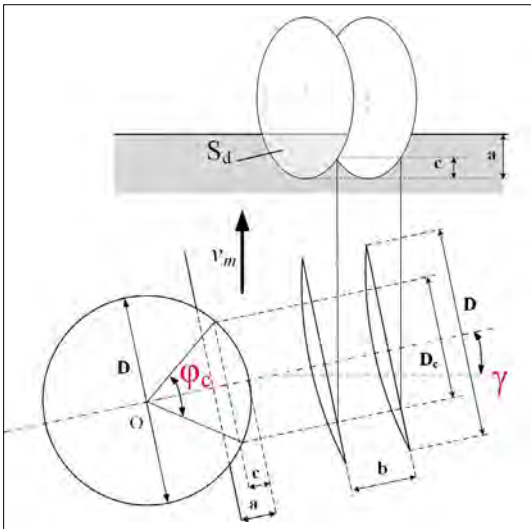
A gerinccsúcs magassága és a tárcsás borona geometriai jellemzői közti összefüggés [4]:

$$b = 2 \tan \gamma \sqrt{c(D - c)}, \quad (3)$$

ahol: b az egymás mellett dolgozó tárcsalevelek közötti távolság [mm].

Az (1)-es, (2)-es és (3) -as összefüggések alapján a tárcsás borona munkafolyamatát befolyásolja:

- a munkamélység;
- a tárcsalevelek γ támadási szöge.



4. ábra. Tárcsalevelek geometriája, kinematikája

2.3. A tárcsatagok munkafolyamatának szimulációja

A Bomet BTP 4×6 tárcsás borona négy tagja egymással szimmetrikus, emiatt a szimulációt csak két egymás mögött haladó tárcsatagra végezzük.

A Bomet BTP 4×6 2,2 tárcsás borona tárcsatagjai $\gamma = 12^\circ/15^\circ/17^\circ$ támadási szögre állíthatók [5].

A tárcsalevelek munkamélysége függ a tárcsalevelekre nehezedő súlyerőtől, amelyet póttömegekkel lehet növelni. A szimulációkat $a = 60$ mm, $a = 90$ mm, $a = 120$ mm munkamélységekre végezzük.

Három szimulációt végeztünk, az 1. táblázat adatai alapján. Szemléltetésre kilenc izometrikus nézet készült, a dolgozatban hat látható.

1. táblázat. A szimulációk üzemeltetési adatai

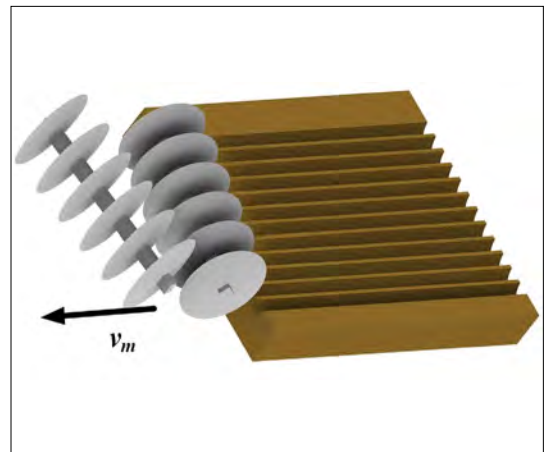
Szimuláció	γ [°]	a [mm]
első	12	60
második	15	90
harmadik	17	120

A számítógépes szimulációk folyamatos merevtest-kivonásos módszerrel készültek [6]. Az eltávolított talaj nem kerül vissza a felületre, így megfigyelhetők az elmunkálatlan gerinccsúcsok és a barázda alja. A szimuláció mozgófilmen is rögzíthető.

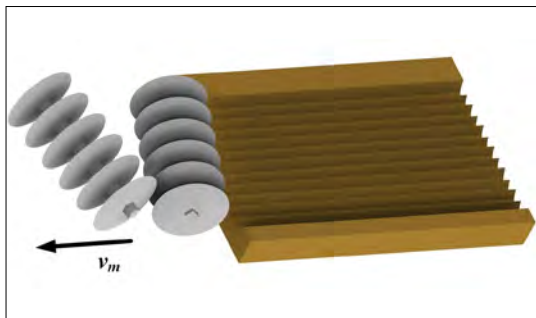
A szimulációk során figyeljük, hogy a tárcsatagok támadási szöge és a munkamélység hogyan hat az átmunkált talaj keresztmetszetére és a barázdafenék egyenletességére.

Az első szimuláció az 5. ábrán látható.

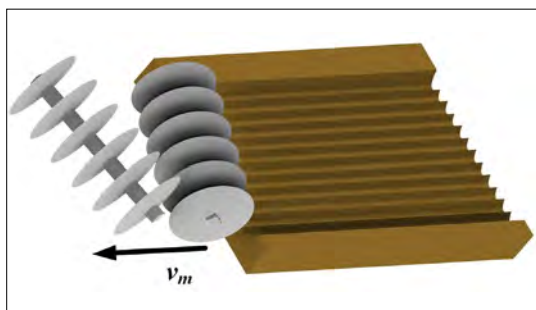
Az 5. ábrán jól megfigyelhető, hogy a talaj felszínén elmunkálatlan részek, sávok láthatóak.



5. ábra. Az első szimuláció, $\gamma = 12^\circ$, $a = 60$ mm



6. ábra. A második szimuláció, $\gamma = 15^\circ$, $a = 90$ mm



7. ábra. A harmadik szimuláció, $\gamma = 17^\circ$, $a = 120$ mm

A második szimuláció az 6. ábrán figyelhető meg. Ez nagyobb támadószöggel és munkamélységgel történt, javult a talaj átdolgozása, nincs eldolgozatlan talajfelszín, de még nagyon egyenletlen a barázda alja.

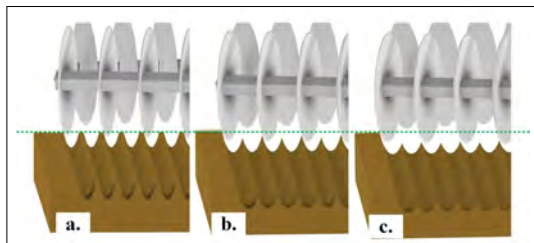
A harmadik szimuláció a 7. ábrán látható.

A harmadik szimuláció a legnagyobb támadási szöggel és munkamélységgel történt. Itt a gerincmagasság kisebb, mint a munkamélység, vagyis a kialakult gerinccsúcsok nem látszanak a felszínen.

A három különböző szögállással és munkamélységgel végzett munkafolyamat eredményeinek szemléltetése a 8. ábrán látható.

A számítógépes szimulációk jól mutatják, hogy a tárcsatag támadószögének és a munkamélységnek a növelése nagyobb átmunkált talajkeresztmetszetet eredményez, amint ez az (1)-es összefüggés alapján várható is volt.

A nagyobb támadószög egyenletesebb barázda-fenék kialakulásához vezet.



8. ábra. Az átmunkált talajkeresztmetszet és gerinccsúcs magasságának szemléltetése:

- a) $\gamma = 12^\circ$, $a = 60$ mm; b) $\gamma = 15^\circ$, $a = 90$ mm;
c) $\gamma = 17^\circ$, $a = 120$ mm

3. Következtetések

A valós adatokkal megvalósított tárcsás borona munkafolyamatának szimulációja jól szemlélteti a jelenséget és igazolja, hogy miért szükséges erre a tárcsás boronára póttömeget helyezni vagy a tárcsatag támadószögét növelni, ha egyenletesen átmunkált magágyat szeretnénk elérni.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Vlăduț N.-V., Atanasov A., Ungureanu N., Ivașcu L.V., Cioca L.-I., Popa L.-D., Matei Gh., Boruz S., Cerempei V., Țiței V., Nenciu F., Milea O.-E., Dumitru Ș., Caba I.: *Trends in the Development of Conservation. Ecological Agriculture in the Context of Current Climate Change – A Review*. INMATEH - Agricultural Engineering, 74/3. (2024) 980–1032. <https://doi.org/10.35633/inmateh-74-86>
- [2] Qiu Y., Chen Z., Hou Z., Liu H., Gu F., Dai N.: *Investigation on Data Collection and Fractal Characteristics of Soil Surface Roughness*. INMATEH - Agricultural Engineering, 61/2. (2020) 135–142. <https://doi.org/10.35633/inmateh-61-15>
- [3] Căproiu Ș., Scripciu V., Ros V., Babiciu P., Ciubotaru C.: *Mașini agricole de lucrat solul, semănat și întreținere a culturilor*. Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1982, 202–209.
- [4] Naghiu A., Baraldi G., Naghiu L.: *Mașini și instalații agricole*. Risoprint Kiadó, Kolozsvár, 2004, 150,168.
- [5] <https://www.dianatrans.ro/utilaje-agricole-noi/discuri-trase-65/disc-btp-724.htm> (letöltve 2025.02.28.)
- [6] Tolvaly-Roșca F., Pásztor J.: *Work Process Analysis of the Machines with Working Parts Entrained in Seedbed Preparation Works*. INMATEH-Agricultural Engineering, 58/2. (2019) 2068–2239. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-58-01>



BERENDEZÉS TERVEZÉSE ÉS VALIDÁCIÓJA KENŐANYAGOK TERHELHETŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATÁRA

DESIGN AND VALIDATION OF EQUIPMENT FOR TESTING THE LOAD CAPACITY OF LUBRICANTS

Popa-Müller Izolda,¹ Lőrincz Norbert²

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

² Hamorform Industry, Vlahita, Románia, lorincz.norbert@yahoo.com

Abstract

To test the load carrying capacity of lubricating oils, we designed a device based on a modelling model of a tribological system in line contact. Under different loads and in contact with different materials, the wear rate is monitored. We investigate at what force load and over what time the wear occurs. It is an important tool in tribological laboratory practice because it can be used to determine the load capacity of a lubricating oil under test conditions and to determine the maximum load at which no wear will occur.

Keywords: *lubricating oil, wear mark, force, time.*

Összefoglalás

A kenőolajok terhelhetőségének vizsgálatára egy vonalszerű érintkezésben levő tribológiai rendszer modelljén alapuló berendezést terveztünk. Különböző terhelés mellett és különböző anyagok érintkezésénél figyeljük a kopás mértékét. Egy fontos eszköz a tribológia-laborgyakorlatnál, hiszen meghatározható vizsgálati feltételek mellett, a kenőolaj terhelhetősége és megállapítható, hogy mekkora maximális terhelésnél nem jelenik meg a berágódási nyom.

Kulcsszavak: *kenőolaj, kopásnyom, erő, idő.*

1. Bevezetés

A kenőanyag legfontosabb szerepe, hogy csökkentse a súrlódást, amelynek következtében megakadályozza a felületek kopását.

A kenőanyagok halmazállapot szerinti felhasználása [1]:

- cseppfolyós kenőanyagok (kenőolajok);
- plasztikus kenőanyagok (kenőzsírok);
- szilárd kenőanyagok (grafit, molibdén-diszulfid stb);
- gáznemű kenőanyagok (levegő, bármely inert gáz).

A műszaki gyakorlatban legelterjedtebben a cseppfolyós kenőanyagokat, a kenőolajokat használják.

A kenőanyagok legfontosabb tulajdonságait leíró paraméterek a következők [2]:

- viszkozitás, folyadék folyási képességének mérésére szolgál;
- konzisztencia: a zsír merevségének mértéke;
- filmképző képesség, a mozgó alkatrészeket a kenőanyagok által képzett filmréteg választja el egymástól.

A kenőanyagoknak biztosítani kell a minél hosszabb ideig tartó optimális kenési állapotot.

A fáradás okai:

- a kenőanyagok belső változása;
- a kenőanyagok külső szennyeződése;
- az adalékok hatékonyságának csökkenése.

A kenőolaj összetétele alapolajból és a hozzáadott adalékokból áll.

Az adalékok nagymértékben megváltoztatják a kenőolaj tulajdonságát, javítják a kenőolaj kopási, súrlódási, oxidációs, habzási és korróziós tulajdonságait.

Kenőolajok csoportosítása:

- Növényi és állati eredetű olajok;
- Kőolaj-eredetű olajok, (paraffinos, nafténes, illetve vegyes bázisú kőolaj);
- Kőolaj-eredetű olajok, (paraffinos, nafténes, illetve vegyes bázisú kőolaj) ;
- Szintetikus kenőolajok, különleges esetekben kerülnek alkalmazásra, főleg 90°C fölötti vagy nagyon alacsony hőmérsékleten. A legelterjedtebb szintetikus olajok a diészter, poli-alfa-olefin, a szilikon és a fluorozott olajok, valamint a poliglikolok.

2. Tribológiai vizsgálatok

2.1. Berendezés tervezése a kenőanyagok terhelhetőségének vizsgálatához

A kenőanyagok terhelhetőségének vizsgálatához szükséges berendezésre vonatkozó követelmények [3–7]:

- hosszú élettartam szempontjából optimális szerkezet kialakítása;
- működés szempontjából optimális szerkezet kialakítása;
- karbantartási, felújítási időszakok megállapításához szükséges adatok meghatározása;
- gép működési állapotának figyelemmel kísérése;
- az alkatrészek kopásának szimulálása modell-vizsgálatokkal;
- tribológiai rendszer viselkedését befolyásoló tényezők megállapítása;
- adott súrlódó szerkezet elkészítéséhez és működtetéséhez szükséges anyagpár és kenőanyag kiválasztása;
- anyagok és kenőanyagok minőségének ellenőrzése.

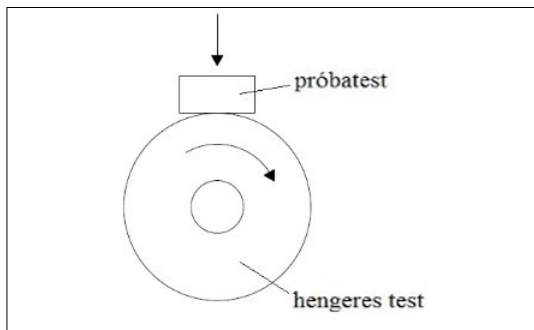
Berendezésünknel a hasáb-tárcsa tribológiai modellt használtuk, **1. ábra**.

Berendezésünk egyik része biztosítja a gyűrű forgó mozgását, míg a másik része a próbatest fokozatos terhelését biztosító mechanizmusból épül fel.

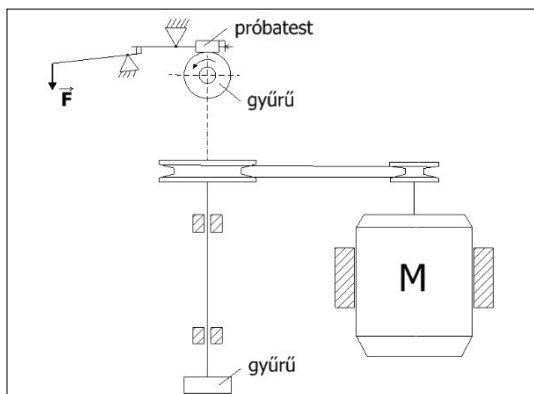
A tengely egyik végén reteszkötéssel illeszkedik a gyűrű, amely forgó mozgást végez, és vonalszerű érintkezésben van a próbatesttel. A gyűrű fordulatszáma állandó, 800 [fordulat/perc]. A gyűrű alatti tartályban elhelyezkedő kenőanyag felvitelével, kenőfilmréteg alakul ki a két érintkező felület között.

A másik végén egy ékszíjtárcsa helyezkedik el [1, 8], reteszkötéssel illesztve, amelyhez ékszíjhajtással kapcsolódik egy villamos motor. A fordulatszám-beállítás és a mozgásátvitel szempontjából szükség van szíjhajtásra [9]. Mivel a tengely csavarásnak és hajlításnak van kitéve, ezért két ponton való rögzítésre van szükség, tehát két helyen van csapágyazva, **2. ábra**.

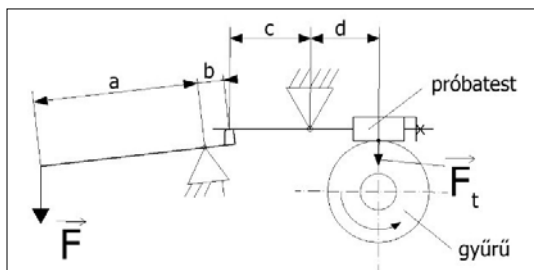
A próbatest terhelése egy erőkarpár által történik. Az egyik erőkaron rögzítődik a próbatest, a másik erőkar hatására a próbatest rányomódik a gyűrűre. Az erőkarok által biztosított fokozatos terhelés különböző tömegű súlyokkal van megoldva, **3. ábra**.



1. ábra. Hasáb-tárcsa modell



2. ábra. Berendezés kinematikai vázlata



3. ábra. Berendezés erőkarjának kinematikája

Működés közben a terhelés fokozatos növelésével határozható meg az a minimális terhelés, amelynél megszakad a kenőfilmréteg és megkezdődik a berágódás.

Mindkét rész rögzítése egy zártszelvényből készített, hegesztett kötéssel összeállított szerkezeten történik, **4. ábra**.

A megvalósított berendezés az **5. ábrán** figyelhető meg.

2.2. A vizsgálat tárgya

A vizsgálat célja tanulmányozni a különböző érintkező felületek esetében a kenőolaj terhelhetőségét. Ennek érdekében vizsgáljuk, hogy mekkora erőterhelés mellett és mennyi idő elteltével jelenik meg a kopás.

Meghatározzuk, adott vizsgálati feltételek mellett, mekkora a maximális terhelés, ahol a berágódási nyom még nem jelenik meg.

A vizsgálatokat acélgyűrű használatával Cu-, CuZn-, C45-anyagú próbatesteken végeztük el. A vizsgálatok során T90-típusú olajat használtunk. Ez egy kis sebességű ipari hajtóművekben használt transzmissziós olaj, amelynek viszkozitási indexe 90.

A kenőolaj tulajdonságai:

- kinematikai viszkozitása 40°C, $\nu = 160 \text{ mm}^2/\text{s}$;
- kinematikai viszkozitása 100°C, $\nu = 16,5\text{--}18 \text{ mm}^2/\text{s}$;
- sűrűsége 15°C, $\rho = 0,91 \text{ g/cm}^3$.

A vizsgálat menete: a terhelést percenként, fokozatosan növeljük mindaddig, amíg berágódás jelenik meg a próbatesten, amit egy jellegzetes hang jelez.

A kopásnyomok a Cu-, CuZn-, C45-próbatestek felületein a **6. ábrán** figyelhetők meg.

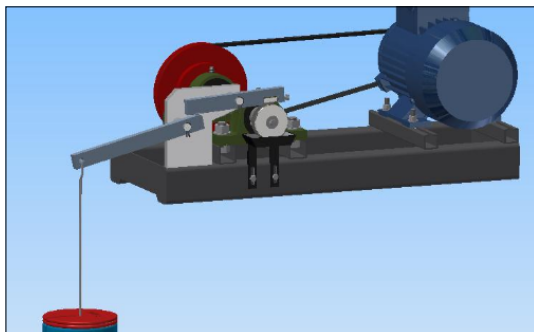
2.3. Mérési eredmények

A **1. táblázat** tartalmazza a vizsgálat során kapott mérési eredményeket.

A berendezés lehetővé tette a kopásfolyamat precíz nyomon követését, miközben reprodukálható és megbízható adatokat szolgáltat egy meghatározott kenőolaj esetében a két különböző, érintkezésben levő anyagnál.

A kenőanyag maximális terhelhetősége acél-acél esetében a legnagyobb. Itt 2350 gramm átlagterheléssel és 320 s átlagterhelési idő alatt jelentkeznek a 0,5 milliméter kopásszélesség.

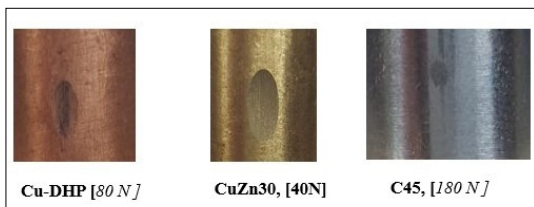
Kenés alatt az azonos anyagok acél-acél érintkezése esetében nagyobb terhelés mellett jelentkeznek a kopásnyom, mint acél-vörösréz vagy acél-sárgaréz esetében.



4. ábra. Berendezés térbeli modellje



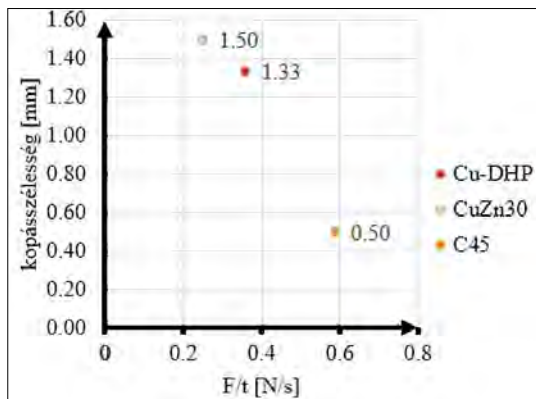
5. ábra. Elkészült berendezés



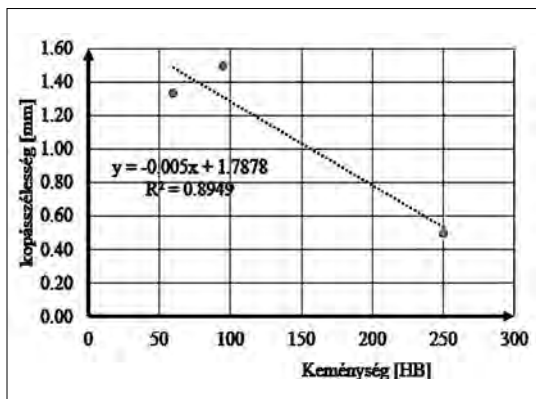
6. ábra. Kopásnyomok a Cu-, CuZn-, C45-próbatestek felületein

1. táblázat. A mérési adatok értékei

		Terhelő- tömeg [g]	Terhelő- erők [N]	Időtartam [s]	Kopás- szélesség
Acél	Vörösréz	1000	80	240	1
		1250	100	270	1,5
		1250	100	270	1,5
Átlag		1166,(6)	93,(3)	260	1,(3)
Acél	Sárgaréz	500	40	120	1
		500	40	180	1,75
		500	40	180	1,75
Átlag		500	40	160	1,5
Acél	Acél	2300	200	330	0,5
		2250	180	300	0,5
		2300	184	330	0,5
Átlag		2283,(3)	188	320	0,5



7. ábra. A terhelésideő változó befolyása a kopászélességre



8. ábra. Az anyag keménységének hatása a kopászélességre

2.4. Adatok feldolgozása

A terhelőerő és terhelés ideje befolyásolja a begárgóási nyom méretét, 1. táblázat.

Az adatfeldolgozás érdekében bevezettünk egy változót, amely magában foglalja a terhelőerőt és a terhelés idejét is. A változó a terhelőerő és a terhelés idejének aránya, F/t arány, ahol: F a terhelő erő [N]; t a terhelés ideje [s].

A változó függvényében nyomon követhető a különböző anyagok Cu, CuZn, C45 kopászélessége az adott kenőanyag jelenlétében.

Az adatokat a 2. táblázat tartalmazza.

A 7. ábra megjeleníti a mérés során meghatározott kopászélességeket az F/t arány függvényében.

Az anyag keménységének hatása a kopászélességre a 8. ábrán figyelhető meg. A rajta látható korreláció, $R_2 = 0,89$, erős kapcsolatot mutat a Cu-, CuZn-, C45-anyagok keménysége és a kopászélességek között.

A regressziós egyenes megmutatja, hogy minél nagyobb az anyagok keménysége, annál kisebb a kopászélesség.

2. táblázat. Adatfeldolgozási értékek

HB	Terhelő-erők [N]	Kopási hang megjelenése t[s]	Erő/idő	Kopászélesség
60	93,(3)	260	0,358974	1,33
95	40	160	0,25	1,50
250	188	520	0,5875	0,50

3. Következtetések

Vizsgálat során bebizonyítottuk, hogy a kenőanyag használata esetén a kopásnyom függ az érintkezőfelületek anyagától.

Az elvégzett validációs kísérletek igazolták, hogy ez a tribológiai laborgyakorlatra készült berendezés alkalmas a kenőanyagok terhelhetőségének vizsgálatára, támogatva ezzel a megfelelő kenőanyag kiválasztását és optimalizálását különböző ipari alkalmazásokhoz.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kozma M.: *Gépelemek* 9. Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Kar, Műegyetemi Kiadó, 1995.
- [2] Műszeroldal: A kenőanyagok vizsgálata. <http://www.muszeroldal.hu/measurenotes/keno-anyagokvizsg.pdf>
- [3] Burschik E., Csop Á. et.al.: *Kenéstechnikai kézikönyv*. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1961.
- [4] Kozma M.: *Tribológia*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2001.
- [5] Matieșan D., Antal A., et.al.: *Elemente de proiectare pentru mecanisme cu șurub și piuliță*. Institutul politehnic Cluj-Napoca, 1985.
- [6] Valasek I.: *Tribológiai kézikönyv*. Tribotechnik Kft. Budapest, 1996.
- [7] Pavelescu D., Mușat M., Tudor A.: *Tribologie*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977.
- [8] Kozma M.: *Tribológia alapjai*. Veszprémi Egyetem Szakmérnöki Jegyzet, Kézirat, Bp. 1997.
- [9] Horváth M., Márkos S.: *Gépgyártástechnológia*, Műegyetem, 1995.



ACÉLOSZLOP ÉS ACÉLGERENDA KÖZÖTTI HOMLOKLEMEZES KAPCSOLATOK VISELKEDÉSÉNEK ANALITIKUS ÉS NUMERIKUS VIZSGÁLATA

ANALYTICAL AND NUMERICAL STUDY ON THE BEHAVIOR OF STEEL FLUSH END PLATE (FEP) CONNECTIONS

Sütő Abigail-Bethsabé,¹ Urszuly Nóra,² Lőrincz Barnabás-Attila,³ Nagy Zsolt,⁴
Buru Marius-Ştefan⁵

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia. suto.at.abigail@student.utcluj.ro

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia. urszuly.sz.nora@student.utcluj.ro

³ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia. barnabas.lorincz@campus.utcluj.ro

⁴ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia. zsolt.nagy@dst.utcluj.ro

⁵ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia. marius.buru@mecon.utcluj.ro

Abstract

This study evaluates the behavior of the steel flush end plate (FEP) beam-to-column external joint, presented in reference [1]. The investigations involve both analytical and numerical approaches to assess the performance of this typical connection. The analytical method, described in reference [2], represents the Component Method and the numerical analyses involved two finite element method-based software, Consteel and IDEA StatiCa. These two software tools adopt two distinct methodologies - one utilizing the Component Method, while the other implements the Component-Based Finite Element Method. A comparative analysis of the results was performed to evaluate the reliability of the analytical and numerical methods and to analyse the differences between these procedures. The results of the investigations indicate that the end plate is the weakest component of the examined connection. Therefore, a numerical parametric study was conducted to analyse the influence of the end-plate thickness on the overall behavior of the steel flush end-plate beam-to-column external joint.

Keywords: *steel structures, flush end-plate (FEP) connections, component method, component-based finite element method (CBFEM), semi-rigid joint.*

Összefoglalás

Ez a tanulmány egy külső, nem túlnyúló homloklemez-es gerenda-oszlop kapcsolat viselkedését vizsgálja, amelyet az [1] hivatkozás ismertet. Az elemzés során analitikus és numerikus módszerek voltak alkalmazva. Az analitikus metodológia – amelyet a [2] hivatkozás ismertet – a komponensmódszeren alapul, valamint a numerikus vizsgálatok két végeselem-alapú szoftver, a Consteel és az IDEA StatiCa segítségével valósultak meg. Az említett szoftverek eltérő számítási eljárásokat alkalmaznak: egyikük a komponensmódszert, míg a másik a komponensalapú végeselem-módszert (CBFEM) használja. Az eredmények összehasonlítása lehetővé tette az analitikus és numerikus eljárások megbízhatóságának kiértékelését, valamint az alkalmazott módszerek közötti eltérések elemzését. Az eredmények szerint a vizsgált kapcsolat legkritikusabb eleme a homloklemez. Ennek fényében, numerikus eljárásokat alkalmazva, a parametrikus vizsgálatok kimutatták a homloklemez vastagságának hatását a csomópont viselkedésére nézve.

Kulcsszavak: *acélszerkezetek, nem túlnyúló homloklemez-es kapcsolatok, komponensmódszer, komponensalapú végeselem-módszer, félmerev csomópont.*

2. táblázat. A vizsgált kapcsolat analitikus eredményei

Név	Kezdeti merevség $S_{j,ini}$ [kNm/rad]	Hajlítási kapacitás $M_{j,Rd}$ [kNm]	Különbség (%)
A-p10mm	10034.49	34.28	0
A-p12mm	11466.35	39.54	14.26
A-p14mm	12312.10	45.77	22.70
A-p16mm	12796.50	52.94	27.53
A-p18mm	13064.54	57.64	30.19
A-p20mm	13201.75	57.82	31.56

3. táblázat. A vizsgált kapcsolat Consteelből származó eredményei

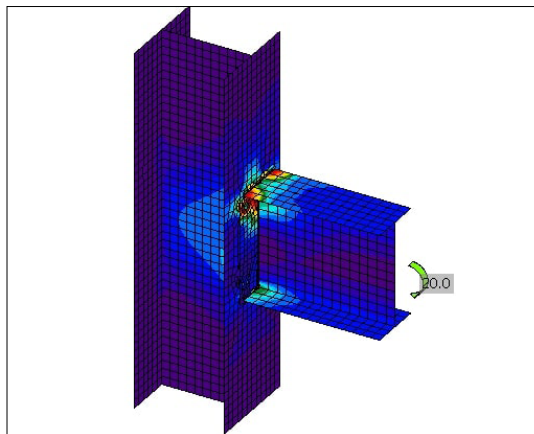
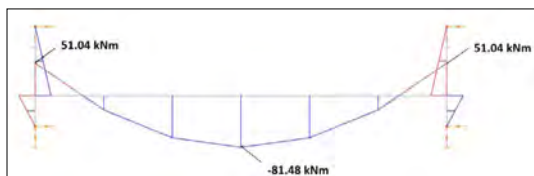
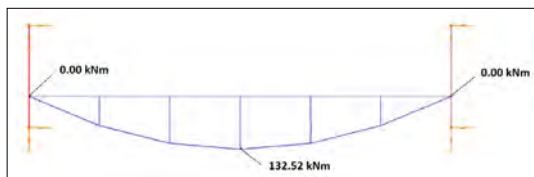
Név	Kezdeti merevség $S_{j,ini}$ [kNm/rad]	Hajlítási kapacitás $M_{j,Rd}$ [kNm]
NC-p10mm	9216.41	34
NC-p12mm	10929.6	39.14
NC-p14mm	12026.5	45.22
NC-p16mm	12700.32	52.23
NC-p18mm	13102.63	52.07
NC-p20mm	13333.14	52.07

4. táblázat. A vizsgált kapcsolat Idea StatiCából származó eredményei

Név	Kezdeti merevség $S_{j,ini}$ [kNm/rad]	Hajlítási kapacitás $M_{j,Rd}$ [kNm]
NI-p10mm	9319.441	31.022
NI-p12mm	11359.719	38.301
NI-p14mm	11818.897	45.233
NI-p16mm	12629.169	52.165
NI-p18mm	13351.153	53.032
NI-p20mm	13860.144	53.205

A komponensmódszerrel szemben a CBFEM-eljárás ötvözi a komponensmódszer és a végeselem-módszer előnyeit azáltal, hogy a csomópontot egyedi komponensekre bontja, majd nemlineáris anyagelemzést alkalmaz ezek egyenkénti és teljes szerkezeti vizsgálatára. Ezáltal az említett metodológia figyelembe veszi a komponensek közötti kölcsönhatásokat, amelyek végső soron meghatározzák a csomópont teljes teherbírását, ahogyan azt Lubomír Šabatka [4] is leírja.

Numerikus elemzés készült mindkét módszer összehasonlítására, valamint az analitikus eredmények validálására. A Consteel és az analitikus módszer eredményei nem mutattak jelentős különbségeket. Az eltérések a vizsgált kapcsolat kez-

**2. ábra.** A vizsgált kapcsolat végeselem-modellje**3. ábra.** A vizsgált kapcsolat hajlítónyomaték-diagramja**4. ábra.** Egy csuklós kapcsolat hajlítónyomaték-diagramja

deti merevsége és a hajlítási kapacitása szintjén 10% alatt maradtak.

Az analizált kapcsolat végeselem-modelljét a **2. ábra** mutatja be, a numerikus modellek eredményei pedig a **3** és **4. táblázat**ban találhatók. Továbbá, egy paraméteres vizsgálat is készült a homloklemez vastagságának növelésével.

4. Eredmények

Az ArcelorMittal többszintes épületekre vonatkozó tervezési útmutatója [5] szerint, a relatív vékony homloklemezzel (10 mm vastag S275 acélminőségű) kialakított kapcsolatok többnyire csuklósnak tekintendők. Ennek ellenére a kifejlesztett numerikus modellek azt mutatták, hogy a vizsgált, nem túlnyúló kapcsolat félmerev. A **3.** és **4. ábra** szemlélteti a hajlítónyomaték eloszlása közötti különbségeket egy 8.00 m fesztá-

volságú keretszerkezet esetében. Az első változat a vizsgált kapcsolat hatását szemlélteti a hajlítónyomaték szerkezeten belüli eloszlására, míg a második esetben egy csuklós kapcsolat lett alkalmazva referenciaként, amely a különböző kapcsolattípusok szerkezeti viselkedésre gyakorolt hatásának összehasonlítását teszi lehetővé.

A 10 mm vastagságú, nem túlnyúló homloklemez-es kapcsolat esetén a számítási eredmények magas fokú hasonlóságot mutatnak, az eltérések mértéke kevesebb mint 10%. Az analitikus számoláshoz hasonlóan, a Consteel szoftver is a komponensmódszert alkalmazza, és mindkét esetben a vizsgálatok közel azonos hajlítási kapacitás- és kezdetimerősség-értékeket eredményeztek. Annak ellenére, hogy az Idea StatiCa szoftver a komponensalapú végelem-módszert (CBFEM) használja, az általa rögzített eredmények nem térnek el jelentősen a komponensmódszerrel meghatározott értékektől.

A különböző módszerekkel végzett elemzések egybehangzóan igazolták, hogy a vizsgált kapcsolat legkritikusabb eleme a homloklemez. Vastagságának növelése jelentősen javítja a vizsgált kapcsolat hajlítási kapacitását és a kezdeti merevségét, azonban 16 mm vastagság felett ez a hatás csökken.

5. Következtetések

A tanulmány egy kizárólag acélból gyártott oszlop és gerenda közötti, nem túlnyúló homloklemez-es kapcsolatot vizsgált. Az analitikus és numerikus vizsgálatok igazolták a kapcsolat fél-

merev viselkedését és hajlítónyomaték-átadó képességét.

Az eredmények azt mutatják, hogy a komponensmódszer és a komponensalapú végelem-módszer (CBFEM) hasonló nyomatéki ellenállási és merevségi értékeket ad, az eltérések a vizsgált csomópont esetében elfogadható tartományon belül maradnak.

A tanulmány további célkitűzései között szerepel egy kísérleti program megvalósítása, amely kétféle kapcsolat vizsgálatát foglalja magában: kizárólag acélelemekből álló csomópontokat, valamint acéloszlopokból és öszvérgerendákból álló csomópontokat.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gil B., Bayo E.: *An Alternative Design for Internal and External Semi-Rigid Composite Joints. Part I: Experimental research*. Engineering Structures, 30, 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.009>
- [2] Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-8: Design of Joints, European Standard, 2005.
- [3] Jaspart J.-P., Weynand K.: *Design of Joints in Steel and Composite Structures*. ECCS-European Convention for Constructional Steelwork, Berlin 2016. 401.
- [4] Šabatka L., Wald F., Kabeláč J., Kolaja D., Pospíšil M.: *Structural Analysis and Design of Steel Connections Using Component-Based Finite Element Model*. Journal of Civil Engineering and Architecture 9/8. (2015).
<https://doi.org/10.17265/1934-7359/2015.08.002>
- [5] ArcelorMittal: *Multi-Storey Steel Buildings – Part 2: Concept Design*, 2008.



HÁTSÓ LÉGTERELŐ TERVEZÉSE ÉS VIZSGÁLATA ELEKTROMOS VERSENYAUTÓRA

DESIGN AND EXAMINATION OF A REAR SPOILER FOR AN ELECTRIC RACE CAR

Taskó Dániel,¹ Szántó Attila,² Pettendi Dávid,³ Diós Szabolcs Sándor,⁴ Husi Géza⁵

¹ Debreceni Egyetem, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, dtasko2001@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, Magyarország, szanto.attila@eng.unideb.hu

³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, pettendid4@gmail.com

⁴ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Informatikai Kar, Debrecen, Magyarország, dios.szabolcs@eng.unideb.hu

⁵ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, husigeza@eng.unideb.hu

Abstract

The task of the project was the design and CFD simulation of a Toyota MR2 component. The design took into account that the vehicle will be modified for racing purposes. Accordingly, a wing profile was chosen and a 3D CAD model of the profile was created. The wing was designed considering the aerodynamic characteristics of the car, and the brackets to attach the wing to the vehicle were also made. During the testing process, the optimum entry angle of the wing was found.

Keywords: *electric race car, aerodynamics, rear wing, wing profile, CFD simulation.*

Összefoglalás

A projekt feladata egy Toyota MR2 alkatrész tervezése és CFD-szimulációkkal történő vizsgálata volt. A tervezés során figyelembe vettük, hogy a jármű versenyzési céllal kerül átalakításra. Ennek megfelelően választottunk egy szárnyprofil, és elkészítettük a profil 3D CAD-modelljét. A szárnyat az autó aerodinamikai jellemzőinek figyelembevételével terveztük meg, valamint a szárnyat a járműhöz rögzítő konzolok is elkészültek. A tesztelési folyamat során megkerestük a szárny optimális belépési szögét.

Kulcsszavak: *elektromos versenyautó, aerodinamika, hátsó szárny, szárnyprofil, CFD-szimuláció.*

1. Bevezetés

A Debreceni Egyetem, Műszaki Kar járműipari vonatkozásban új fejlesztéseket indított el. A mesterséges intelligencia egyre nagyobb térhódítása miatt a Járműgyártás Laboron belül mi is elkezdtük beintegrálni a fejlesztésekbe és az oktatásba. A labor számos régebbi robotegységgel rendelkezik, melyek jelenleg funkcióbővítésen mennek át, így képesek lesznek a mesterséges intelligencia használatára [1].

A laborról készült egy Digital-Twin-modell is, így lehetőségünk van a virtuális laborban mérések elvégzésére [2]. Továbbá a virtuális 3D-robotok programozása is lehetséges anélkül, hogy ténylegesen a laborban lennénk [3]. A laboron szintén történtek mérések a robotika területén, elsősorban szingularitásmérések-témakörben [4].

A jármű navigáció tekintetében, augmented reality- (kiterjesztett valóság) technikát alkalmazva valósítottunk meg AGV-pályatervezést [5].

Célunk, hogy a laboron belül kialakításra kerüljön egy Ipar 5.0 mintagyártó rendszer, ahol az egyes robotegységek saját dataset alapján történt AI-tanítás alapján tudnak döntéseket hozni a munkafolyamatokban, elsősorban szortírozási feladatok és pályatervezés terén [6].

Mivel a régió erősen támaszkodik a járműiparra, így számos szimulációs modell került megtervezésre villamos hajtások kapcsán [7]. Az ehhez szükséges telemetriai adatokat a korábbi versenyeink során mértük, amelyeket később elemeztünk [8].

A kor szellemiségének megfelelően a fenntarthatóság is kiemelt szerepet tölt be a fejlesztéseinkben [9]. Az innováció meghatározó a mérnöki szakmában, ami jelen van a járműfejlesztésben is.

Az autóversenyzésben egyre nagyobb szerepet kapnak az aerodinamikai elemek, amelyeknek köszönhetően a versenyautók egyre gyorsabbak lehetnek, és egyre jobb köridőket érhetnek el. Az aerodinamikai elemek segítik az autó körüli levegő hatékony elvezetését, és leszorítóerőt hoznak létre, ami nagyobb tapadást kölcsönöz a gépjárműnek, amivel nagyobb kanyarsebességek, rövidebb féktávok érhetők el, és jobb lesz a kigyorsítás is. A leszorítóerő mellett a légellenállást is növelik ezen berendezések, úgyhogy meg kell keresni az adott felhasználási mód mellett leghatékonyabb megoldást, ami az arany középút a leszorítóerő és a légellenállás között. A projekt célja egy elektromos versenyautóvá alakítandó Toyota MR2-es gépjármű hátsó légtérelőjének (szárnyának) megtervezése.

2. A hátsó légtérelő működése

A hátsó légtérelő olyan aerodinamikai elem a gépjárművön, amely feladata a nagyobb tapadás létrehozása, valamint stabilabbá tenni a járművet nagy sebességek esetén [11].

A légtérelő (szárnyak) működésüket tekintve a Bernoulli-elvet és Newton 3. törvényét kihasználva képzik a felhajtóerejüket. A szárny domború felületén a Bernoulli-elv miatt a levegő felgyorsul, és lecsökken a nyomása [12]. A szárny másik oldalán lévő levegő nagyobb nyomása pedig Newton 3. törvénye alapján a kisebb nyomás felé tolja a szárnyat [13].

A szárny hatékonyságát öt jellemző befolyásolja: a felhajtóerő- és légellenállási együtthatók, a belépési szög, az aspect ratio (a szárny hossz-szélesség aránya), valamint a szárnyprofil kialakítása [14]. Ezen jellemzőket a szárnyprofil céljának ismeretében kell megválasztani [15].

A gépjárművekre szerelt szárnyak „kvázi” ugyanúgy működnek, mint a repülőgépek szárnyai. Az a különbség a kettő között, hogy a gépjárművek hátsószárnyai fejjel lefelé helyezkednek el, így a felhajtóerejüket az ellentétes irányban fejtik ki. A szárny által kifejtett erő végül nagyobb tapadást eredményez [16].

Fontos megemlíteni a szárnyvéglapokat, amelyek csökkentik a szárnyvégeken kialakuló turbulenciát, amely a nyomáskülönbségek kiegyenlítése során keletkezik [17].

Egy autó légellenállása a következő képlettel számolható ki:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D \cdot A \quad (1)$$

A turbulens légörvények rontják a szárny hatékonyságát, növelve a légellenállást és csökkentve a felhajtóerőt. A véglapok minimalizálják ezeket a káros hatásokat, javítva a szárny aerodinamikai teljesítményét [18]. Egy autóra ható felhajtóerőt a következő képlettel lehet kiszámolni:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_L \cdot A \quad (2)$$

3. A hátsó légtérelő megtervezése

A választott gépjármű a Debreceni Egyetem, Műszaki Kar tulajdonában lévő Toyota MR2-es. A tervezés során az elérhető hivatalos adatai kerültek felhasználásra [19].

A szárny tervezése során a jármű aerodinamikai jellemzőinek és a szlalomversenyzés specifikus igényeinek megfelelően határoztuk meg a kialakítás főbb szempontjait. A szárny méretezésénél alapvető kritérium volt, hogy az autó szélességét, amely 1700 mm, ne haladja meg. Ez azért fontos, mert a szlalompályákon az akadályok kerülgetése során a karosszéria síkjából túlnyúló elemek akadályozhatnák a manőverezést [20]. Ennek megfelelően a szárny fesztávolságát 1700 mm-ben állapítottuk meg, míg a szárnyprofil hossza 300 mm lett.

Az aerodinamikai jellemzők megválasztásakor alapvető szempont volt a megfelelő leszorítóerő elérése viszonylag alacsony légellenállás mellett. A szlalomversenyeken, ahol általában az alacsonyabb sebességek dominálnak, a nagyobb leszorítóerő kiemelten fontos, mivel növeli a jármű tapadását. A légellenállás minimalizálása ugyan másodlagos szempont volt, de egy ilyen nagy teljesítményű jármű esetében mégis előnyös tényezőként szerepelt.

A szárny tervezése során figyelmet fordítottunk az állíthatóság biztosítására is. A szlalomversenyeket különböző jellegű pályákon rendezik, amelyek eltérő aerodinamikai követelményeket támasztanak. Az állítható belépési szög lehetővé teszi, hogy a szárny mindig az adott pálya specifikus igényeihez igazodjon, ezáltal optimális teljesítményt nyújtson.

A szárnyprofil kiválasztásához, a szakirodalmi adatokra [21] támaszkodva, egy nagy előrehajlású, kimagasló felhajtóerőt biztosító modellt választottunk, amely emellett viszonylag alacsony légellenállással rendelkezik. A profil megtervezéséhez az NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) [22] által kifejlesztett szárnyprofil-generátort használtam. Ez az eszköz lehetővé tette a kívánt geometriájú profil pontos megalkotását, amely a szárny aerodinamikai teljesítményének alapját képezi.

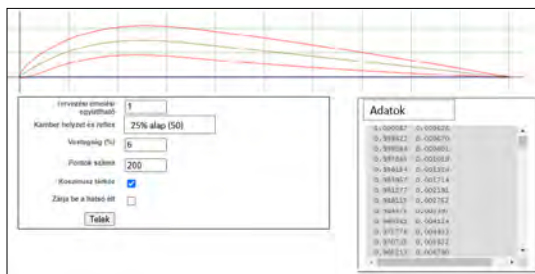
Az NACA-generátor segítségével egy 5 számjegyű szárnyprofilot állítottunk elő, amely megfelel a nagy felhajtóerő követelményeinek. A generálás során a profil kialakításához a felhajtóerő-együtthatót 1,0 értékre állítottuk be, az előrehajlás maximumát a profil hosszának 25%-ánál helyeztük el, míg a vastagságot a húr hosszának 6%-ára határoztuk meg. Az így kapott szárnyprofil a tervezési és szimulációs folyamatok alapjául szolgált, biztosítva a szárny optimális működését [22]. A szárnyprofil-generátor az 1. ábrán látható.

Majd az elkészült szárnyprofilból megterveztük a 3D CAD-modellt, amelyet a 2. ábra reprezentál.

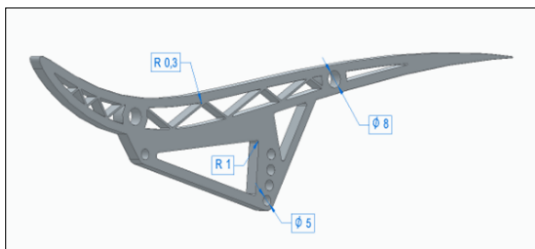
3.1. A szárnyborda megtervezése

A szárnyborda tervezésénél fontos szempont volt az additív gyártási technológia alkalmazhatósága. Ennek érdekében a borda 300 mm hosszúra, 6 mm vastagra, 4 mm falvastagságúra lett megtervezve, amely elegendő merevséget biztosít a fellépő erőhatásokkal szemben. A belső merevítések 1 mm vastagságúak, a kapcsolódási pontoknál pedig 0,3 mm-es lekerekítések találhatók. Két, 8 mm átmérőjű lyuk lehetővé teszi a szárny vázának egyszerű és stabil összeszerelését alumíniumrudakra. A kialakítás könnyű, merev és gazdaságosan gyártható (3. ábra).

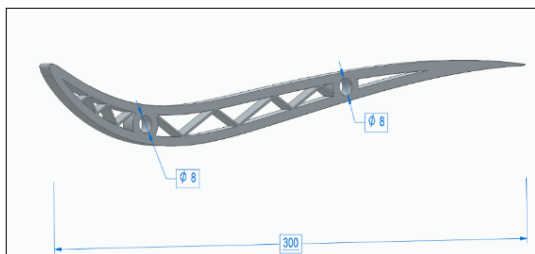
Annak érdekében, hogy a turbulens légáramlatok minél kevésbé rontsák a szárnyhatásfokát, a szárnyhoz tervezett véglap nagy felületű lett. 250 mm magas és 350 mm hosszú, és az alsó oldal 250 mm-nél 45 fokos szögben felfelé irányul. A vastagsága 5 mm. Különböző lekerekítések láthatók a modellen (4. ábra), amelyek szintén az áramlás javításáért és a légörvények csökkentéséért felelnek.



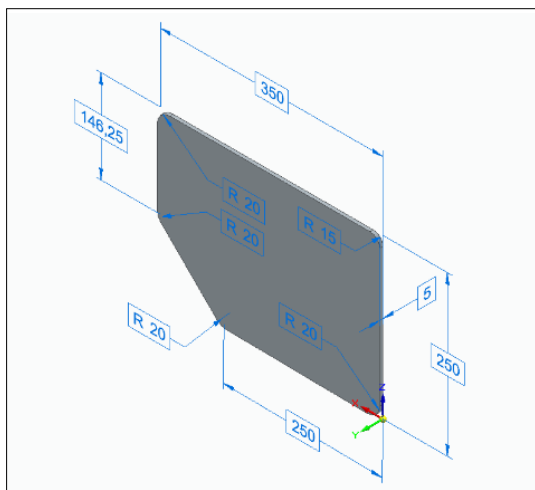
1. ábra. NACA-szárnyprofil-generátor [22]



2. ábra. Szárnyprofil-3D CAD-modell



3. ábra. Szárnyborda



4. ábra. Szárnyvéglap

A rögzítőkonzolok célja, hogy a szárnyszerkezetet stabilan és biztonságosan a jármű karosszériájához rögzítsék, biztosítva a szárny megfelelő pozícióját és szögét a gyorsítás, fékezés és a leszorítóerő hatásai mellett. Fontos, hogy a konzolok kialakítása és anyaga garantálja a szerkezet deformációmentességét és aerodinamikai teljességszerűségét. A konzolok tervezéséhez a Solid Edge [23] programot használtuk. Az alapot 250 mm hosszúra, 80 mm szélesre és 10 mm vastagra terveztük. Az autó csomagtartófedeléhez történő rögzítést négy, 5 mm átmérőjű furat biztosítja, amelyek az alap négy sarkában helyezkednek el (5. ábra).

A szárnyat a szárnykonzolokhoz egy módosított szárnyborda segítségével lehet rögzíteni, és az állíthatóságot is ez biztosítja.

3.2. A szárny összeállítása

Az összeállítási modellt Solid Edge Assemblyvel készítettük el.

Az elkészült alapra meghatároztuk a furatok helyét, és ezen furatokra lettek ráillesztve a szárnyat tartó konzolok.

A konzolokra ráillesztettük a rögzítésre alkalmas szárnybordákat, és ezeket a Solid Edge modellkönyvtárból választott M5-ös csavarokkal rögzítettük egymáshoz. Ezután ráillesztettük a szárnymodellt, majd egyesítettük az elemeket.

Kétféle szárnymodellt is készítettünk, egyet szárnyvéglapok nélkül, és egyet szárnyvéglapokkal, ahogy a 6. ábrán látható.

4. CFD-szimulációs vizsgálat

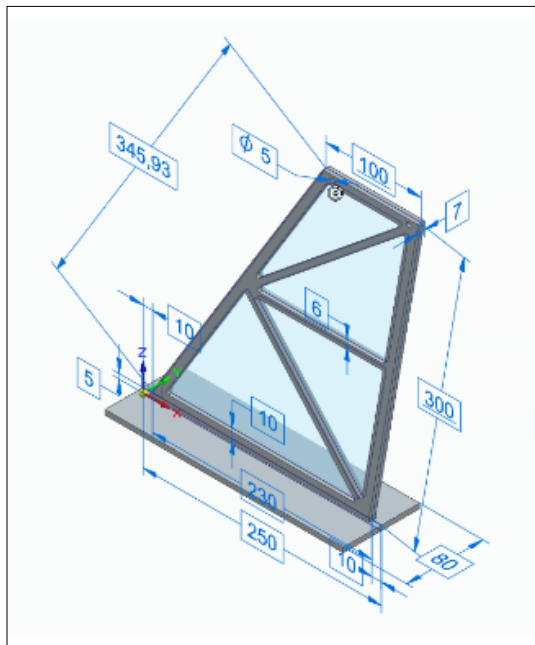
Az elkészült modelleket a Simscale [24] nevű CFD-szimulációs programba helyezve készítettük el az áramlástanai szimulációkat. A program a megadott áramlástanai értékek alapján meghatározta a modellre ható erők irányát és nagyságát.

A szimulációk során az áramlási sebességet 50 km/h-nak határoztuk meg, mivel saját tapasztalataink alapján a szlalomversenyeken ritkán szokott ennél nagyobb kanyarsebességek elérésére alkalmas kanyar lenni.

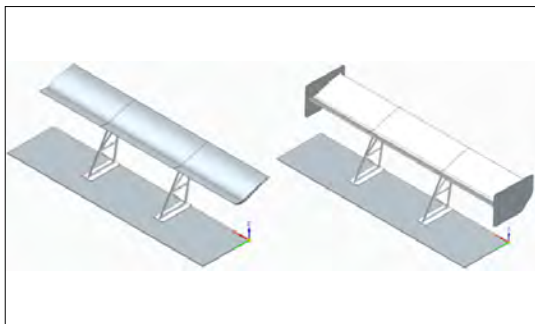
A meghatározott sebességhez szimulációk segítségével megállapítottuk a legmegfelelőbb belépési szöget (7. ábra).

A szimulációk során kapott értékeket egy táblázatba rendeztük, és abból választottuk ki a 10°-os belépési szöget (lásd 1. táblázat).

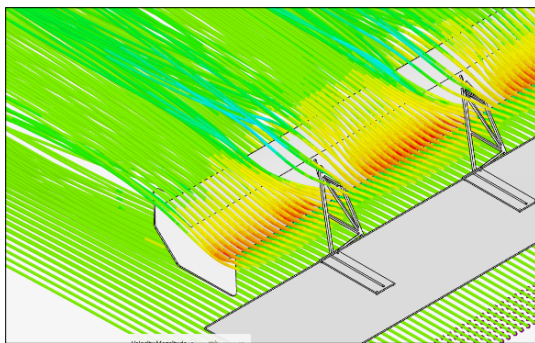
Ezzel a beállítással készítettük el a CFD-szimulációkat mind a véglap nélküli szárnyon, mind a véglappal rendelkező szárnyon.



5. ábra. Rögzítőkonzol



6. ábra. Szárnyvéglap nélküli és szárnyvéglapos összeállítási modell



7. ábra. 10°-os belépési szögű szárnymodell CFD-szimulációja

1. táblázat. Szárnyprofilok CFD-szimulációs értékei

Belépési szög	Leszorítóerő	Légellenállás
0°	17–20 N	3–3,5 N
5°	47–49 N	4–4,5 N
10°	72–73 N	5–6,5 N
15°	82–85 N	14–16 N

4.1. A szárnyvéglap nélküli szárny szimulációja

A CFD-szimuláció eredménye szerint az összeszerelt modell 41–42 N leszorítóerőt ér el, ami nagyban elmarad az egyszerű szárnymodell értékeitől. Ez a teljesítménybeli visszaesés nem meglepő, hiszen a konzolok jelentős mértékben megtörik a szárny alatti áramlást, és légörvényeket idéznek elő.

Nyilvánvalóan az összeszerelt modell légellenállása nagyobb, mint az egyszerű szárnymodell esetén. Így 12–13 N a légellenállása a teljes modellnek.

4.2. A szárnyvéglapos szárny szimulációja

A szimuláció azt az eredményt hozta, hogy 52–53 N leszorítóerőt produkált a véglapokkal ellátott szárny. A véglapok csökkentették a szárnyvégeken fellépő turbulenciát, ezáltal növelték a leszorítóerőt. A légellenállás is csökkent a szárnyvég nélküli szárnymodellhez képest, habár nem nagymértékben, de javult ebből a szempontból is. Jól látszik, hogy a véglapnak köszönhetően az alacsonyabb és a magasabb nyomású levegő nem tud a szárnyvégen turbulens légáramlatot létrehozni.

A két szárny között jelentős különbségek alakultak ki a szimulációk során, amelyeket egy táblázatban foglaltunk össze. Az adatok alapján a szárnyvéglapos megoldás a hatékonyabb, és ez lesz a versenyautó számára a legjobb megoldás. Az összevontat a **2. táblázat** tartalmazza.

5. Konklúzió

A projekt célja egy hátsó légtérrel tervezése és szimulációs vizsgálata volt, amely a Toyota MR2 járművön javíthatja a szlalomversenyekhez szükséges menetdinamikát. A szárny tervezése során a szakirodalom alapján meghatároztuk az optimális szárnyprofil és a szimulációkhoz szükséges geometriai paramétereket. A Solid Edge programmal elkészített 3D-modell elemzésében a szárny-

2. táblázat. Szárnyvéglap nélküli és a szárnyvéglapos

Szempon- tok	Szárnyvéglap nélküli szárny	Szárnyvéglapos szárny	Különbség
Leszorítóerő	42 N	53 N	21%
Légellenállás	13 N	12 N	8%

véglapok hatékonyságát is vizsgáltuk, mivel ezek csökkentik a végeken keletkező örvényléseket, növelik a leszorítóerőt, és mérsékelik a légellenállást. A CFD-szimulációk 50 km/h sebességnél azt mutatták, hogy a szárnyvéglappal ellátott konfiguráció 21%-kal nagyobb leszorítóerőt és 8%-kal alacsonyabb légellenállást eredményezett, mint a véglap nélküli változat. Ezek az előnyök jelentősen javítják a jármű kanyarodási képességeit és gyorsulását, ami a versenyen kiemelt fontosságú.

Mivel a Műszaki Kar, Járműgyártás Laborban, DAQ adatgyűjtő rendszereket is alkalmazunk [25], így a későbbiekben lehetőségünk lesz összevetni az adatokat egymással, ha elvégeztük a módosításokat a járművön [26].

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk köszönetet nyilvánítani Erdei Timoteinek, a Járműmérnöki Tanszék oktatójának egyben a Járműgyártás Labor vezetőjének. Továbbá a Debreceni Egyetem Műszaki Karának.

„A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EKÖP-24-4 KÓDSZÁMÚ EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kapusi T. P., Erdei T. I., Husi G., Hajdu A.: *Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection*. Robotics, 11. (2022) 69.
<https://doi.org/10.3390/robotics11040069>
- [2] Erdei T. I., Krakó R., Husi G.: *Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm*. Appl. Sci. 12. (2022) 8862.
<https://doi.org/10.3390/app12178862>
- [3] Erdei T. I., Nusser D. P., Husi G.: *Cyber-Physical Recreation of Six DOF Industrial Robot Arm*. International Review of Applied Sciences and Engineering, 15/2. (2024) 147–160.
<https://doi.org/10.1556/1848.2023.00660>
- [4] Erdei T. I., Husi G.: *Singularity Measurement in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Labo-*

- ratory. International Review of Applied Sciences and Engineering IRASE, 11/2. (2020) 82–87.
<https://doi.org/10.1556/1848.2020.20001>
- [5] Erdei T. I., Molnár Zs., Obinna Nwachukwu C., Husi G.: *A Novel Design of an Augmented Reality Based Navigation System & its Industrial Applications*. ACTA IMEKO, 7/1 (2018) 57–62.
https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v7i1.528
- [6] Erdei T. I., Kapusi T. P., Hajdu A., Husi G.: *Image-to-Image Translation-Based Deep Learning Application for Object Identification in Industrial Robot Systems*. Robotics, 13. (2024) 88.
<https://doi.org/10.3390/robotics13060088>
- [7] Szántó A., Ádámkó É., Juhász G., Sziki G. Á.: *Simultaneous Measurement of the Moment of Inertia and Braking Torque of Electric Motors Applying Additional Inertia*. Measurement, 204.(2022) 112135.
- [8] Sziki G. Á., Szántó, A., Kiss J., Juhász G., Ádámkó É.: *Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering, University of Debrecen*. Applied Sciences, 12/19. (2022) 10095.
- [9] Mollah M. A., Amin M. Bin, Debnath G. C., Hosain M. S., Rahaman M. A., Abdullah M.: *Nexus among Digital Leadership, Digital Transformation, and Digital Innovation for Sustainable Financial Performance: Revealing the Influence of Environmental Dynamism*. Sustainability (Switzerland), 16/18. (2024) 8023.
<https://doi.org/10.3390/su16188023>
- [10] Mollah M. A., Pal D., Amin M. Bin, Rahaman M. A., Abdullah M.: *Effect of Technological Culture and Knowledge Sharing on Organizational Performance: The Mediating Role of Digital Innovation and Self-Efficacy as Moderation*. Journal of Infrastructure, Policy and Development, 8/12. (2024) 7594.
<https://doi.org/10.24294/jipd.v8i12.7594>
- [11] Build Your Own Race Car: Car Aero-dynamics Basics and How-to Design Tips Cont [Online],
https://www.buillyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/4/#-google_vignette
- [12] Filipovic M., Vukobratovic M.: *New Interpretation of the Euler-Bernoulli Equation*. 6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, Subotica, Serbia, 2008, 1–6.
<https://doi.org/10.1109/SISY.2008.4664967>
- [13] Bloch A. M., Crouch P. E.: *Newton's Law and Nonholonomic Systems*. Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.98CH36171), Tampa, FL, USA, vol.4 (1998) 3569–3574.,
<https://doi.org/10.1109/CDC.1998.761733>
- [14] Mechanical Engineering Assignment Help [Online],
<https://www.mechanicalengineeringassignment-help.com/blog/optimizing-aerodynamics-race-car-rear-wing/>
- [15] Racing Car Dynamics: How Air Improves Lap Times [Online],
<https://racingcardynamics.com/race-car-aerodynamics-air-lap-times/>
- [16] Technical: Rear Wing Endplates in F1: An Extensive Analysis, [Online],
<https://www.f1technical.net/features/20279>
- [17] Happian-Smith J.: 5. *Body Design: Aerodynamics*. In: *An Introduction to Modern Vehicle Design*. Publisher Butterworth Heinemann, 2000. ISBN: 0-7506-5044-3.
- [18] Zomotor Á.: 2. *Járműre ható erők*. In: *Gépjármű menetdinamika*, Széchenyi István Egyetem és IB Hungaria Járműakadémia, Kiadó: Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó, 2006.
- [19] Toyota MR2 Datasheet [Online];
<https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/MR2-Gen2-UK-launch-pack-1990.pdf>
- [20] McBeath S.: *Competition Car Downforce: A Practical Handbook*. Haynes 2000.
- [21] Toyota Motor Corporation, Toyota Completely Renews its MR2, Toyota Global Newsroom, [Online];
<https://global.toyota/en/detail/7838423>
- [22] Airfoil Tools: NACA 5 Digit Airfoils [Online];
<http://www.airfoiltools.com/airfoil/naca5digit>
- [23] Gongzhang, Hanlin & Axtelius, Eric. (2020). *Aircraft Winglet Design*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34449.92001>
- [24] Murad, Jousef: *Harnessing the Power of the Cloud -Computational Fluid Dynamics With SimScale*. (2021). 10.1115/FEDSM2021-66406.
- [25] Dave G. S., Pandhare A. P., Kulkarni A. P., Khankal D. V., Abdullah M.: *Experimental Investigation of Centrifugal Pump Machine and Its Faults through Different Type of DAQ System and Selecting One Based on Statistical Approach*. Cogent Engineering, 11/1. (2024).
<https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2417683>
- [26] Masuk A., Diós S. S., Dinya T., Szántó A., Husi G.: *Labor Developments and Methods for Supporting Education in the Cyber-Physical and Intelligent Robot Systems Laboratory*. Műszaki Tudományos Közlemények, 20. (2024) 36–41.
<https://doi.org/10.33894/mtk-2024.20.07>



ZETOR 10245-TÍPUSÚ MEZŐGAZDASÁGI VONTATÓ KIEGYENSÚLYOZÓTENGELYE FORGÁCSOLÁSTECHNOLÓ- GIÁJÁNAK TERVEZÉSE ÉS VÉGESELEM-SZIMULÁCIÓJA

DESIGN AND FINITE ELEMENT SIMULATION OF ZETOR 10245 TYPE AGRICULTURAL TRACTOR BALANCER AXLE TURNING TECHNOLOGY

Varga Csaba,¹ Szántó Attila,² Asztalos Tamás Gergő,³ Diós Szabolcs Sándor,⁴ Husi Géza⁵

¹ Debreceni Egyetem, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, csabavarga.t@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, Magyarország, szanto.attila@eng.unideb.hu

³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Debrecen, Magyarország, gergoasztalos.28@gmail.com

⁴ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Informatikai Kar, Debrecen, Magyarország, dios.szabolcs@eng.unideb.hu

⁵ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, husigeza@eng.unideb.hu

Abstract

The project is investigating the production of a balancer shaft for the Zetor 10245 tractor, focusing on vibration reduction for in-line four-cylinder engines. Using 100Cr6 high-carbon bearing steel, advanced meg-machining techniques and finite element simulations were applied to optimize performance and life. Stress analysis, toolpath optimization and precision machining on a DMG MORI NT 4250 DCG machine ensured structural integrity and high-quality output. Surface roughness and performance measurements validated the design, demonstrating the effective integration of material selection, machining, and simulation to increase engine reliability.

Keywords: balance shaft, 100Cr6 steel, finite element simulation, machining optimization.

Összefoglalás

A projekt a Zetor 10245 traktor kiegyensúlyozó tengelyének gyártását vizsgálja, a soros négyhengeres motorok rezgéscsökkentésére összpontosítva. A 100Cr6 magas széntartalmú csapágyacél felhasználásával korszerű megmunkálási eljárásokat és végeselemes szimulációkat alkalmaztak a teljesítmény és az élettartam optimalizálása érdekében. A feszültségelemzés, a szerszámpálya optimalizálása és a DMG MORI NT 4250 DCG gépen végzett precíziós megmunkálás biztosította a szerkezeti integritást és a kiváló minőségű kimenetet. A felületi érdesség és a keménység mérései igazolták a tervezést, bizonyítva az anyagválasztás, a megmunkálás és a szimuláció hatékony integrációját a motor megbízhatóságának növelése érdekében.

Kulcsszavak: kiegyensúlyozótengely, 100Cr6 acél, végeselemes szimuláció, megmunkálásoptimalizálás.

1. Bevezetés

A debreceni régió nemcsak járműipari tekintetben fontos, hanem mezőgazdaságilag is. Éppen ezért a személygépjárművek mellett, a traktorokkal kapcsolatos fejlesztések és karbantartások is fontosak.

A kiegyensúlyozótengely kritikus szerepet játszik a soros négyhengeres motorok rezgéseinek csökkentésében az első- és másodrendű erők ellensúlyozásával. A 100Cr6 magas széntartalmú acél felhasználásával korszerű megmunkálási eljárásokat, például esztergálást, marást és hor-

nyolást alkalmaztam a következőkhöz pontosság és tartósság elérése érdekében. Végeselemes szimulációkat végeztünk a feszültségeloszlás, a deformáció és a valós körülmények közötti teljesítmény értékelésére. Ez az integrált megközelítés biztosítja egy megbízható alkatrész előállítását, mely növeli a motor hatékonyságát és élettartamát. A Zetor 10245 traktor az **1. ábrán** látható.

1.1. Kiegyensúlyozótengely elemzése

A csapágý helyén többféle kopási forma volt szembevetűő, átmérő csökkenése, illetve ovalítás is a tengely geometriájából adódóan, a csapágý-felfekvő felületein kívűli bemaródások valószínűleg a fogaskerék lecsúszását követően keletkezett, ugyanis a tengely tovább forgott a tömegéből adódó lendület megmaradása végett. A tengely maga **2. ábrán** tekinthető meg.

A különféle kopások mind egy irányba mutatnak, mégpedig anyagoldali, tervezett élettartam elérése csapágý- és tengelyvonatkozásban is, így az alábbi eset elkerűlhetetlen volt **[1, 2]**.

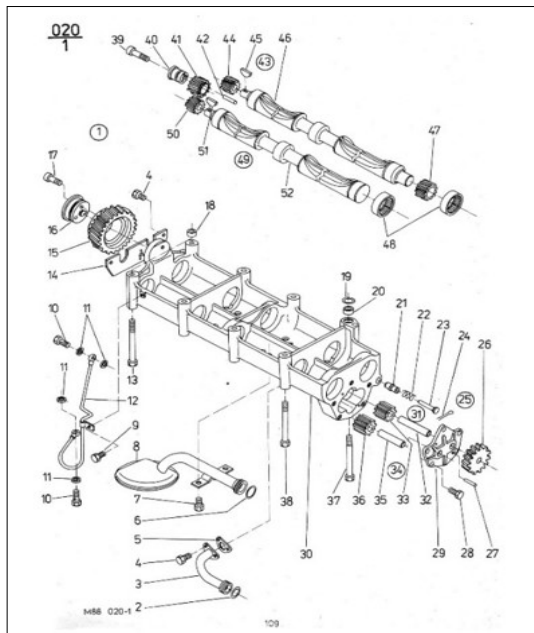
1.2. Anyagválasztás

A Sauter HO ultrahangos keménységmérő rendkívűl értékes eszköz volt ebben a projektben a kiegyensúlyozótengely anyagkeménységének és felületi érdességének értékeléséhez. Az alkalmazott mérőműszer a **3. ábrán** látható.

A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy mindkét oldalán közel egyenletes keménységi paraméterekkel rendelkezik, leszámítva az alkatrészcsapágý felületeit, amelyek kiemelkedően magas szilárdságot és kopásállóságot mutatnak a hosszabb tengely élettartam érdekében. A keménységmérés eredményei a **1. táblázat**ban kerültek összefoglalásra.

1.3. Választott anyag

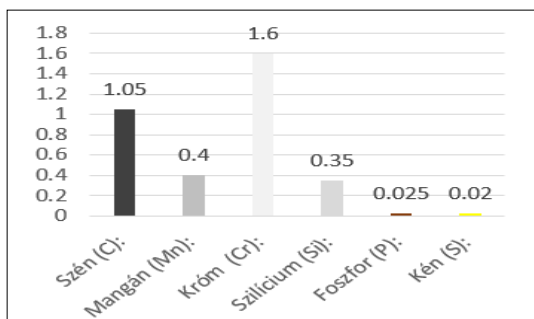
A kiegyenlítőtengetyhez a 100Cr6 anyagot választottam, ez az acél kiváló szilárdsággal, szívóssággal és kopásállósággal rendelkezik, így optimá-



2. ábra. A kiegyensúlyozóegység robbantott ábrája **[3]**



3. ábra. A Sauter HO keménységmérő



4. ábra. 100Cr6 kémiai összetételét ábrázoló diagram **[4]**



1. ábra. Zetor 10245 a tavaszi munkában

1. táblázat. A keménységmérés eredményei

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
21,6 HRC	56,7 HRC	31,1 HRC	58,9 HRC	30,8 HRC	56,9 HRC	22,1 HRC
22,2 HRC	48,1 HRC	27,9 HRC	55,9 HRC	29,2 HRC	57,7 HRC	28,3 HRC

lis választás olyan alkatrészekhez, amelyek a működés során dinamikus terhelésnek és stressznek vannak kitéve (4. ábra).

2. 3D-modell tervezése

A tervezés során az alábbi mérőeszközök kerültek felhasználásra:

- Digitális tolómérő: A tengely külső átmérőjének, hosszának és a kritikus felületek közötti távolságnak a méréséhez.
- Kengyeles mikrométer: A tengely átmérőnek mérésére használtam, biztosítva a mechanikai határokon belüli finomtűrést.
- Rádiuszsablon-készlet: A szerszám segítségével megmértem a kiegyensúlyozótengelyen lévő görbéket és sugarát.

3D-modellezési folyamat kezdeti szakaszában a SolidEdge programban 2D-s alapvázlatokat készítettünk a tengelyről [5]. A mérések során nyert adatok felhasználásával kétdimenziós profilokat hoztunk létre a legfontosabb keresztmetszetekhez, nevezetesen a tengely átmérőjéhez, a fogaskerek helyéhez és a hornyokhoz, íves retesz fészékének kialakításához.

Fusion 360 segítségével a 3D-modell finomításán túl a megmunkálási folyamatot is megterveztük és szimuláltuk. A folyamat első lépése a készlet beállítása, ez magában foglalja a hengeres alapanyag méreteinek meghatározását. Az alkatrész alapjául szolgáló 55 mm átmérőjű, 700 mm hosszúságú tömör rudat, illetve a készlet megfelelő pozicionálását hajtottuk végre a megmunkálási műveletekhez.

3. Esztergálási folyamatok

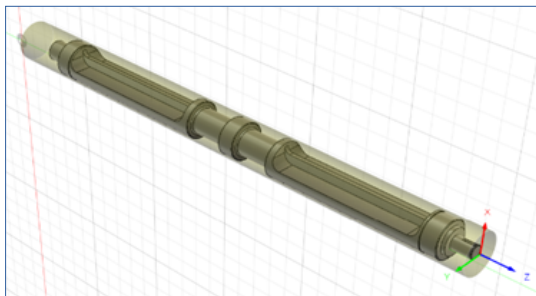
Az esztergálás során minden egyes művelet egyedi célt szolgál a munkadarab alakításában és megmunkálásában, hogy az megfeleljen a kívánt megmunkálási tulajdonságoknak. Ebben a fejezetben az egyes műveletek jellemzőit és paramétereit tárgyaljuk, beleértve a homlokesztergálást, a hosszesztergálás-nagyolást, a hosszesztergálás-simítást, a külső beszúrások nagyolását, a külső beszúrások simítását, a leszúrást és a profil utómunkát [6]. Az importált modellt az 5. ábrán tekinthető meg.

A folyamatok során felhasznált szerszámokat, azaz a Sandvik Magyarország Kft. által ajánlott szerszámokat nagy gondossággal választottuk ki a szükséges pontosság, az optimális felületminőség és a hatékony anyageltávolítás elérése érdekében (6. ábra) [7].

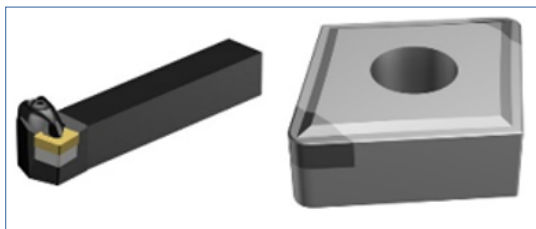
Azért, hogy a tengely végpontjai tökéletesen laposak és pontosan méretezettek legyenek, homlok-megmunkálásokat alkalmaztunk. Ezen esztergálási folyamat közben a szerszámot a munkadarab végződésénél sugárirányban a középvonal felé mozgattuk.

A homlokesztergálás során alkalmazott értékeket a 2. táblázat foglalja össze.

A hosszirányú esztergálás, avagy egyenes esztergálás olyan megmunkálási művelet, amely során a forgácsolószerszám a forgó munkadarab tengelyével párhuzamos irányban mozog, ezáltal csökkentve az átmérőt a hosszában. A külső hornyolás olyan esztergálási művelet, amelynek során a forgácsolószerszám hornyot vagy mélyedést hoz létre a hengeres munkadarab külső átmérője mentén. A külső hornyoláskor a szerszámot közvetlenül a munkadarabba helyezi a kívánt helyre, és a kívánt mélység elérése érdekében sugárirányban mozog az anyagban.



5. ábra. Fusion 360-ban megtervezett modell



6. ábra. DCKNR 2020K 12 esztergalapka-tartó és CNGM12041 2F-HGR 7125 lapka [8, 9]

2. táblázat. Fogásvételek és azok jellemzői a homlok-esztergálás során

	Nagyolás	Simítás
Fogásvételek száma	8	1
Forgácsolási sebesség v_c	145 m/min	145 m/min
Fordulatonkénti előtolás f_n	0.177 mm	0.19 mm
Fogásmélység a_p	0.567 mm	0.465 mm

A leszúrás, mely szintén fontos, olyan esztergálási művelet, amelyet a kész alkatrésznek a maradék munkadarabtól vagy rúdkészletről való elválasztására alkalmaznak (7. ábra).

Az elválasztó művelet során a vágószerszámot közvetlenül a forgó munkadarabba vezetik be, amíg el nem éri a közepét, így gyakorlatilag átvágja az átmérőt, és egy különálló alkatrészt hoz létre.

A fogásvételek értékeit a 3. táblázat foglalja össze.

4. Esztergálási folyamatok

Mindegyik eljárásnak vannak sajátos jellemzői, alkalmazásai és működési paraméterei, amelyek befolyásolják a hatékonyságot, pontosságot és a felületi minőséget [10]. Marási műveletek olyan típusa, amely során egy lapos végű marót alkalmaznak a pontos, lapos aljú zsebek és más összetett profilok létrehozására a munkadarabon. Egy kiegyensúlyozótengely esetében például a zsebek megmunkálása a kívánt tömegeloszlás elérése érdekében történik, ami elengedhetetlen a rezgések csökkentéséhez és a megfelelő működéshez [11]. A szerszámtartó és a szármáró a 8. ábrán tekinthető meg.

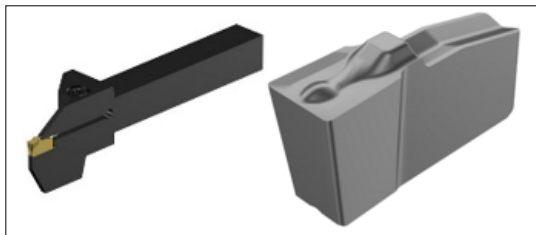
A lapos végű marás során az értékeket a 4. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. Fogásvételek és azok jellemzői a külső leszúrások során

Fogásvételek száma	1
Forgácsolási sebesség v_c	124 m/min
Fordulatonkénti előtolás f_n	0.2 mm
Forgási sebesség maximuma	4000 fordulat/perc

4. táblázat. Fogásvételek és azok jellemzői a lapos végű marás során

Forgácsolási sebesség v_c	236 m/min
Fogankénti előtolás f_z	0.0901mm
Legnagyobb fogásmélység	25 mm



7. ábra. RF151.23-08-25 esztergalapka-tartó és 25-4G 525 esztergalapka [12]

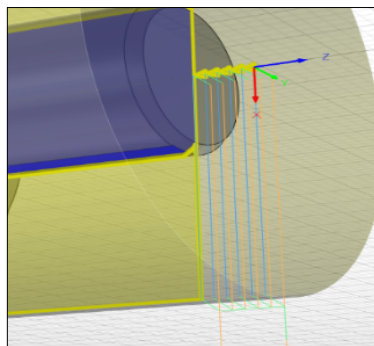
5. A szerszámpálya generálása

A megmunkálási folyamat szerszámpályáit a Fusion 360 [13] által biztosított integrált CAM-eszközzel terveztük meg, felhasználva a különféle szerszámokat, amelyeket kutatásunk során megfelelőnek ítéltünk meg: fogásmélység, forgácsolási sebesség, radiális fogásmélység, fogankénti előtolás (9. ábra).

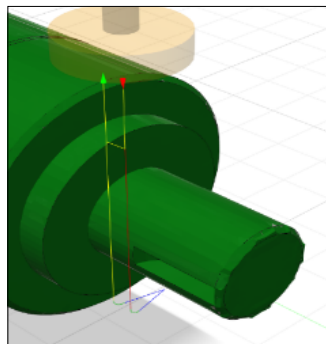
A tengely minden egyes szakaszához kiválasztásra kerültek a konkrét műveletek, illetve beállításra kerültek a hozzájuk tartozó paraméterek is, például főorsó-fordulatszám, fordulatonkénti előtolás (10. ábra).



8. ábra. 930-B30-S-20-088 szerszámtartó és 1P330-2000-XA 1620 tömör keményfém-szár-maró közepes nagyolást hoz [14, 15]



9. ábra. Homlokmegmunkálási folyamat szerszámpályája



10. ábra. Íves retesz horonymaró, marási folyamat szerszámpályája

Szimulációk sorozata került elvégzésre, hogy betekintést nyerjünk abba, hogy az egyes vágószerszámok milyen módon lépnek kölcsönhatásba az anyaggal. Többek között az Ansys is alkalmazásra került a szimulációk végrehajtásakor [16].

A szimulációk valós időben mutatták be, a gyártási folyamatot az anyageltávolítástól a kész balansztengely végső formájáig (11. ábra).

6. Alkatrészkezelési módszer

A kiegyensúlyozótengely megmunkálása során a hatékony alkatrészkezelés kritikus fontosságú volt a pontosság és a hatékonyság biztosítása érdekében. Az elsődleges és másodlagos orsókat alkalmazva biztosítottuk a munkadarab biztonságos megtartását és átmenetét a különböző megmunkálási fázisok során. A főorsó tartotta kezdetben a nyersanyagot, ezáltal biztosítva a stabilitást az olyan műveletek során, mint a hosszsztergálás, a homlokesztergálás és a horonymarás (12. ábra).

Az elsődleges műveletek befejeztével a mellékorsó bekapcsolódott, hogy megtartsa a tengely ellentétes végét, megkönnyítve ezzel az alkatrész zökkenőmentes átvitelét anélkül, hogy kézi átpozicionálásra lett volna szükség.

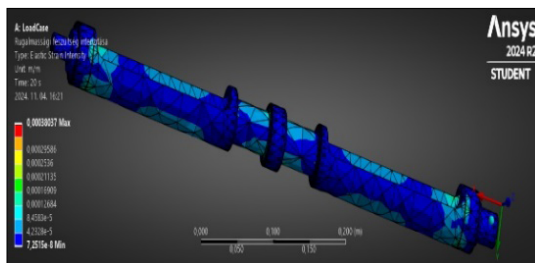
7. Végeselem-szimuláció

Átfogó végeselemes szimulációt végeztünk a kiegyensúlyozótengely teljesítményének elemzésére különböző üzemi körülmények között. A szimuláció célja egy olyan reális modell létrehozása volt, amely pontosan ábrázolja a kiegyensúlyozótengely fizikai viselkedését, amikor különböző erők és körülmények hatásának van kitéve.

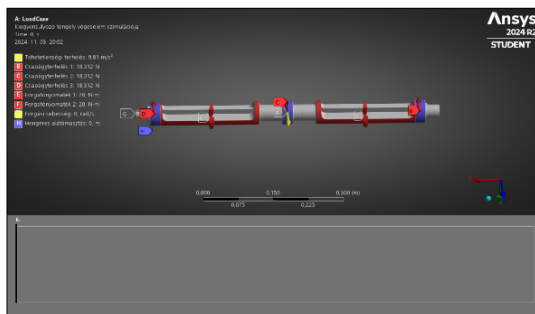
A szimuláció kiemelte a tengely hosszában a tengelyterhelés és a csapágyerők miatt fellépő axiális deformációt. Az axiális deformáció hatására a tengely nagy terhelés hatására kissé megnyúlhat, ami a kritikus felületek esetleges elmozdulását okozhatja. Az ilyen elhajlások a csapágyak és a csatlakozó alkatrészek egyenetlen terheléeloszlásához vezethetnek, ami fokozott kopást vagy akár mechanikai meghibásodást is eredményezhet [4].

A radiális elhajlást, vagyis az elhajlást is sikerült értékelni, amikor a tengelyt hajlító igénybevételnek tették ki, különösen a geometriaváltozással érintett területeken, mint például a hornyoknál vagy a csökkentett keresztmetszeteknél.

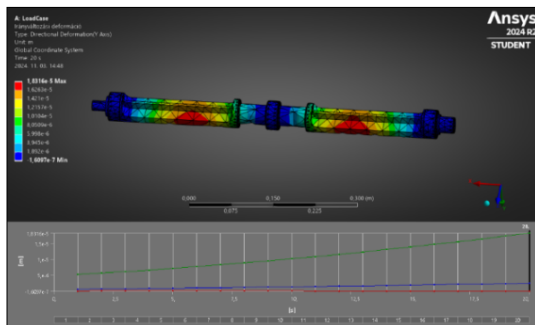
A rugalmas alakváltozásiintenzitás-elemzés alkalmazása lehetővé tette a 100Cr6 biztonságos működési paramétereinek meghatározását, így



11. ábra. Rugalmassági feszültség intenzitása: a vizsgálat eredménye



12. ábra. Ansys 2024 R2 hallgatói lincencelésű szoftverben elkészített modell



13. ábra. A deformációkat jelölő vizsgálat eredménye

biztosítva, hogy az anyag rugalmas tulajdonságai képesek legyenek a tengely várható terhelési körülményeinek befogadására. A deformációra vonatkozó értékek a 13. ábrán tekinthető meg.

A kiegyensúlyozótengely tervezése és gyártása során alkalmazott módszerek és technológiák igazolták, hogy a megfelelő anyagválasztás, a precíziós megmunkálás és a szimulációk kombinációja kulcsfontosságú a megbízható és tartós alkatrészek előállításában. Az 100Cr6 anyag, a korszerű DMG MORI NT 4250 DCG gép, valamint az optimalizált megmunkálási paraméterek hozzájárultak a magas minőségű végtermék elkészí-

téséhez. Az elvégzett vizsgálatok, mint például a felületi érdesség és a keménység mérése, megerősítették, hogy a tengely teljesíti a mezőgazdasági gépek által támasztott szigorú követelményeket. Ez a projekt hatékony megoldást nyújtott a Zetor 10245 traktor megbízhatóságának és élettartamának növelésére.

9. Kutatási infrastruktúra

A Debreceni Egyetem, Műszaki Kar számos fejlesztést hajtott végre a laborokban, ami meghatározó lesz a következő időszakban. A kialakított járműgyártás laborlehetőséget szolgáltat új fejlesztések elindítására a robotika területén [17]. A mesterséges intelligencia térhódítása jelentős az iparban, ezért a járműgyártáslaborban a robotok alapfunkcióit is elkezdtek kiegészíteni saját dataset alapján [18]. Az előzetes tanításhoz Digital-Twin-technikákat alkalmaztunk a labor kapcsán [19]. A járműgyártáslabor azért is jelentős a Műszaki Kar esetében, hiszen a régiót elsősorban most már a járműipar határozza meg, így az egyes gyártással kapcsolatos optimalizációk [20] és a machine learning-megoldások új, innovatív utakat nyithatnak meg [21]. A járműdinamikával kapcsolatos szimulációk is elvégzésre kerültek a laborban, villamosmotor-témakörben [22], korábbi telemetriai adatok alapján [23]. Ezekhez DAQ adatgyűjtő rendszerek kerültek felhasználásra [24], amelyeket légi járműveinkkel kapcsolatos fejlesztéseink során is alkalmaztunk [25].

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk kifejezni őszinte hálánkat Erdei Timoteinek, a Járműmérnöki Tanszék oktatójának, egyben a Járműgyártás Labor vezetőjének, valamint Balogh Gábornak, gépészmérnök mesteroktatónak. Továbbá a Debreceni Egyetem Műszaki Karának.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] *Bearing Damage Evaluation Guide*. SKF Group, Gothenburg, Sweden, 2017.
- [2] *Bearing Damage and Failure Analysis*. SKF Group, Gothenburg, Sweden, 2014.
- [3] *Zetor Spare Parts Catalog 8211-16245*. Zetor Tractors a.s., Brno, Czech Republic, Jan. 1990.
- [4] 100Cr6. Magas széntartalmú csapágyacél technikai adatlap, inoxservice.hu [Online]
<https://www.inoxservice.hu/upload/inline/adatlapok/kovacsoltombok/1.3505%20-%20ADAT-LAP.pdf>
- [5] Goanta A., Haraga G.: *Aspects of Modelling Classical or Synchronous Modelling with Solid Edge ST. 9*. MATEC Web Conferences, 112. (2017) 06024.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206024>
- [6] *Handbook of Cutting Data & Parameters – Milling and Drilling*. Ingersoll Werkzeuge GmbH, Haiger, Germany, 2023.
- [7] Kalpakjian S., Schmid S. R.: *Manufacturing Engineering and Technology*, 8th ed., Pearson, 2019.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-6.00012-3>
- [8] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 206.
- [9] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 163.
- [10] *Sokoldalúan felhasználható tömör keménységű szármárók*. CoroMill Dura [Online]
<https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/tools/milling-tools-old/solid-carbide-end-mills/coromill-dura/coromill-dura-multimaterial>
- [11] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 409.
- [12] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 208.
- [13] Hassan I., Al-Mashhadi H., Radi K., Jawad H.: *IoT Based Multitasking Games and Entertainment Arcade Station Using Raspberry-Pi*. Journal of Southwest Jiaotong University. 54.
<https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.3.4>
- [14] *Sandvik Coromant Turning Tools*, Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 407.
- [15] CoroChuck 930 Nagy pontosságú hidraulikus tokmány, C-1040:266 hu-HU, AB Sandvik Coromant, 2019. p. 2
- [16] B. Zheng, J. Zhang, Y. Yao: *Finite Element Analysis of the Piston Based on ANSYS*. IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, 1908–1911.
<https://doi.org/10.1109/ITNEC.2019.8729409>
- [17] Kapusi T. P., Erdei T. I., Husi G., Hajdu A.: *Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection*. Robotics 11. (2022) 69.
<https://doi.org/10.3390/robotics11040069>
- [18] Erdei T. I., Nusser D. P., Husi G.: *Cyber-Physical Recreation of Six DOF Industrial Robot Arm*. International Review of Applied Sciences and Engineering, 15/2. (2024) 147–160.
<https://doi.org/10.1556/1848.2023.00660>
- [19] Erdei T. I., Krakó R., Husi G.: *Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm*. Applied Sciences, 12/17. (2022) 8862.
<https://doi.org/10.3390/app12178862>
- [20] Ahmed M., Sulaiman M. H., Hassan M. M., Rahaman M. A., Abdullah M.: *Selective Opposition Based Constrained Barnacle Mating Optimization: Theory and Applications*. Results in Control and Optimization, 17. (2024) 100487.
<https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100487>
- [21] Deshpande A. R., Kulkarni A. P., Wasatkar N., Gajalkar V., Abdullah M.: *Prediction of Wear Rate of Glass-Filled PTFE Composites Based on Machine*

- Learning Approaches*. Polymers, 16/18. (2024) 2666.
<https://doi.org/10.3390/polym16182666>
- [22] Szántó A., Ádámkó É., Juhász G., Sziki G. Á.: *Simultaneous Measurement of the Moment of Inertia and Braking Torque of Electric Motors Applying Additional Inertia*. Measurement, 204. (2022) 112135.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>
- [23] Sziki G. Á., Szántó A., Kiss J., Juhász G., Ádámkó É.: *Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering*. University of Debrecen. Applied Sciences, 12/19. (2022) 10095.
<https://doi.org/10.3390/app121910095>
- [24] Dave G. S., Pandhare A. P., Kulkarni A. P., Khanka, D. V., Abdullah M.: *Experimental Investigation of Centrifugal Pump Machine and Its Faults through Different Type of DAQ System and Selecting One Based on Statistical Approach*. Cogent Engineering, 11/1. (2024).
<https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2417683>
- [25] Abdullah M., Husi G.: *Aero Graphene in Modern Aircraft & UAV*. Recent Innovations in Mechatronics, 9/1. (2022).
<https://doi.org/10.17667/riim.2022.1/4>

SZERZŐK JEGYZÉKE

LIST OF AUTHORS

A, B

ASZTALOS TAMÁS GERGŐ 116
BAKÓ LÁSZLÓ 59
BAKOS ISTVÁN-CSONGOR 1
BAKOS LEVENTE 1
BELLÉR GÁBOR 52
BORBÉLY BÁLINT 10
BURAI ISTVÁN GYÖRGY 17
BURU MARIUS-ȘTEFAN 106

CS, D

CZIFRA GYÖRGY, 17
DAMÓ GERGELY 23
DARVAY ZSOLT 27
DEÁK BÁLINT 93
DIÓS SZABOLCS SÁNDOR 10, 110, 116
DÓSA JÁNOS 32

E, F, H, I, J

EGYED-FALUVÉGI ERZSÉBET 23
FEHÉR DOMINIK 40
HUSI GÉZA 10, 110, 116
IZBÉKINÉ SZABOLCSIK ANDREA 52
JAKAB-FARKAS LÁSZLÓ 23

K

KÁRI-HORVÁTH ATTILA 46
KELEMEN ANDREA 79
KISS VIRÁG 52
KOLCSÁR LEVENTE 59
KÖLLŐ GÁBOR 65
KOVÁCS TÜNDE ANNA 72
KRISTÓF GÁBOR 46

L, M, N

LANTOS ZSOLT 46
LŐRINCZ BARNABÁS-ATTILA 106
LŐRINCZ NORBERT 102
MÁRTON PÉTER 65
MÁTHÉ EDINA 27
NAGY BALÁZS ÁKOS 72
NAGY ZSOLT 79
NAGY ZSOLT 106

P–R

PÁCZELT ISTVÁN 85
PAPP KLAUDIA 93
PÁSZTOR JUDIT 98
PETTENDI DÁVID 110
PIROS ISTVÁN ATTILA 93
POPA-MÜLLER IZOLDA 102
RAVAI-NAGY SÁNDOR 40

S–SZ

SÁNDULY ANNABELLA 79
SÜTŐ ABIGAIL-BETHSABÉ 106
SZÁNTÓ ATTILA 10
SZÁNTÓ ATTILA 110, 116
SZIGETI FERENC 40

T, U, V

TASKÓ DÁNIEL 110
TOLVALY-ROȘCA FERENC 98
TOMUS OVIDIU BOGDAN 32
URSZULY NÓRA 106
VARGA CSABA 116
VARGA KRISTÓF RENÁTÓ 65

