A XVII. MŰSZAKI TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAK ELŐADÁSAI

PROCEEDINGS OF THE XVII-TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF TECHNICAL SCIENCES

6. MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET

2017

A XVII. MŰSZAKI TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAK ELŐADÁSAI

PROCEEDINGS OF THE XVII-TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF TECHNICAL SCIENCES

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

PAPERS ON TECHNICAL SCIENCE

6.

ISSN 2393 – 1280

Erdélyi Múzeum-Egyesület Műszaki Tudományok Szakosztálya
Transylvanian Museum Society – Department of Technical Sciences

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

PAPERS ON TECHNICAL SCIENCE

6.

A XVII. MŰSZAKI TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAK ELŐADÁSAI

PROCEEDINGS OF THE XVII-TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF TECHNICAL SCIENCES

Szerkesztette / Edited by
BITAY ENIKŐ – MÁTÉ MÁRTON

ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2017

A kötet megjelenését támogatta a Nemzeti Kulturális Alap, Kolozsvár Polgármesteri Hivatala és Városi Tanácsa, a Magyar Tudományos Akadémia, a Bethlen Gábor Alapkezelő Zrt. és az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya

The publication of this volume was supported by the National Cultural Fund of Hungary, the Cluj Town Hall and Local Council, the Hungarian Academy of Sciences, the Bethlen Gábor Fund and the TMS – Department of Engineering Sciences

Copyright © a szerzők / the authors, EME/ TMS 2017

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 / Editor-in-Chief: Biró Annamária
Szerkesztette / Edited by: Bitay Enikő, Máté Márton
Olvasószerkesztő / Proofreader: Kerekes György
Műszaki szerkesztő / DTP: Szilágyi Júlia
Borítóterv / Cover: Könczey Elemér

Társkiadó / Co-Publisher: Óbudai Egyetem, Budapest
ISBN 978-963-449-054-8

Nyomdai munkálatok / Typography jobs
F&F International Kft. Kiadó és Nyomda, Gyergyószentmiklós
Tel./Fax: +40-266-364171

online elérhető / online available at:
http://eda.eme.ro/handle/10598/29847
DOI: 10.33895/mtk-2017.06

A XVII. MŰSZAKI TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAK ELŐADÁSAI
(KOLOZSVÁR, 2016. NOVEMBER 26.)

PROCEEDINGS OF THE XVII-TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF TECHNICAL SCIENCES
(CLUJ, NOVEMBER 26. 2016.)

SZERVEZŐ / ORGANIZED BY:
Az Erdélyi Múzeum-Egyesület Műszaki Tudományok Szakosztálya
Transylvanian Museum Society - Department of Technical Sciences

TÁRSSZERVEZŐ / CO-ORGANIZER:
Sapientia EMTE, Műszaki és Humántudományok Kar, Marosvásárhely
Sapientia Hungarian University of Transylvania, Faculty of Technical and Human Sciences

PROGRAMBIZOTTSÁG / ORGANIZATION BOARD

GYENGE Csaba, RÉGER Mihály, TALPAS János

TUDOMÁNYOS BIZOTTSÁG / LEKTOROK

Bagyinszki Gyula (Budapest)
Barabás István (Kolozsvár)
Bitay Enikő (Kolozsvár)
Csibi Vencel (Kolozsvár)
Dávid László (Marosvásárhely)
Dobránszky János (Budapest)
Dudás Illés (Miskolc)
Forgó Zoltán (Marosvásárhely)
Gobesz Ferdinánd-Zsongor (Kolozsvár)
Gyenge Csaba (Kolozsvár)
Hollanda Dénes (Marosvásárhely)
Imecs Mária (Kolozsvár)
Kakucs András (Marosvásárhely)
Kelemen András (Marosvásárhely)
Kerekes László (Kolozsvár)
Forizs Edit (Kolozsvár)
Kopenecz Lajos György (Kolozsvár)
Májlinger Kornél (Budapest)
Kovács Tünde (Budapest)
Márton László (Gyergyószentmiklós)
Máté Márton (Marosvásárhely)
Tóth László (Miskolc/Debrecen)
Zsemberi Andor (Miskolc)

SCIENTIFIC ADVISORY BOARD / PEER REVIEWERS

Gyula Bagyinszki (Budapest, Hungary)
István Barabás (Cluj, Romania)
Enikő Bitay (Cluj, Romania)
Vencel-József Csibi (Cluj, Romania)
László Dávid (Târgu Mureș, Romania)
János Dobránszky (Budapest, Hungary)
Illés Dudás (Miskolc, Hungary)
Zoltán Forgó (Târgu Mureș, Romania)
Ferdinánd-Zs. Gobesz (Cluj, Romania)
Csaba Gyenge (Cluj, Romania)
Dénes Hollanda (Târgu Mureș, Romania)
Mária Imecs (Cluj, Romania)
András Kakucs (Târgu Mureș, Romania)
András Kelemen (Târgu Mureș, Romania)
László Kerekes (Cluj, Romania)
Forizs Edit (Cluj, Romania)
Lajos György Kopenecz (Cluj, Romania)
Kornél Májlinger (Budapest, Hungary)
Tünde Kovács (Budapest, Hungary)
László Márton (Gheorgheni, Romania)
Márton Máté (Târgu Mureș, Romania)
László Tóth (Debrecen, Hungary)
Andor Zsemberi (Miskolc, Hungary)

TARTALOM

ELŐSZÓ *11*

FOREWORD (angol előszó) *13*

Forgó Zoltán
Robotokkal a természet nyomában *15*

Belényi Alpár, Gheorghe Achimaş
Ipari hűtőberendezések kompresszorainak jellegzetes meghibásodásai *19*

Bitay Enikő
Szemelvények Martin Lajos (1827–1897) műszaki hagyatékából. *27*

Bitay Enikő, Kacsó Irén, Kormos Fiammetta, Holczer Emil, Veress Erzsébet
Nagy vas-oxid-tartalmú nanokristályos alumino-boroszilikát üvegek *39*

Bodnár István, Plásztán Bence
Fás szárú biomasszák pirolízisének termokinetikai modellezése *51*

Dezső Gergely, Szigeti Ferenc
A műszaki szimulációs módszerek helye a mérnökképzésben *63*

Dobránszky János, Bitay Enikő
Polimer anyagok lézersugaras jelölhetősége *71*

Fekete Albert-Zsombor
Reaktív plazmaporlasztási folyamat automatizálása *79*

Gobesz Ferdinánd-Zsongor
A RECCS 2016 tapasztalatai *85*

Ilieş Nicoleta, Cîrcu Alexandru-Petru, Nagy Andor-Csongor, Ciubotaru Vlad-Costel, Kisfaludi-Bak Zsombor

Összehasonlító tanulmány polietilén hulladékanyaggal, illetve cementtel megvalósított talajstabilizációról *91*

Imecs Mária, Szabó Csaba, Incze János Jób, Szőke (sz. Benk) Enikő

Vektoriálisan szabályozott szinkrongenerátor váltakozó áramú terheléssel *103*

Kovács József, András József, András Endre

Kőzetjövesztő bontófogak optimális méretezése *115*

Máriás Nimród

Megfordítható üzemű, szabaddugattyús stirling hőerőgépre tervezett lineáris alternátor fejlesztése és megvalósítása *125*

Márton László, Talpas János

Régi toronyóra új rendeltetése *131*

Máté Márton, Hollanda Dénes

A hengeres fogaskerék-lefejtő csigamaró működő élgeometriájának vizsgálata *137*

Popa-Müller Izolda, Papp István

Ötoldalú térmechanizmus kinematikai vizsgálata *147*

Tokody Dániel, Nyikes Zoltán, Kovács Tünde

Komplex monitoringrendszer használata vasúti felépítmény vizsgálatában az Ipar 4.0-hoz *151*

Tolvaly-Roșca Ferenc, Forgó Zoltán

Relatív vágómozgásokkal generált pontfelhők szűrési nehézségei *163*

Zabóné Varga Irén

A magyar nyelvű műszaki terminológia kezdetei *169*

SZERZŐK JEGYZÉKE *176*

CONTENT

ELŐSZÓ (Hungarian foreword) *11*

FOREWORD *13*

Zoltán Forgó
Robots in the Wake of the Nature *15*

Alpár Belényi, Achimaş Gheorghe
Industrial Cooling Equipment's Jain Typical Compressor Failures *19*

Enikő Bitay
Excerpts from Lajos Martin's Technical Heritage *27*

Enikő Bitay, Irén Kacsó, Fiammetta Kormos, Emil Holczer, Erzsébet Veress
Nano-Crystallized Alumino-Borosilicate Glasses with High Iron Content *39*

István Bodnár, Bence Plásztán
Thermokinetic Modelling of Wood Biomass Pyrolysis *51*

Gergely Dezső, Ferenc Szigeti
Role of Simulation Techniques in Engineering Education of University of Nyíregyháza *63*

János Dobránszky, Enikő Bitay
Laser Markability of Polymer Cable Insulations *71*

Albert-Zsombor Fekete
Automation of the Reactive Magnetron Sputtering Process *79*

Ferdinánd-Zsongor Gobesz
The Experience of the RECCS 2016 ..... *85*

Nicoleta Ilieş, Alexandru-Petru Cîrcu, Andor-Csongor Nagy, Vlad-Costel Ciubotaru, Zsombor Kisfaludi-Bak

Comparative Study on Soil Stabilization with Polyethylene Waste Materials and Cement *91*

Mária Imecs, Csaba Szabó, János Jób Incze, Enikő Szőke

Vector Controlled Synchronous Generator Running with AC-Load *103*

József Kovács, József András, Endre András

Digging Tools Optimal Dimensioning *115*

Nimród Máriás

Design and Developement of a Reciprocating Linear Alternator for Free Piston Stirling Engine *125*

László Márton, János Talpas

A New Designation of an Old Tower Clock *131*

Márton Máté, Dénes Hollanda

The Active Geoemtry of the Hobbing Cutters Used for Cylindrical Gear Manufacturing *137*

Izolda Popa-Müller, István Papp

Kinematic Analysis of Five-sided Mechanism *147*

Dániel Tokody, Zoltán Nyikes, Tünde Kovács

Using a Complex Monitoring System for Railway Structure Investigation in Accordance with Industry 4.0 ..... *151*

Ferenc Tolvaly-Roșca, Zoltán Forgó

Difficulties of Processing Points Cloud Generated by Relative Cutting Movements *163*

Irén Zabóné Varga

The Beginnings of Hungarian Language Technical Terminology *169*

LIST OF AUTHORS *176*

ELŐSZÓ

Az Erdélyi Múzeum-Egyesület – megalapításától kezdve – ékes tanúbizonyságát tette az erdélyi magyar tudományos eredmények és művészeti kincsek felkutatása, rendszerezése és mindenekelőtt megőrzése mellett. Figyelemre méltó és eléggé nem hangsúlyozható fontosságú az a tény, hogy a magyar nyelven megírt tudományos munkákat is kiemelt figyelemben részesíti, ezeknek megjelenését támogatja, tudatába lévén az anyanyelven létrehozott és átadott tudás hatékonyságának.

A fenti gondolatokat igazolja A *Műszaki Tudományos Közlemények* sorozat ezen (hatodik) száma, amely – akárcsak az előző kiadványok – a Kárpát-medencei magyar tudományosság aktualitásából nyújt ízelítőt.

A jelen kiadvány (MTK, 2017. 6. szám) *A magyar tudomány napja Erdélyben* 15. fóruma keretében, 2016. november 26-án, a *XVII. Műszaki tudományos ülésszak*on elhangzott tizenkilenc előadás írott változatát tartalmazza.

Az eddig megszokott módon a kötet mélyen interdiszciplináris jellegű, mozaikszerűen összeválogatott tudományterületekre enged bepillantást, és ezáltal tömören bemutatja az erdélyi és Kárpát-medencei tudományos érdeklődés és az elért eredmények sokszínűségét, értékét, nem utolsósorban a fejlődés ígéretes tartalékait.

A kötetbe foglalt tizenkilenc tudományos közlemény tudományterületi eloszlása a sokszínűséget, a sokirányú érdeklődést igazolja: a tudománytörténet, az anyagtudomány, a műszaki szimuláció és optimalizálás, a műszaki hőtechnika, illetve a robotika, a vegyészet, az alkalmazott fizika, a geológia, az alkalmazott villamosságtan valamint a számítástechnika tudományterületről érkező dolgozatok jól megférnek egymás mellett. Külön figyelmet érdemel egy, a diákköri tudományos munka tapasztalatait összefoglaló dolgozat, mivel véleményünk szerint a fiatal generáció tudományra nevelése éppen olyan fontos, mint a tudomány határainak legjobb képességünk szerint való folyamatos próbára tevése.

Az említett tizenkilenc tanulmány harminckilenc szerző munkáját dicséri. Ezeket az első szerzők névsorának rendjében, angol kivonat kíséretében jelentettük meg, remélve, hogy

ezáltal lehetőséget teremtsünk az ismertetett (bemutatott) eredmények szélesebb körű terjesztésére.

A tanulmányok jelentős része csoportos munka eredménye. Együttesen ezek képet nyújtanak a Kárpát-medencei magyar tudományos törekvések sajátos irányairól és eredményeiről. A kötet segítséget nyújt ahhoz, hogy egymás munkáját megismerjük, azt véleményezhessük, és együttműködésünket erősítsük.

A műszaki tudományokban rejlő erő, szépség és jelentőség minden lehetséges alkalommal való említése annak a záloga, hogy a művelésük iránti érdeklődés erősödjön. Ezt egyik legfontosabb célunkként kezeljük, mivel a Kárpát-medencében élő, gondolkodó és magyar nyelven alkotó elit utánpótlása jelenti kulturális örökségünk fennmaradásának nélkülözhetetlen feltételét. Ezért minden alkalmat megragadunk arra, hogy a fiatal tehetségeket felkutassuk. Ezzel párhuzamosan a tudományos diákkörök, szakkollégiumok vezetőit, a műszaki tanárokat arra kérjük, hogy diákjaik körében is hívják fel a figyelmet a magyar tudományosság fórumain való aktív részvétel jelentőségére.

A kötetbe foglalt tanulmányok, online módon, az Erdélyi Digitális Adattárban, külön-külön is elérhetők, a következő címen: http://eda.eme.ro/handle/10598/29847.

A kötet átfogó, interdiszciplináris jellege arra késztet, hogy bizalommal ajánljuk a kutatók, BSc- és MSc-szakos hallgatók, doktoranduszok, üzemmérnökök, valamint a tudomány iránt laikusként érdeklődők számára is.

Végül, de nem utolsósorban köszönetünket tolmácsoljuk a szerzőknek, akik vállalták a tudományos ülésszakon való aktív részvételt, és értékes tanulmányaikat közlésre kínálták, illetve a tanulmányok szakmai értékelését elvégző szaklektoroknak, kik véleményükkel, tanácsaikkal értékes segítséget nyújtottak a kötet megjelenéséhez.

Kolozsvárt, 2017 februárja

Az Erdélyi Múzeum-Egyesület Műszaki Tudományok Szakosztályának nevében

Bitay Enikő	*Máté Márton*
elnök	alelnök

Foreword

Beginning with its establishment, the Transylvanian Museum Society has afforded the excellent evidence in finding, systematizing and first of all – safekeeping Hungarian artistic creation and scientific results in the Transylvanian habitat.

It is also to emphasize that the Transylvanian Museum Society preserves special attention to scientific papers written in Hungarian. Being aware of the efficiency of the knowledge created and transmitted in Hungarian it strongly supports their publication.

This (sixth) issue of the series *Papers on Technical Science* (Műszaki Tudományos Közlemények – in Hungarian) stays as an evidence of the above stated ideas, offering a few of what means nowadays Hungarian scientific life within the Carpathian Basin.

The actual issue (MTK, 2017. nr 6.) presents the written form of the nineteen presentations that were held in the frame of the XVI^{-th} Forum of the Day of the Hungarian Science in Transylvania, on November 26, 2016.

Preserving its well-known mosaic style the issue emphasizes interdisciplinarity, permitting insight into different scientific areas, where the main points of interest of Hungarian scientists in Transylvania and the Carpathian Basin, the achieved results and the promising reserves of the future are presented in a unique manner.

The nineteen papers prove the diversity of scientific interest: science history, material science, technical simulation and optimizing, thermotechnique, robotics, chemistry, applied physics, geology, applied electricity and computer science are equally represented. The paper synthetizing the experience of student research activity is more than significant. In our opinion, the education of the young scientist generation is of the same importance as the continuous enlargement of the limits of knowledge.

The nineteen papers mentioned above praise the effort of thirty-nine authors. The papers are put in alphabetical order by the names of the first authors. An English abstract is added to each paper. Through this we hope that a better dissemination-of the presented results will be produced

The most papers are the result of group research. Together they can draw an image about the particular directions and results of Hungarian scientific efforts in the Carpathian Basin.

The volume represents a real aid in getting knowledge about each other's work, giving opinions and strengthens collaboration.

The power, the beauty and the significance hiding behind the walls of engineering sciences are real values that we popularize using all our resources, in order to intensify the interest of young people in this direction.

This is considered one of our most important objectives, due to the fact that the reinforcement of the elite living, thinking and creating in Hungarian primes an indispensable condition for safekeeping our cultural heritage. As a conclusion we take any opportunity to discover young talents. At the same time we ask the leaders of scientific student clubs and scientific colleges to draw attention to the importance of personal participation on the Hungarian forums of science.

The volume and the papers are accessible online in the Erdélyi Digitális Adattár (Transylvanian Digital Database) on the following link:

http://eda.eme.ro/handle/10598/29847.

The wide interdisciplinarity of the volume encourages us to recommend it in the attention of scientists, BSc, MSc and PhD students, technical engineers and also for all nonprofessionals having a particular passion for science

Finally we warmly thank for all authors who honored with their precious presence the conference and agreed with the publication, and also for all reviewers who helped trough their valorous opinions and advices the publishing of the present volume.

Cluj, February, 2017

On behalf of the Department of Technical Sciences of the Transylvanian Museum Society

Enikő Bitay	*Márton Máté*
president	vice-president

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 15–18. 01
http://hdl.handle.net/10598/30071

ROBOTOKKAL A TERMÉSZET NYOMÁBAN

ROBOTS IN THE WAKE OF THE NATURE

Forgó Zoltán

Sapientia-EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék
547367 Románia, Koronka 1C; Telefon:+40-265-208172, fax: +40-265-206211, zforgo@ms.sapientia.ro

Abstract
The development of the mankind has its roots in the observation of the nature; the best practices were replicated and used by the early mans to survive along thousands of years. Nowadays, we like to think that we can respond to the everyday challenges with appropriate answers. But, to have really good working, optimal solutions, it is necessary to have a look to the managing way of our nature master. The efficiency of the living beings is the pledge of surviving, and it is developed beyond all praise by the nature: the only pursuit of us is to acquire those solutions. If we can …

Keywords: *biomimetics, robot, nature*

Összefoglalás
Az emberiség fejlődése a természet megfigyelésével kezdődött; az ember innen leste el azokat a praktikákat, melyek a túlélést biztosították évezredeken keresztül. Szeretjük azt hinni, hogy a mindennapok különböző kihívásaira az ember képes megfelelő megoldást kigondolni. Viszont azért, hogy igazán jól működjön, úgynevezett optimális megoldás szülessen, elengedhetetlen még napjainkban is a természet munkájának a megfigyelése és elemzése. Az élőlények energiahatékonysága nem kevesebb és nem több, mint a fajfennmaradás szükségessége, és ezt a természet tökéletességre fejlesztette: nekünk nincs más dolgunk csak lemásolni… ha tudjuk.

Kulcsszavak: *biomimetika, robot, természet*

1. Bevezető

A kezdetektől fogva az élőlények arra törekedtek, hogy kiaknázzák a környezetük adta lehetőségeket. Ez hozzásegítette őket, nemcsak a túléléshez, hanem tulajdonképpen a fejlődés motorja is lett. Nem volt másképp az ember esetében sem: megismerve a természetet, felfedezte azokat a lehetőségeket, melyeken keresztül könnyebbé tette az életét, melyek segítették energiatakarékosan berendezni hétköznapjait. Ez a jelenség megfigyelhető már az ősember idejében is, amikor az „kölcsönvette" az állatok bundáját, de a folyamat napjainkban is tart, amikor az emberiség olyan részleteket keres a természetben, melyeket beépítve az általa megvalósított berendezésekbe, ezek jobban szolgálják az ő szükségleteit.

A természet megvalósításainak a másolása mára már tudományággá fejlődött: megjelent a biomimetika, mely a biológia és a mérnöki tudományok szinergetikus összefonódásából alakult ki.

Ez tulajdonképpen két irányt jelent a tudományágban: esetenként egy tulajdonságot dokumentál és alkalmaz azokban a műszaki

megoldásokban, melyekben hasonló fizikai jelenségek játszódnak le – vagy kell lejátszódniuk –, mint a természetben. A másik lehetőség egy olyan élőlény bizonyos mértékű másolásában rejlik, mely hordozza azokat a részleges vagy teljes tulajdonságokat, amelyeket az ember ki szeretne domborítani, illetve meg tud valósítani. Ennek következtében egy élőlény megjelenését vagy viselkedésmódját reprodukálhatjuk.

2. Tulajdonságok és egyedi megoldások alkalmazása

Ha a természetről hallunk, akkor első gondolatra talán az izgő-mozgó élőlények jutnak eszünkbe, viszont az ezek által kialakított élőhelyek is tele vannak tanulságokkal. A legjobb példa erre a zimbabwei Hararében, a 1990-es években épített Eastgate Centre (**1. ábra**), mely csekély fűtés- és hűtéstechnikával rendelkezik: a zöld növényzet és a megfelelő szellőztetőrendszer biztosítja az egész éven át változatlanul kellemes, lakható hőmérsékletet. Ezek mellett a légkondicionáló rendszer üzemköltségeit sikerült, a hasonló nagyságú épületekhez képest, 90%-al csökkenteni [1].

1. ábra. *Az Eastgate Centre épület (Harare, Zimbabwe) tervezői a termeszek építkezéséből ihletődtek a megfelelő szellőztetés érdekében.*

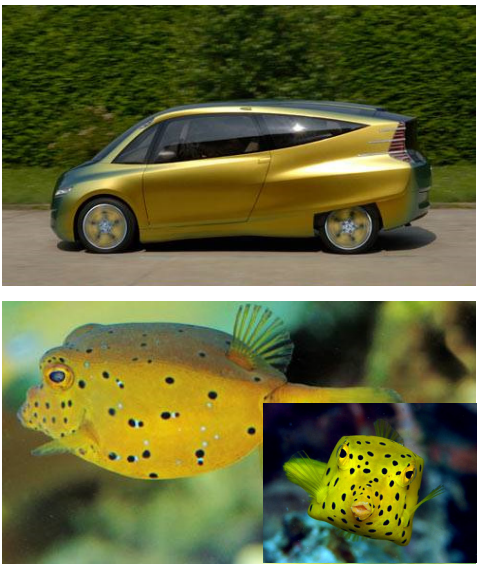
Ezt a remek teljesítményt a termeszek építkezési stílusának alkalmazása tette lehetővé: míg a külső hőmérséklet 2 Celsius-fok (éjszaka) és 40 Celsius-fok (nappal) között ingadozik, a termeszeknek sikerül egy állandó 30 Celsius-fokos belső hőmérsékletet biztosítani, ami elengedhetetlen a táplálékukul szolgáló gombának az életben maradásához.

Egy másik ékes példa a japán vasúttársaság Sinkanszen (Bullet Train) vonatának az „orra” vagy találóbban fogalmazva a „csőre”. Mivel a vonat nagy sebességgel (≈ 400km/h) halad a pályán [2], az alagutakból kijövet úgy viselkedik, mintha egészen más közegbe csapódna be, és ezt a jelenséget hangrobbanások jelzik. Egy mozdonyvezető tanácsára, aki lelkes madármegfigyelő volt, alakítottak a vonat mozdonyának elején úgy, (**2. ábra**), hogy ez hasonlítson a jégmadár csőrére, hiszen ez is nagy sebességgel csapódik a vízbe élelemszerzés során, viszont meglepően kis hullámokat kelt.

2. ábra. *A japán vasúttársaság Sinkanszen (Bullet Train) vonata, melynek „orr”-kialakítása a jégmadár csőrére hasonlít.*

Az így átalakított vonat nemcsak halkabb lett, de 15 százalékkal kevesebb villamos energiát használ föl, és a sebessége is

10 százalékkal növekedett. Mint sok más esetben is, a Mercedes-Benz gépkocsigyártó cég sem tudott eltekinteni a terméke eredeti alakjától, mivel ez az utastér jelentős csökkentését jelentette volna. 2005-ben megvalósítva viszont a Vörös-tenger lakójának, a sárga bőröndhalnak a formáját (**3. ábra**) egy 65%-kal kisebb légellenállású járművet tudott előállítani, mint bármely versenytársa.



3. ábra. *A Mercedes-Benz kompakt kategóriás tanulmányautója (2005), mely hozza a bőröndhal alakját.*

Újabb példa lehet a kála virág csavargörbéjének másolása (**4. ábra**). A kaliforniai székhelyű (Amerikai Egyesült Államok) *PAX SCIENTIFIC* cég egy olyan folyadékkeverő eszközt fejlesztett ki [3], amely az áramlástani megfontolások miatt, a szokásos keverőeszköz energiaszükségletének a töredékét használja, és így is gyorsabb keverődést biztosít.

4. ábra. *A kála virágjának alakját utánzó keverő szerszám energiaszükséglete töredéke a hagyományos szerszámhoz képest.*

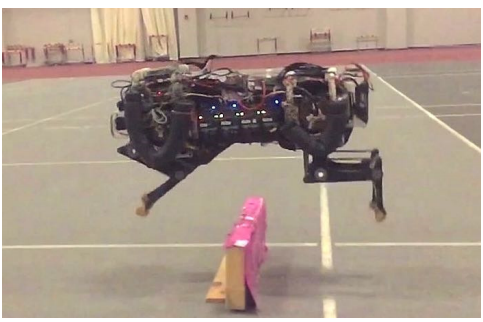
5. ábra. *A szárnyas bálna uszonyformájának alkalmazása növelte a szélturbinák hatásfokát.*

Szintén a tengeren túl alapították a *WhalePower Co*. céget; ők a szárnyasbálna uszonyán levő kinövéseket vizsgálták és alkalmazták végül a szélturbina-lapátok felépítésében (**5. ábra**), és jobb eredményeket mértek a kísérletek alatt, mint várták volna: nőtt a generátor teljesítménye kis sebességű szél esetén, illetve csendesebb működést tudtak biztosítani. Kapcsolódó esettanulmányokat a [4] tartalmaz.

Természetesen a sort lehetne folytatni, számos olyan megoldásnak az átültetése történt meg, mely hatékonyabbá teszi az ember által kitalált és megépített berendezéseket.

3. Élőlény megjelenése és/vagy viselkedésmódjának alkalmazása

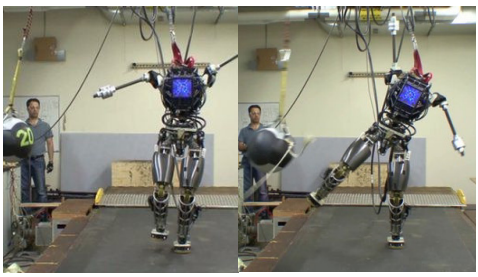
Sok esetben a megfigyelésen alapuló működő modellek tervezése és kivitelezése azt a kollektív tudásbázist gyarapítja, amelynek segítségével az ezután a látókörünkben felbukkanó kihívásokat sikerül megoldani. Így van ez azokkal a látványos robotokkal, melyek az állatvilágból merítenek ihletet, viszont nem egy tulajdonságot ültetnek át mesterséges környezetbe, hanem egy szervezetnek a működését tárják fel.



6. ábra. *Az MIT Cheetah 2 robot, mely gátat tud ugrani 2,4 m/s sebességnél.*

A leglátványosabb megoldások, a helyváltoztatáshoz vagy a munkavégzéshez kapcsolódnak. Ennek nyomán jelentek meg az állatok és az ember mozgását utánzó berendezések, melyeknek a kutatása világméreteket öltött. Ennek az eredménye az MIT Cheetah (**6. ábra**) [5], mely önállóan galoppol, akadályt ugrik, és mindezt 2,4 m/s-os sebességgel.

Nem lehet befejezni anélkül, hogy ne említsük az emberszabású robotokat, amelyek az elmúlt években nagy fejlődést „szenvedtek” el. Világviszonylatban több neves kutatóközpont foglalkozik a kétlábú robot megvalósításával, de talán a Boston Dynamics cég (Amerikai Egyesült Államok) fejlesztett nagy lépésekkel [6].



7. ábra. *A Boston Dynamics cég Atlas robotja: egy lábon egyensúlyozva sikeresen kivédi a külső mechanikai dinamikus terheléseket.*

Csodálatos dolgokat tud az emberiség ellesni a természettől, hogy alkalmazva azokat könnyebbé, hatékonyabbá tegye az életét, viszont csakis hasonló dolgokat valósíthat meg, mivel teljesen reprodukálni ezeket mindmáig lehetetlen.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] BIOMIMETIC ARCHITECTURE: *Green Building in Zimbabwe Modeled After Termite Mounds.* http://inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/ (2016.10.23.)

[2] *High speed train silently slices through air.* https://asknature.org/idea/shinkansen-train/#.WRwZweuGPIU (2016.10.23.)

[3] *http://paxscientific.com/* (2016.10.23.)

[4] *https://whalepowercorp.wordpress.com/* (2016.10.23.)

[5] *Dynamic Locomotion for the MIT Cheetah 2.* https://biomimetics.mit.edu/research/dynamic-locomotion-mit-cheetah-2 (2016.10.23.)

[6] *Atlas.*www.bostondynamics.com/robot_Atlas.html (2016.10.23.)

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 19–26. 02
http://hdl.handle.net/10598/30082

IPARI HŰTŐBERENDEZÉSEK KOMPRESSZORAINAK JELLEGZETES MEGHIBÁSODÁSAI

INDUSTRIAL COOLING EQUIPMENTS JAIN TYPICAL COMPRESSOR FAILURES

Belényi Alpár[1], Achimaş Gheorghe[2]

[1] *Sc Electro Impex Srl, Satu-Mare, str. Delavrancea Nr. 11 / Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea Construcţii de Maşini, România, Cluj-Napoca, B-dul Muncii Nr. 103-105, alpar_belenyi@yahoo.com*

[2] *Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea Construcţii de Maşini, gheorghe.achimas@tcm.utcluj.ro*

Abstract
In this study, I have presented some practical observations on the failures of semi-hermetic compressors used in industrial cooling equipments. After a certain time of usage these compressors must be maintained but if we neglect this or some failures appear during running time these compressors can malfunction. In the field of industrial cooling compressors we can talk about multiple failures that can appear. One type of these failures is the mechanical failure: this is caused by insufficient greasing, overheating or hits; the other ones are the electronic failures. These failures could have been evaded with preventive maintenances, with which we can determine if our compressor is functioning between the adequate parameters or not. One of the advantages of semi-hermetic compressors is that it can be disassembled and we can repair the parts at any time.

Keywords: *semi-hermetic compressor, failure, wear, mechanical failure, electric failure.*

Összefoglalás
Ebben a szakdolgozatban az ipari hűtőberendezéseknél használt félhermetikus kompresszorok meghibásodásai kerülnek bemutatásra. Alapul vettük a gyakorlati és szakirodalmi megállapitásokat. Bizonyos használati idő után ezeket a kompresszorokat karban kell tartani. Ha ezt elmulasztjuk, vagy üzemi idő alatt valami rejtett hiba jelenik meg, akkor a kompresszorok meghibásodhatnak. Az ipari hűtőkompresszoroknál többfajta meghibásodás léphet fel: egyik az úgynevezett mechanikai hiba: kenési, túlmelegedési, szabálytalan ütések által okozott problémák; a másik pedig a villamossági meghibásodás. Ezeket a meghibásodásokat és üzemzavarokat megelőző karbantartással el lehet kerülni, és bármikor meg lehet állapítani, hogy megfelelő paraméterek között működik-e a kompresszorunk vagy sem.

Kulcsszavak: *félhermetikus kompresszor, meghibásodás, kopás, mechanikai, villamosság.*

1. Bevezetés

Mint ismert, napjainkban többfajta hűtőkompresszort használnak az ipari környezetben. Ezek lehetnek dugattyús kompresszorok, amelyeket a következőképpen csoportosíthatjuk: [1]

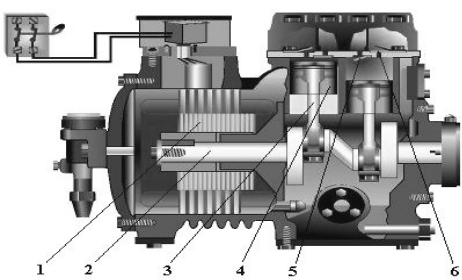
- alternáló dugattyús kompresszor: tárcsa-dugattyús, merülő dugattyús, membrán és lengő;

– forgódugattyús kompresszor: gördülődugattyús, forgólapátos, csavar és spirál.

Az alternáló dugattyús kompresszorok a térfogatkiszorítás elve alapján működnek: az alternáló mozgást végző dugattyú a hengerben mozog. Nyitó és záródó szelepeken keresztül szívja be a szívótérből, illetve tolja ki a nyomótérbe a hűtőközeg gőzét. A hajtómotor körmozgását forgattyús mechanizmus alakítja alternáló mozgássá. Az ipari hűtőgépeknél e tekintetben a legismertebb alternáló dugattyús kompresszor a félhermetikus kompresszor. Ebben a szakdolgozatban a félhermetikus kompresszor jellegzetes meghibásodásaival fogunk foglalkozni. Hogy milyen fajta kompresszormeghibásodások léphetnek fel, és hogy milyen alkatrészek hibásodhatnak meg, ezt egy kompresszoron tökéletesen be lehet mutatni.

2. Félhermetikus kompresszorok

A félhermetikus kompresszorok felépítése egyesíti a nyitott és a hermetikus hűtőkompresszorok jellemzőit, de a konstrukciójuk közelebb áll a nyitotthoz. A tömszelence-ház helyére illeszkedik a házzal egybeöntve vagy csavarkötéssel bontható módon a villamos hajtómotor zárt burkolata. Az **1. ábrá**n megtekinthető egy félhermetikus kompresszor a fő alkotóelemeivel[1][2].



1. ábra. *Félhermetikus kompresszor alkotóelemei: 1-tekercselt állórész,2-forgattyús tengely, 3-hajtókar, 4-dugattyú, 5-szívószelep, 6-nyomószelep*

A motor forgórésze a meghosszabbított főtengelyre van rögzítve. A döntő különbséget az jelenti, hogy elmarad a csúszó tengelytömítés, a nyitott kompresszorok leggyakrabban meghibásodó és a hűtőközeg megszökésével anyagi és környezeti kárt okozó alkatrésze. A hajtómű, a motor és a szelepek a csavarozott fedelek megbontásával könnyen hozzáférhetők, javíthatók, cserélhetők, megfelelő szerszámok birtokában akár a helyszínen is.

A félhermetikus egységek elvileg bármely hűtési célra használhatók. A nagyobb, 80-100 kW és annál is nagyobb hőteljesítményű egységeket azonban főleg a klímaberendezésekhez gyártják, ahol a hermetikus kivitel iránt nagyobb az igény, mert nincs állandó kezelőszemélyzet. Ezeknél az egységeknél hosszú üzemszünetek vannak, és a tömszelencék kiszáradásának a veszélye nagy, ami költséges hűtőközegszökést eredményezhet.

A félhermetikus dugattyús kompresszorok túlnyomórészt vízszintes tengelyűek, többhengeres soros „V”, vagy „W” elrendezésűek. A forgattyúház, a motorház és a hengerállvány általában egyetlen öntvényből készül, de az osztott kivitel is megtalálható. A kisebbek excenteres hajtóművel is működnek, a nagyobbak pedig forgattyús mechanizmussal működnek, szinte mindig siklócsapágyazással.

A félhermetikus rendszer előnyei a következők:

– kisebb a zajszint, ha a motor átszívásos rendszerű;
– egyszerű a helyszíni szerelés;
– karbantartási igény kisebb;
– csavarkötéssel bontható, így javítható.

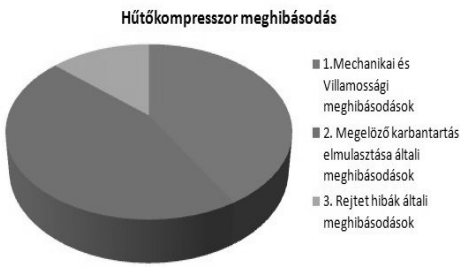
3. Karbantartás és meghibásodási okok

Műszaki szempontból, mint bármelyik berendezésnek, a hűtőberendezésnek is – beleértve a fő alkotóelemét, a hűtőkompresszort is, – szüksége van karbantartásra.

Ezek egyszerű karbantartási lépéseket igényelnek, mint például [3][4]:

- havonta az olaj és hűtőközeg mennyiségének az ellenőrzése;
- évente kétszer vagy háromszor a csatlakozások ellenőrzése, a nagy nyomású nyomáskapcsoló ellenőrzése, olajnyomáskapcsoló ellenőrzése;
- évente kétszer az elektromos csatlakozások átvizsgálása;
- évente három-négy alkalommal a teljes hűtőberendezés átvizsgálása és tisztítása.

Hogyha betartjuk ezeket a megelőző karbantartási folyamatokat, akkor egy tökéletesen működő hűtőgépünk és hűtőkompresszorunk van. Ám ha nem tartjuk be eme megelőző eljárásokat, akkor a hűtőberendezésünk sérülhet, nagymértékben kophat, és akár meg is hibásodhatnak az alkatrészei. Sok esetben sajnos a megelőző karbantartás elmulasztása miatt hibásodik meg a hűtőgépünk, mint ahogy a **2. ábrá**n van bemutatva. Ezeknek a meghibásodásoknak következtében 90%-ban a kompresszor sérül meg.



2. ábra. *A megelőző karbantartás elmulasztása nagymértékben hozzájárul a hűtőgépek meghibásodásához.*

Abban az esetben, ha a kompresszor nem működik optimális paraméterek között, vagy furcsa zajok hallatszanak, a karbantartás elmulasztása áll fenn. Hogyha valamiféle rejtett hiba lép fel, akkor a kompresszor fő elemeit meg kell vizsgálni, és meg kell keresni a meghibásodott alkotóelemeket, hogy ne sérülhessen tovább a kompresszorunk. Technikai szempontból a hűtőgépkompresszornál kétfajta fő meghibásodás állhat elő:

- mechanikai;
- villamossági.

A mechanikai meghibásodások közé tartoznak az alkotórészek meghibásodásai, mint:

- a szelepek törése;
- a főtengely kopása;
- az alkotó elemek túlmelegedése.

A villamossági meghibásodások közé tartozik:

- az állórész tekercselésének a leégése;
- túlmelegedési problémák;
- elektronikai, vezérlőpulti hibák.

A hibáknak mindig vannak kiváltó okai. A mechanikai hibák kiváltó okai a félhermetikus kompresszornál a következők [5][6]:

- kenési problémák;
- szabálytalan ütések;
- túlmelegedési problémák;
- szennyeződési problémák.

Tehát: ezek a problémák vezetnek a félhermetikus és a többi fajta kompresszor meghibásodásához.

4. Mechanikai hibák

4.1. Kenési problémák

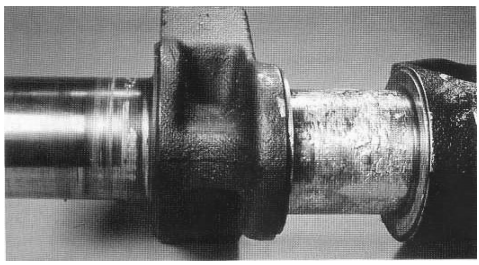
A megfelelő kenés elengedhetetlen egy kompresszor életében. Sok hűtőkompresszornál olajpumpát használnak a kenéshez, kivéve a hegesztett vázú típusúakat.

Sajnos a kenésnél felléphetnek olyan problémák, mint például:

- az olaj hígítása a hűtőközeg által;
- az olajszint csökkenése;
- az olaj kenési képességének csökkenése a túlmelegedés miatt.

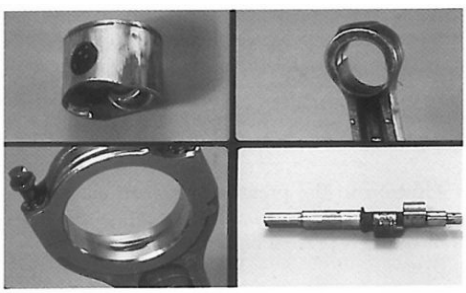
Ezek a meghibásodási problémák a hűtőkompresszor alkatrészeinek kopásához vezetnek. Az olaj hígulása az egyik legismertebb kenési probléma a hűtőberendezéseknél, mivel az olaj nagy affinitást mutat a

hűtőközeggel szemben, ha érintkezik vele. Abban az esetben, ha több ideig áll, lehetséges, hogy oldja a hűtőközeget, és ezáltal elveszíti a kenési tulajdonságait. A **3. ábrán** látható egy főtengely, más néven forgattyús tengely. Észrevehető hogy a nem megfelelő kenés miatt az alumínium hajtókar kopást okozott a forgattyús tengely felületén,. Ezen a felületen nem észlelhető semmiféle színváltozás a felmelegedéstől, a meghibásodás gyakorlatilag azonnal megtörtént. A súrlódás által keletkezett hő nagy részét elszállította a hűtőközeg.



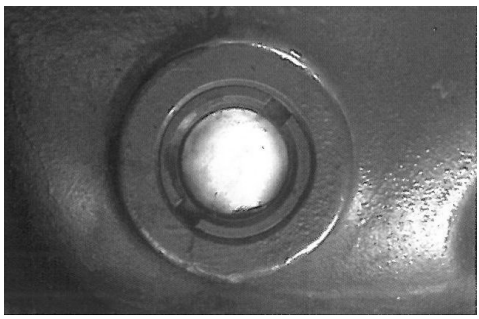
3. ábra. *Tipikus meghibásodás, hűtőközeggel hígított olajjal kent forgattyús tengely*

A **4. ábrán** ugyanazok a sajátos meghibásodások láthatók egy alumínium hajtókar és egy dugattyú esetében is.



4. ábra. *Elégtelen kenés miatti kopás*

Nagy mennyiségű olajveszteség is történhet a hűtőkompresszornál. Ez az olajveszteség felhabzással is történhet, ezt az **5. ábrán** láthatjuk. Tényleges olajvesztés akkor fordulhat elő, amikor nagy mennyiségű hűtőközeg távozik a rendszerből.



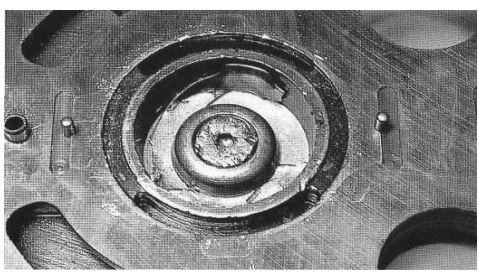
5. ábra. *A jelentős olajvesztés felhabzáshoz vezethet, ez egy tipikus jele ennek.*

4.2. Szabálytalan ütések által okozott meghibásodások.

A szabálytalan ütések akkor jöhetnek létre egy hűtőkompresszornál, ha:

- a termosztatikus szelep helytelenül van beállítva;
- az olaj aspirációja túl nagy;
- túl sok hűtőközeg van folyadék formájában jelen.

Egy kompresszornál, amelynél úgynevezett hidraulikus ütéseket észleltünk, károsodások figyelhetők meg a szívószelepben, amely erős sokknak és nyomásnak volt kitéve. A **6. ábrán** látható, hogy darabkák váltak le a szívószelepből, belevésődtek a nyomószelepbe és az ürítőcsatornába. Lehetséges, hogy a szívószelep nem megy tönkre egészen, úgy, mint a **6. ábrán** látható, de a felületén létrejöhetnek radiális repedések, amelyek újabb hidraulikus ütések esetén a szelep eltöréséhez vezethetnek.

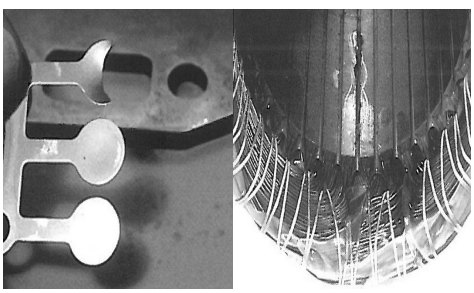


6. ábra. *Szelepházra mért hidraulikus ütés, radiális repedések láthatók.*

A **7. ábrá**n ugyanazon kompresszorból származó dugattyú van bemutatva, amelyen szintén látható a hidraulikus ütés nyoma. A kompresszor meghibásodásának fő okozói az eltörött szívószelepből levált darabkák. Ilyen esetekben rendszerint a hengerek is meghibásodnak, amelyeket meg kell javítani.

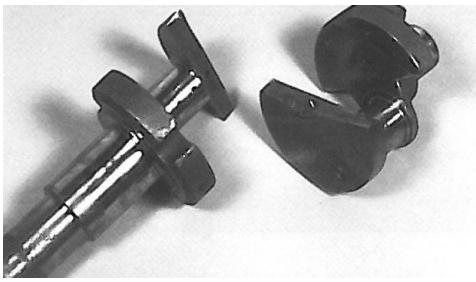
7. ábra. *Hidraulikus ütés által okozott meghibásodás*

Egyes kompresszorokban az erős hidraulikus ütések miatt a szívószelep is eltörhet. Abban az esetben, amikor észleljük a szelepek és a rugók törését, szét kell bontani a kompresszort és le kell ellenőrizni a motort, vagyis meg kell vizsgálnunk az állórész tekercseit, mivel megtörténhet, hogy a darabkák a szelepből bejutnak a tekercsek közé és ez rövidzárlatot okozva az állórész leégéséhez vezethet, ez a **8. ábrá**n van bemutatva.



8. ábra. *A szívószelep szilánkja bekerült a forgórész és az állórész közé, rövidzárlatot okozott, ez a tekercselés leégéséhez vezetett.*

A folyékony halmazállapotú hűtőközeg általi ütés súlyos következményekkel is járhat. Megtörténhet, hogy az ütés olyan erős, hogy az akár eltörheti a forgattyús tengelyt, ahogy a **9. ábrá**n van bemutatva.



9. ábra. *Az ütés mértéke olyan nagy volt, hogy eltörte a forgattyús tengelyt.*

4.3. Túlmelegedés okozta meghibásodások.

A kompresszor túlmelegedésének kiváltó okai lehetnek:

- a kompresszió aránya túl magas;
- túl kevés hűtőközeg van a hengerekben;
- olajpumpa meghibásodás;
- a megadott határérték alatti hűtésteljesítmény csökkenés.

A kompresszor túlmelegedése csökkenti az olaj viszkozitását, és ezzel egyidejűleg csökkenti a kenőképességét is. A legsúlyosabb esetekben, amikor a kenőolaj elszenesedik, az elszenesedett részecskék megnehezítik a szelep elmozdulását, ezáltal a munkatér tömítése elégtelen lesz.

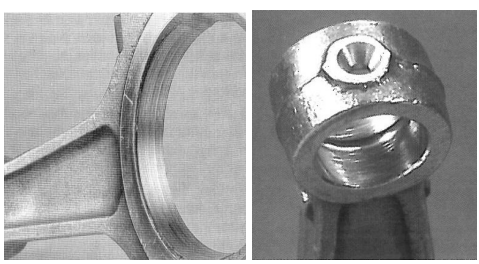
A 10. ábrán két hajtókar látható: az egyik elszenesedett kenőolajjal működött, ez sötétebb színű és korrodáltabb, mint a másik hajtókar, amelyik megfelelően jó kenési képességű olajjal működik.

A **11. ábrá**n egy hibás hajtókar látható, ez egy olyan kompresszorból származik, amelynek az olajpumpája látszólag tökéletesen működött, de szétszerelés után kiderült, hogy meghibásodott, és emiatt a hajtókar túlmelegedett és eltört, a dugattyú pedig besült.

10. ábra. *A bal oldali egy elszenesedett olajjal működő hajtókar, amelynek színe sötét, jobboldalt pedig egy megfelelő kenéssel működő, tiszta hajtókar látható.*

11. ábra. *Baloldalt egy túlmelegedett dugattyú látható, jobbról egy túlmelegedett hajtókar, amely a túlmelegedés következtében meggyengült és eltört.*

A **12. ábrá**n úgyszintén egy hajtókar látható, ugyancsak egy defektes olajpumpával működő kompresszorból. Észrevehetjük, hogy a hajtókar felső és alsó része a súrlódás miatt túlmelegedett. A súrlódásnak kitett felületeken enyhe karcolásokat lehet észrevenni.

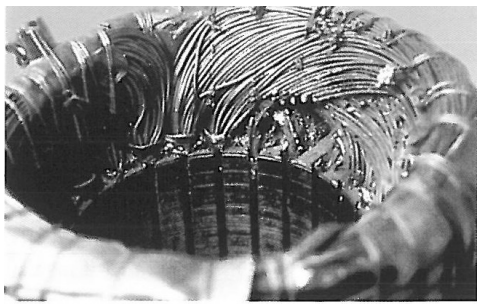


12. ábra. *Túlmelegedés miatti bevágódás*

A hűtőközeg szivárgása is a hűtőkompresszor túlmelegedéséhez vezethet.

A szivárgás következményei a következők:

– a kenés csökkenni fog, amiből a későbbiekben mechanikai problémák adódhatnak;
– a kompresszor túlmelegedhet, mert nincs, ami lehűtse. A villanymotor tekercsei túlmelegedhetnek, és menetzárlat léphet fel (**13. ábra**).



13. ábra. *A hűtőközeg vesztése miatt a tekercsek túlmelegednek.*

4.4. Szennyeződés által okozott meghibásodások

A szennyeződések is vezethetnek a hűtőkompresszor kopásához és meghibásodásához.

A szennyeződések olyan anyagok, amelyek a kenőolajjal és a hűtőközeggel vegyülve megváltoztathatják a kompresszor tulajdonságait.

14. ábra. *A szárítószűrő által összegyűjtött szennyeződések egy zárt hűtőrendszerből*

Ilyen szennyeződések például a víz, a levegő, a nem kondenzálható anyagok, fémrészecskék, fém-oxidok és kloridok, egyéb anyagok, amelyek a rendszerbe kerülve, működési problémákat okozhatnak.

A szennyeződés legfontosabb kiváltó okai a következők:

– szerelési hibák;
– az olajcsere alkalmával bejuttatott szennyeződések.

Súlyos problémákat okozhat a nedvesség. A szárítószűrő vissza kéne tartsa a vizet, a valóságban azonban ez nem mindig így történik. A páratartalom rendkívül káros hatással van a hűtőberendezés működésére, és korrózió által újabb szennyeződést okoz, például a rozsda megjelenésével a hűtőközeg és az olaj lebomlása miatti lerakódásokkal.

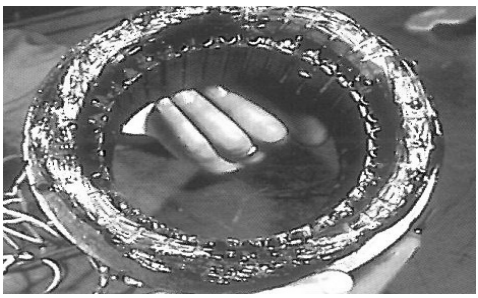
A nedvesség jelenlétének fő okai a hűtőkörben a következők:

– szerelés közben a nedves levegő jelenléte a csőrendszerben;
– kezelési hibák az olajcsere folyamata alatt.

5. Villamossági problémák által okozott meghibásodások

A villamossági problémák is vezethetnek a hűtőkompresszor meghibásodásához. Ezeknek a kompresszoroknak a többségét háromfázisú motor hajtja. A villamossági meghibásodások a következők lehetnek:

– a feszültség és az áram kiegyensúlyozatlan, vagyis megtörténhet, hogy nincs meg a kellő feszültség és a kellő áramerősség, ami az állórész leégését okozhatja;
– fáziskiesés, ez az állórész tekercseinek a leégéséhez vezethet, a **15. ábrá**n láthatjuk;
– vezérlőpulti meghibásodás, amikor a vezérlőpanelben történik a meghibásodás.



15. ábra. *Tekercselt állórész egy hűtőkompresszorból, amely fáziskiesés miatt égett le.*

6. Következtetések

Ebben a szakdolgozatban kiemeltük a gyakorlatban általunk tapasztaltakat, valamint a szakirodalmi tanulmányokban fellelhető észrevételeket a félhermetikus kompresszorok meghibásodásaival kapcsolatban. A levont következtetés az, hogy az évek elteltével a leggyakrabban előforduló fő hibák: a szabálytalan ütések, kenési problémák, túlmelegedés, szennyeződés okozta és villamossági hibák. Sajnos ezek nagymértékben károsítják a kompresszor alkotórészeit, amelyek ezáltal kopnak, károsodnak és meghibásodnak. Ezek a hibák elkerülhetőek lennének, ha a megelőző karbantartást betartanák. E tevékenység területén a jövőben fejleszteni kívánjuk a karbantartási programot, és ezáltal szeretnénk felhívni a figyelmet arra, hogy a karbantartással sokat lehet nyerni:

- csökkenteni lehet a meghibásodásokat;
- és növelni lehet ezáltal a kompresszorok élettartamát.

A félhermetikus kompresszor előnye az, hogy bontható, tehát ha elkopik, megsérül vagy esetleg meghibásodik, bármelyik alkatrészt meg tudjuk javítani vagy akár felújítani.

Az alkatrészek felújításával egy jól működő hűtőkompresszort kapunk, amely megelőző karbantartással még évekig tökéletesen fog működni.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Jakab Z.: *Kompresszoros hűtés* II. Magyar Médiaprint Kft. [46–52]

[2] M. Bălan: *Instalaţii frigorifice. Construcţie, funcţionare şi calcul*. Editura tehnica [14–16]

[3] N. Purice: *Exploatarea şi întreţinerea utilajelor frigorifice comerciale.* Editura Bucureşti [76–80; 156]

[4] A. SAVU: *Maşini şi instalaţii frigorifice*. Editura Bucureşti.

[5] *** *Diagnosticarea defecţiunilor la compresoarele cu piston.* www.termo.utcluj.ro/ufa/ufapdf/ufa14.pdf [1-17].

[6] *** Tech Service-Training, *Why Compressors fail* II, Carrier Corporation 1998 [7–27].

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 27−38. old. 03
http://eda.eme.ro/handle/10598/ 30085

SZEMELVÉNYEK MARTIN LAJOS (1827–1897) MŰSZAKI HAGYATÉKÁBÓL

EXCERPTS FROM LAJOS MARTIN'S TECHNICAL HERITAGE

Bitay Enikő [1,2]

[1] *Sapientia – Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárelyi Kar, Románia, 540485 Marosvásárhely (Koronka), Segesvári út 1.C., ebitay@ms.sapientia.ro*

[2] *Erdélyi Múzeum-Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztály, Kolozsvár, 400009 Cluj-Napoca, str. Napoca (Jókai u.) 2–4., bitay.eniko@eme.ro*

Abstract
The geniality, the ambition and the calling of the author is not always enough to bring a technical creation to life; the adequate conjuncture, the meeting of the right people and the occurrence of the common recognition is equally compulsory. The present paper tries to show this aspect of the reality through the example of professor Lajos Martin, the pioneer of aviation of the Carpathian Basin. It presents the rough destiny of his technical heritage - documenting places, people and offering a rich literature for the essential details. The paper shows the efforts of the inventor to bring the theory to reality and continuous improvement. Unfortunately the invention wasn't enough appreciated in the inventor's home country and he refused to put it at the disposal of foreign nations. Reading through the valorous results of theoretical investigations regarding aviation–appears the portrait of an exceptional scientist whose theoretical skills and realizations exceeded the perception of the epoch. Unfortunately the poor material possibilities hampered the practical realizations and improvements, also the demonstration of the true value of his hypotheses. The paper also presents the events and persons related to the heritage, together with the stages of research realized in the frame of the Transylvanian Museum Society. The principles demonstrate the major importance of safekeeping our technical heritage, for the next generation, but also as source of inspiration.

Keywords: *Lajos Martin, aeronautics, pioneer, flying wheel*

Összefoglalás
Egy műszaki alkotás sikeres életre keltéséhez nem mindig elegendő az alkotó zsenialitása, elhivatottsága és állhatatossága; ugyanolyan mértékben szükség van a konjunktúra megfelelő alakulására, a megfelelő személyek találkozására és a közös felismerés erejére, amely a találmányba éltető szikrát lehel, hogy ezzel elindítsa azt az alkalmazás világában. A jelen dolgozat tárgyilagosan mutatja be a kolozsvári és egyúttal a Kárpát-medencei repülés úttörője, Martin Lajos egyetemi tanár személyes példáján keresztül ezt a figyelmen kívül nem hagyható valóságot. A Martin Lajos műszaki örökségének hányatott sorsát tárja fel, részletesen dokumentálja a helyeket, a kapcsolódó személyeket egyszersmind gazdagon idézi az örökség műszaki leírását tárgyaló szakirodalmat. A dolgozatban felsorakoztatott tények megvilágítják a feltalálónak a műszaki megvalósításra és a tökéletesítésre irányuló törekvését. Sajnos hazai érdeklődés nem volt a találmány iránt, a feltaláló pedig nem volt hajlandó azt idegen nemzetek kezébe adni, ezért korlátolt anyagi lehetőségek között küzdött a fejlesztéssel, amíg ereje engedte. A repüléshez kötött, igen gazdag tudományos munkássága eredményeit átolvasva olyan tudós

képe jelenik meg, aki korát jóval megelőzte, de anyagi és műszaki feltételei korlátozták igazának demonstrálásában. A Martin Lajos műszaki öröksége iránti érdeklődés ébredését, a hozzá kapcsolódó történeteket, személyeket és intézményeket, valamint az EME keretén belül folytatott kutatás részleteit rendszerezi a dolgozat. A felsorakoztatott elvek világossá teszik, hogy mennyire fontos a birtokunkban levő műszaki örökség feltárása, rendszerezése és megőrzése. Elsősorban a fiatal nemzedék számára ösztönző példa, de gazdag ötlettár is.

Kulcsszavak: *Martin Lajos, repülés, úttörő, lebegőkerék*

1. Bevezető

A műszaki társadalom szakmai tevékenysége nem annyira látványos a nagyközönség számára, csupán ha létrejön egy műszaki alkotás (megépül egy új ház, híd, út, avagy egy korszerű gép), melyről a sajtó is értesül, s közérdekű hírként megjelenik. Azonban a mindennapi tevékenysége egy mérnöknek, mellyel az ipar fejlesztéséhez járul hozzá, értékes tevékenysége nem ismeretes, vagy ha igen: a szakma számára, ha eredményeit közzéteszi. Sok olyan megbízott kutatás van, amelyek titkosítása miatt nem közölhetők, avagy olyan tervek, megvalósítások, amiket az ipar alkalmaz, s szintén nem jut el a széles körű terjesztésre. Az Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME) Műszaki Tudományok Szakosztálya ezért is tűzte ki feladatául, hogy műszaki elődeinknek a tevékenységét kutassa, illetve hagyatékait feldolgozza. Mindezek közös kulturális értékek, amelyek megőrzése, az egész társadalom számára való hozzáférhetővé tétele mindannyiunkat kötelez.

2. Műszaki nagyjaink kutatása, hagyatékainak feltárása

A *Műszaki nagyjaink kutatása, hagyatékainak feldolgozása* című projekt keretében a reáltudományokban maradandót alkotó (főleg erdélyi) tudósok emlékét és alkotásait szeretnénk dokumentálni, illetve a még fellelhető hagyatékait igyekszünk feldolgozni s kutathatóvá tenni. Mindemellett a még élő műszakis egyéniségekkel interjúkat készítünk, műszaki pályafutásuknak emlékét igyekszünk megörökíteni, s tárgyi emlékeikről készítünk digitális másolatokat. A kutatásnak kettős célja van: egyfelől felelevéniteni és megőrizni kívánjuk elődeink tevékenységét és eredményes munkásságát, másfelől ösztönző példaképet állítani a fiataljainknak, hogy bátran vállalják a műszaki, reál szakterület művelését s a kutatás kihívásait. [**1**].

3. Martin Lajos életének és munkásságának kutatása az EME-ben

Martin Lajos matematikus, mérnök, egyetemi tanár, az MTA levelező tagja (1861) a repülés egyik magyar úttörője.

Martin Lajos kutatásával a Műszaki Tudományok Szakosztály keretében 2004-ben kezdtünk foglalkozni Szakács József kollégával, amikor a műszaki kutatások és fejlesztések kialakulását tanulmányoztuk, s a XIX–XX. század neves műszaki egyéniségeinek életpályáit igyekeztünk feldolgozni.

1. ábra. *Martin Lajos arcképe*
Forrás: http://cultura.hu/kultura/190-eve-szuletett-martin-lajos-matematikus/

A 2005-ben bemutatott s 2006-ban közölt tanulmányban rövid áttekintést adtunk Hermann Oberth, Kerpely Antal, Born Ignác, Bányai János, Vendl Aladár, Papp Simon, Pávai-Vajna Ferenc mellett Martin Lajos pályájáról is mint kiváló egyéniségekről, akik tudásukkal, szakmai egyéniségükkel a világ élvonalába kerültek, s maradandót alkottak szakterületükön [**2**]. Martin Lajos lebegőkereke ebben az időben nem volt kutatható. A kolozsvári Történelmi Múzeum nagy átszervezése miatt sok kiállítási tárgyat dobozolt, s a fejlesztések elakadása nem tette lehetővé azt, hogy a dobozolt tárgyak visszakerüljenek a tárlókba, sem azt, hogy vizsgálni lehessen azokat. Számunkra annál is inkább fontos lett volna ezt a berendezést megtekinteni, tanulmányozni, mivel Szakács József a Román Repülőszövetség leigazolt vitorlázórepülős, motoros sportrepülős, sárkányrepülős szakoktatójaként és versenybíróként ismert szaktekintély volt. Sajnos a kutatás fejleményeit ő már nem érhette meg, 2010-ben elhunyt [**3**].

A kutatás 2011-ben kezdődött újra, amikor az EME-hez „kötődő" műszaki nagyjainkra összpontosítottunk, olyanokra, akik hagyatéka az EME egykori levéltárába, múzeumába került. Ekkor lendültek be a digitalizálási programjaink is, s avattuk az intézményünk repozitóriumát, az Erdélyi Digitális Adattárat (EDA), melynek Tudóstárába kerültek a gyűjtött hagyatékok: írások, dokumentumok, fotók stb. [**4**].

Mérnökként számomra Martin Lajos lebegőkereke izgalmas témának mutatkozott, s azért is volt fontos foglalkozni munkásságával, életével, hagyatékával, hiszen Martin Lajost az Erdélyi Múzeum-Egyesülethez sok minden kötötte mind életében, mind azután is. Itt (az EME-ben) mutatta be a széles közönség előtt kutatásainak eredményeit 1890. március 28-án, 1891. február 27-én, 1892. február 26-án, április 8-án, december 16-án, 1893. október 27-én, 1894. május 4-én és 1896. március 20-án (lásd. a Természettudományi Közlönyben megjelent jegyzőkönyvi kivonatokat: a 22. kötet 269. lapján, a 23. kötet 209. lapján, a 24. kötet 210. és 266. lapján, a 25. kötet 204. és 597. lapján, a 26. kötet 550. lapján és a 28. kötet 208. lapján [**5**]), illetve az EME folyóirataiban (Orvostudományi értesítő, Természettudományi Szak, Erdélyi Múzeum) közölte több tanulmányát, melyek digitalizált változatait az EDA-ban tettük elérhetővé:

1. *A lebegő kerék bemutatása = Orvostudományi értesítő, 18. évf., 15. köt. (1893.) 3. füzet, 231–238. http://eda.eme.ro/handle/10598/7122*
2. *Vorzeigung des Schweberades = Orvostudományi értesítő, 18. évf., 15. köt. (1893.) 3. füzet http://eda.eme.ro/handle/10598/7125*
3. *Allgemeine Theorie des Vogelfluges (Dritte Mittheilung) = Orvostudományi értesítő, Természettudományi Szak, 16. évf., 13. köt. (1891.) 3. füzet, 329–338. http://eda.eme.ro/handle/10598/7075*
4. *A lebegő kerék a Wellner-félével összehasonlítva = Orvostudományi értesítő, 19. évf., 16. köt. (1894.) 2. füzet, 189–196. http://eda.eme.ro/handle/10598/7137*
5. *Allgemeine Theorie des Vogelfluges = Orvostudományi értesítő, 13. évf. 10. köt. (1888.) 2. füzet, 211–216. http://eda.eme.ro/handle/10598/6940*
6. *A madárrepülés általános elmélete (3. közlemény) = Orvostudományi értesítő, 16. évf., 13. köt. (1891.) 3. füzet, 191–208. http://eda.eme.ro/handle/10598/7072*
7. *A csillagászat újabbkori haladásáról = Orvostudományi értesítő, Természettudományi Szak – Estély – 2. évf. 4. természettudományi estély (1877. április 14.) [Értesítő a „Kolozsvári orvos-természettudományi társulat" 1877. április 14-én tartott negyedik természettudományi estélyéről] 19–26. http://eda.eme.ro/handle/10598/7223*
8. *A madárrepülés általános elmélete (2. közlemény) = Orvostudományi értesítő, Természettudományi Szak –15. évf. 12. köt. (1890.) 2. füzet, 129–140. http://eda.eme.ro/handle/10598/7025*
9. *A madárrepülés általános elmélete (1. közlemény) = Orvostudományi értesítő, Természettudományi Szak– 13. évf. 10. köt. (1888.) 2. fü-*

zet, 145–160. http://eda.eme.ro/handle/10598/6943
10. *Az időmérőkről = Orvostudományi értesítő, Népszerű Szak, 14. évf.; 11. köt. (1889.) 1. füzet, 1-16. http://eda.eme.ro/handle/10598/5610*
11. *A repülésről = Orvostudományi értesítő, Népszerű Szak, 13. évf.; 10. köt. (1888.) 1. füzet, 1-21. http://eda.eme.ro/handle/10598/5608*
12. *Kolozsvár városa hoszmeghatározása = Erdélyi Múzeum II. évf., 1875; 8. sz. 121–123. http://eda.eme.ro/handle/10598/28150*

Martin Lajos az EME alapító tagja volt [**6**]), s mint láthattuk, tevékeny előadó az EME rendezvényein, szerzőként folyamatosan közölte tudományos eredményeit az EME kiadványaiban.

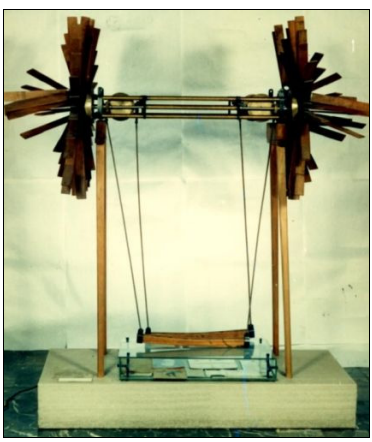
Martin Lajos halála után gyermekei szüleik 50. éves házassági évfordulója alkalmával, illetve Martin Lajos 86. születési évfordulóján (mely 1913. augusztus 30-ra esett) adták át megőrzésre, adományba a lebegőkereket és egy mappát az Erdélyi Múzeum-Egyletnek (az EME akkori elnevezése). Ez utóbbi Martin Lajos munkásságát leíró, néhány tanulmányt s fontosabb összegyűjtött iratokat tartalmaz (levelek, szabadalmak, feljegyzések) az 1871–1913 közötti időszakból. A hagyatékról csupán régebbi közlésekből, utalásokból lehetett információkat összegyűjteni, ennek ellenére a kutatást folytattuk, remélve, hogy e tárgyak vizsgálatára lesz majd alkalom.

Martin Lajos kutatása 2012-ben többnyire az általa közzétett tanulmányok, cikkek, előadásainak írott dokumentációi és róla szóló szakirodalom gyűjtését jelentette, ugyanakkor a hagyatékát is igyekeztem felkutatni.

2012. október 1. és 6. között a Babeş–Bolyai Tudományegyetemen ünnepélyes programsorozattal emlékeztek meg Kolozsváron az egyetem megnyitásának 140 éves évfordulójáról. Ez az esemény a Martin Lajos-kutatás jelentős fordulópontját jelentette, ugyanis az ünnepélyes megnyitó estéjén (2012. október 1-én), záróeseményként a BBTE múzeumában (Farkas u. 4. sz.) az egyetemtörténeti kiállítást nyitották meg. mely az 1872–1919 közötti időszakban keletkezett dokumentumokat, fényképeket, újságokat és egyéb tárgyakat mutat be. Ekkor került ismét nyilvános bemutatásra Martin Lajos lebegőkereke, melynek kutatásához, fotózásához szerződést kötöttünk az Erdélyi Nemzeti Történeti Múzeummal (Muzeul Național de Istorie a Transilvaniei. Contract de colaborare nr. 269/ 2013.).

A 2013-as évben a kutatás Martin Lajos lebegőkerekének tanulmányozására összpontosult. Január 31-én a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Egyetemi Múzeumában kiállított, Martin Lajos által tervezett lebegőkerék fotódokumentálására, március 5-én ugyanott helyszíni mérésekre került sor, mely munkálatokban s utólagos feldolgozásban Máté Márton szakmaiságára lehetett alapozni [**7**].

2013-ban a kutatás újabb fordulóponthoz jutott, ugyanis előkerült Martin Lajos mappája is. Számunkra ismeretlen volt a helye, azt feltételeztük, hogy a mappa is a lebegőkerékkel együtt az Erdélyi Nemzeti Történeti Múzeumban van. Ezt a sejtést alátámasztotta az alábbi fotó (**2. ábra**), mely a kiállított lebegőkerékről készült, s az üveges vitrinben dokumentumok látszanak, mint később kiderült, ezek csupán másolatok voltak.



2. ábra. *Martin Lajos lebegőkereke (2004). Vehicul – Martin, Lajos. Roțile plutitoare, Nr. inventar / Accession number: M. 2766.*

A fotó forrása: *Bunuri culturale mobile clasate în Patrimoniul Cultural Național / Mobile Cultural Objects Listed in the National Cultural Heritage, Deținător / Owner (la data clasării / at the time of listing): Muzeul Național de Istorie a Transilvaniei - CLUJ-NAPOCA; Ordin de clasare / Listing order: 2806 / 16. 12. 2004 - Tezaur) http://clasate.cimec.ro/detaliu.asp?k=B5D8C0ACB1BC11DAA0605254ABDD25F5*

Martin Lajos mappáját most már hosszú ideje a Román Állami Levéltár Kolozs Megyei Igazgatósága őrzi. 2013. június 19-én sikerült a mappát áttanulmányozni, majd engedélykéréssel 2013. július 4-én a teljes anyagot lefotózni és ezt követően digitalizálni.

2014. július 3-án Martin Lajos családját, két dédunokáját fogadta a Műszaki Tudományok Szakosztálya, amikor is bemutattuk az eddigi kutatásokat, az adatgyűjtés eredményeit, majd külön engedéllyel közösen megtekinthettük az Állami Levéltár Kolozs Megyei Igazgatóságában őrzött hagyatékot is.

A kutatás adatgyűjtési részét ezennel lezárhatjuk, s az értékes hagyatékról begyűjtött dokumentáció, fényképek és mérések szolgálják a további feldolgozást is. Ugyanakkor eredményként könyvelhető el, hogy a hagyaték mentése a digitalizálás révén megtörtént, az EME felvállalt feladatát ily módon teljesíti: megőrzi, kutathatóvá s az utókor számára is elérhetővé teszi a rá bízott hagyatékot.

A következő években a mappa metaadatolása fejeződött be sikeresen, s ezt követően ennek a feldolgozása jelenti a további kutatást.

Martin Lajos hagyatéka nem az egyetlen, amely jelenleg két részre bontva különböző intézmények kezelésében található. Debreczeni Márton bányász-kohász hagyatéka is egy hasonló példa, mely szintén az EME-re volt testálva, s jelenleg a hagyaték megbontva két különböző intézmény kezelésében van. A tizenkét bekötött kézirat jelenleg a Kolozsvári Lucian Blaga Központi Egyetemi Könyvtár kézirattárában, illetve a hét iratcsomóból álló rész a Állami Levéltár Kolozs Megyei Fiókjában található [**8**].

Egy-egy hagyaték sorsa, vándorútja olykor nehezen követhető, útjukat feltárva párhuzamosan nyomon követhetjük azt is, ki mit kutatott velük kapcsolatosan, s milyen eredmények születtek az évek során, hogyan alakították ki a kutatók egyik-másik neves ember kultuszát. A következő fejezetben Martin Lajos EME-re örökített hagyatékának sorsát igyekeztem röviden felvázolni.

4. Martin Lajos hagyatékának sorsa (a lebegőkerék és a mappa)

Martin Lajos hagyatéka, amely a lebegőkerékből és egy mappából állt, 1913-ban került az EME birtokába. Martin Lajos fia, ifj. Martin Lajos MÁV-tisztviselő 1913. szeptember 28-án, Kolozsvárt keltezett adományozó levelében a következőket írta:

„Méltóságos Uram!

Ígéretemhez képest vagyok bátor idemellékelten beterjeszteni a repülőgépre vonatkozó írásokat.

A lebegőkerékre vonatkozó írásokat 1895-ben Dr. Fábinyi tanár úrnak adta át atyánk consortium létesítéséért. S azok még most is talán nála vannak, így azt nem mellékelhetem. A többi nálunk levő összes írásokat idecsatoltan tisztelettel átteszem.

Arra kérem Méltóságodat, kegyeskedjenek úgy intézkedni, hogy ezen gép és iratok mindvégig itt maradjanak s csupán akkor, ha szűkebb hazánk, Erdély felett fellegek tornyosulnának és biztonságból más dolgok is ideiglenesen innen elkerülnének megőrzés végett, úgy csak akkor vitessék ez is el. Mert nem kívánnánk, hogy avatatlan kezekbe jusson.

Tudva, hogy felejthetetlen jó atyánk mennyire ragaszkodott Hazánkhoz mi munkáiból is kitűnik.

Például 1860-ban tartott felolvasása a tud. Ak. ban, mondván: „Ezen hasznos s mint hisszük erőzetileg véve érdekes nyomozást (A középfuterő befolyása a forgatott testek szilárdságára) a jelen sorok írója már 1856-ban végre

hajtotta. Akkori időben t.i. gátnoki hadnagy lévén, forgó röppentyűk fölött analitikai nyomozásokat tett, melyek eredményét fő-hadi parancsnokságunknak is aláterjesztette. A munka tudományilag ugyan igen alaposan megbíráltatott, rendjén kívül meg is dicsértetett, de arra bár hogyis iparkodott, nem vihette, hogy eredményeit álladalmi költségen megkísérelhette volna. Két év multán csak hamar az a hír lepte meg az írót, hogy tüzérségi főparancsnokságunk Hale angollal forgó röppentyűk megvásárlásáért alkudozásokba ereszkedett volna.

Ezen esemény elszomorító sujtás volt ugyan, de más részről általa legszebb elégtételeket nyert. Mert Hale kísérletei által a 2 évvel előbb beadott nyomozásainak elvileg akkor ugyan helyeselt, de gyakorlatilag kétségbe vont eredményei eldönt-hetetlen bizonyítást nyertek Hale röppentyűi a Congreve-féle röppentyűt nem csak felülmúlják céltalálási biztonságban és horderőben, hanem a képzelhetőséget is sokkal megelőzték.

Alulirt ezennel félbeszakítja nyomozását, azon reményben, hogy azt más alkalommal újra tovább folytathassa. Ő ugyan már 1857-ben a várnoki bizottmány által felszóllíttatott nyomozásait közre adni. Hogy azt akkor nem tevé, annak oka csak az volt, hogy több évi fáradozása gyümölcsét mint magyar csak nemzete s nem idegenek nyelvén akará a nyilvánosságnak által adni. S mivel az akkori foglalatosságai közt ezen óhajtása valósítható nem vala, azért kényszeríttették azt jobb időre halasztani.

S bár érezte s látta, hogy itthon nagyon is mostohául bánnak vele, mert a Budapesti Hírlapot kivéve az összes lapjaink lekicsinyelték és gáncsolták munkásságát, s hogy a fent nevezett lap ezt nem tevé az csupán Gyalui Farkas dr. úrnak tulajdonítható, ki e lap levelezője volt s ki mindig személyesen járt utána s győződött meg a dolgok valódi állásáról s nem hallgatott a mende-mondákra. Ezért rágondolva mindég jól eső érzéssel és hálatelten gondolunk, mert csak ő volt ki közleményeivel atyánk segítségére volt.

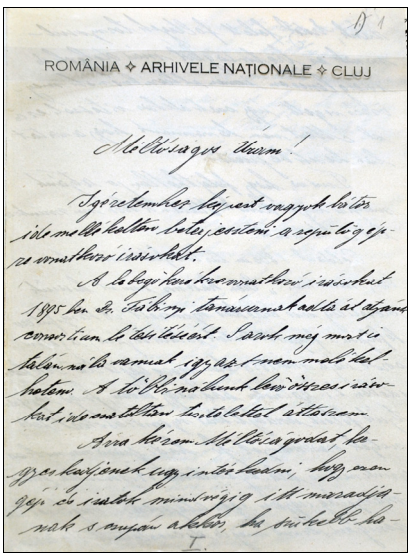
Mielőbb levelem befejezném, legyen szabad egy tiszteletteljes kéréssel Méltóságod elé járul-nom.

Kegyeskednének az ide csatolt fényképet a gép kiállítási helyére tenni, had lássa az utókor ki volt, ki ezen eszmének egész életét szentelte. [Megj. Az említett fotó, Martin Lajos arcképe a mappával együtt került az irattárba, így a kérést mai napig nem lehetett teljesíteni, mivel ez más intézmény gondozásában van (**4. ábra**).]

S még egyet, ha a gép ki lesz állítva illetve fölállítva, kegyeskedjenek minket erről értesíteni, hogy mi is megtekinthessük.

Egyben ide e levélbe mellékelem Lichtenstein consul lev. lapját. Hunwald ügyvéd levelét és atyám egy számadását, melyre feljegyzéseket tett volt a gép gyári létesítésére vonatkozólag. A helyet is kijelölte volt már, a Fürdő utca (akkori Libucgáti utca) végén levő rossz malom helye vagy a Rákóczi úton levő volt téglagyár helyében).

Ha ezen három, vagy többi iratok közül valamelyikére nem volna szükség, úgy kérném méltóztassanak azokat nekünk visszajuttatni.
Mély tisztelettel maradtam Méltóságod alázatos szolgája Martin Lajos máv. tisztviselő,
Kolozsvár 913 szept. 28." [**9**, 1r–3v]



3. ábra. *ifj. Martin Lajos adománylevelének első oldala. [**9**, 1r]*

4.1. A lebegőkerék sorsa

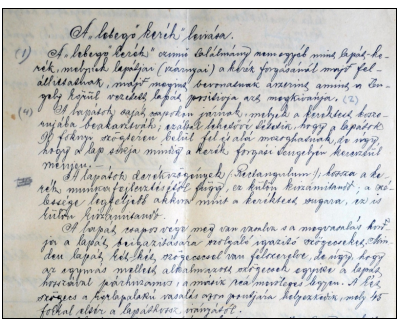
Martin Lajos a dinamikus repülés kikísérletezésének magyar úttörőjeként mindenkitől függetlenül jött rá a csűrőkormány-felületek alkalmazására. Igazi mérnökként elméleti vizsgálatait gyakorlati kísérletekkel is alátámasztotta. Első csapkodó szárnyú repülőgépmodelljét 1871–1875 között készítette el. Majd a merev csapkodó szárnyakat új elgondolással és számításokkal folytonos körmozgást végző lapátkerékre változtatta.

1893. július elején ötletesen, egyszerű megoldással készítette el lebegőkerekének első modelljét. Kolozsvárt, az Erdélyi Múzeum-Egylet 1893. októberi ülésén mutatta be először a „lebegőkerék” mintáját, majd Budapesten, a Tudományos Akadémián és a Magyar Mérnök- és Építész-Egyletben is. A lebegőkerék-modell méreteit, számításait és leírását az EME kiadványában közölte magyarul és németül.

4. ábra. *Martin Lajosról készült fénykép [9]*

A lebegőkereket a 11840 számú okirat tanúsága szerint (**5. ábra**) 1894. április 27-én szabadalmaztatta. A Monarchiában „Schweberad”, Franciaországban „Roue volante” név alatt jegyezték be. Németországban is szabadalmaztatta, illetve a lebegőkerék leírásait több nyelvre is lefordította, a **6. ábra** a magyar nyelvű leírás első oldalának részletét mutatja be.

5. ábra. *A lebegőkerék szabadalma [9, 17r]*



6. ábra. *A lebegőkerék magyar nyelvű leírásának részlete [9, 19r]*

A lebegőkerék építésére 500 Ft támogatást kapott, s 1896. augusztus 30-án az elkészült gépet ki is próbálták a kolozsvári egyetem kertjében. Egyes szemtanúk állítása szerint a géppel Bartha Gergely kolozsvári tűzoltóparancsnok 2-3 m magasra emelkedett [**5, 10**]. Ugyanabban az évben egy berlini cég 43 000 forintért akarta megvásárolni a találmányt, de Martin visszautasította az ajánlatot, mert hazáját akarta vele szolgálni [**7**].

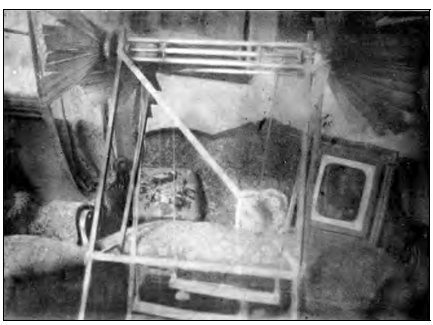
Martin Lajos betegsége ellenére a találmány továbbfejlesztésére törekedett. Egy nagyobb méretű, motorizált változatát tervezte, mely megvalósításához nagyobb értékű tőkére volt szüksége, a kivitelezéséhez pedig komolyabb műhelyre. Ennek érdekében a modellt átadta a Solymosy és Kosch cégnek, a tervrajzokat pedig dr. Fabinyi Rudolf egyetemi tanárnak, aki konzorciumot volt hivatott létrehozni az anyagi fedezethez. Sajnos ezek a dokumentumok elvesztek. Martin Lajos 1897. március 4-én bekövetkezett halála a nagy tervek kivitelezését végképp elakasztották.

Martin Lajos fia, ifj. Martin Lajos édesapja emlékét kegyelettel őrizve, az ő szellemében járt el a találmány ügyében is.

Feljegyzésében a következőket írja: „*A két első gépet, atyánk halála után hasztalan kerestük az egyetemen, mert nem találtuk s így valószínű, hogy a bontáskor avatatlan kezekbe került*" [**9**, 8r]. A lebegőkerék harmadik példányát a Solymosy és Kosch cégtől – mely időközben csődbe jutott – nagy nehezen szerezte vissza 1901. június 9-én Gidófalvy közjegyző közbenjárásával (Hunwald Lajos „csődtömeg(?)" gondnok adta ki).

A lebegőkerék a Martin család lakásába került, megtisztították, s megőrizték.

A lebegőkerék korabeli fényképét, mely a Martin család lakásán készült, a **7. ábra** szemlélteti.



7. ábra. *A lebegőkerék harmadik szabadalmazott modellje. A fotó Martin Lajos lakásában készült [***10** *Nemes, 1938, 473 old.]*

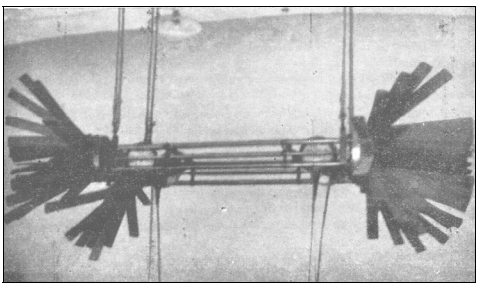
Ifj. Martin Lajos a lebegőkerék tárolásról a következőket írja: „*Szétszedett állapotban tartottuk a szobánkban, hól egy külön rész volt mindig e célra fenntartva, s most az utóbbi időben is nővéreim szobájukban volt neki külön helye*" [**9**, 9r]

A lelkes örökös az iratokat is őrizte, a szabadalmakat is folyamatosan újította, komoly levelezést folytatott annak érdekében, hogy apja álmát valóra válthassa. Ugyanabba a csapdába esett (patthelyzetbe), mint Martin Lajos feltaláló: külföldi nagy cégeknek nem szándékozta átadni, akik komoly ajánlatot tettek, viszont hazai pályán nem volt rá komoly kereslet. Így jutott arra a döntésre 1913-ban, hogy átadja az EME-nek megőrzésre. Feljegyzésében a következőket írja: „*látva, hogy hasztalan várunk és fáradozunk a gép megvalósításán, elhatároztuk, hogy az E.M.E-nek fogjuk átadni a gépet megőrzés végett*"*[…]* „*a géppel üzérkedni nem akartunk, s ha már megvalósítva nem adhattuk át hazánknak hát legalább így adtuk át oly intézetnek, mely tudjuk meg fogja az utókor részére őrizni*" [**9**, 11r]. Az ifj. Martin Lajos által összeállított mappában mindezek részleteikben láthatok, olvashatók. Talán ezen írásból fontos itt kiemelni azok neveit, akik minden anyagi haszon nélkül segítőtársai voltak Martin Lajosnak, különösen 1894-től, amikor betegeskedése miatt segítségre szorult: Judik József mérnök, a későbbiekben MÁV-felügyelő a rajzokat készítette; a dokumentációs részekben Gazelli Árpád egyetemi könyvtári tisztviselő segédkezett. A gép összeállítását Lutze Ferenc egyetemi gépész végezte.

A lebegőkerék további sorsáról Tulogdy János 1941-ben közöl írásából tájékozódhatunk: „*Martin Lajos repülőgépét 1918 után a románok a kiállítás helyéről leszerelték és a padlásra dobták fel, amikor több alkotórésze összetört. Dr. Roska Márton egyetemi tanár, a régiségtár igazgatója, ismét kiállíttatta a Bástya utca 2. szám alatti múzeumi helyiségben. Ugyanott vannak a gépre és*

Martinnak a repülés megoldásáért folytatott munkásságára vonatkozó iratok egy nagy könyvbe összekötve" [**5.** Tulogdy 1941. 359.p.]. Tehát ekkor még a hagyaték egyben volt (lebegőkerék és mappa).

Az Erdélyi Múzeum (az EME akkori neve) 1941. október 5-i Széchenyi-emléknap alkalmából állította ki a lebegőkereket (**4. ábra**).



8. ábra. *Martin Lajos lebegőkereke, az Erdélyi Múzeumban (1941, Kiss Egon felvétele [5. 357.p.]).*

Ekkor többen, közéleti személyek is megtekintették a kiállított művet, mint például dr. Ember Sándor, országgyűlési képviselő, a Magyar Aero Szövetség elnöke, dr. vitéz Derecskey György postatanácsos, a Postás Sportrepülők elnöke és Czirmay Zoltán légügyi főfelügyelő vezetésével a pilóták. Majd a Házsongárdi temetőbe is kivonultak, s Martin Lajos sírjánál babérkoszorút helyeztek el, melynek nemzeti szalagján a következő felirat állt: „*Dr. Martin Lajosnak, a magyar repülés úttörőjének. Széchenyi-emléknap. 1941. X. 5.*" [**5.** Tulogdy 1941. 362.p.]. Az esemény Martin családját is meghatotta, akik a koszorúzást követően kimentek a sírhoz („*A koszorú letétek után mi négyen testvérek és gyermekeim felkerestük felejthetetlen szüleink sírját, mert nem akartuk jelenlétünkkel feszéjezni az ott megjelenteket*"), s a babérkoszorút megőrzésre az EME-hez vitték: „*az eső beálltakor a koszorút bevittük a Múzeumba és elhelyeztük a gép mellé utólagos jóvhagyásuk reményében"* [6].

Ekkor javasolta Tulogdy, hogy az 1935-ben alakult kolozsvári Cserkészrepülők Köre vegye fel Martin Lajos nevét, s miután ebbe a család is beleegyezett, a kör *„A kolozsvári Cserkészrepülők dr. Martin Lajos köre"* nevet viselte [5, 6].

Ezzel indult el a Martin-kultusz Kolozsváron, a Dónát negyedben utcát is elnevezett róla (a jelenlegi Iacob Bologa utca viselte a nevét), sajnos ez csupán 1940 és 1945 között volt használatos [**11**].

A rendszerváltást követően, a II. világháború után ismét mostoha sorsra jutottak azok a múzeumi tárgyak, értékek, melyek kezelői számára nem voltak fontosak, avagy nem ismerték származásuk hátterét, történetét, jelentőségét, szakmaiságát.

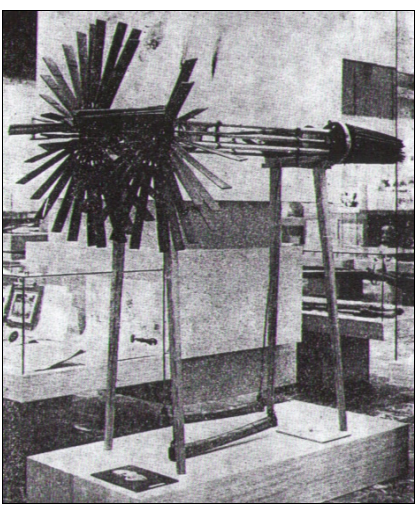
Gyurka László (1928–1997) ezüstkoszorús vitorlázórepülős Martin-kutató, a lebegőkerékkel kapcsolatos személyes élményét írta le utolsó cikkében, melyet Martin Lajos 170. születésnapja alkalmából írt, s két részletben jelent meg a Gyopár folyóiratban Kolozsvárt 1997-ben. E szerint 1954-ben olvasta Kiss Béla (kőműves, amatőr történész) írását a lebegőkerék hollétéről. Nevezetesen ez az egykori Iparmúzeum (a Malom utcai Műegyetem központi épületével szembeni épület) padlásterében található elég rossz állapotban. Gyurka felmérve a helyzet jelentőségét (a hivatalos formaságokat figyelmen kívül hagyva) azonnal intézkedett, s gyakorlatias megoldással a hiányzó alkatrészt: egy kúpfogaskereket a Tehnofrig üzemben elkészíttette, s Korodi József régész, múzeumi preparátor segítségével a helyreállított lebegőkereket a Múzeum Újkori kiállítási termében helyezték el [**12**].

A Martin Lajos-kultusz lángját 1968-ban Mészáros Vince muzeológus, technikatörténész, kiváló Martin-kutató élesztette újra, ekkor jelenik meg első írása *Martin Lajos, a repülés magyar úttörője* címmel az Élet és Tudományban [**13**]. Nyolcévi kutatás s több tanulmány közlését követően 1976-ban jelenteti meg az azonos című ösz-

szegző írását Martin Lajosról a budapesti Közlekedési Múzeum Füzetei sorozatban, annak az intézménynek a kiadványában, ahol muzeológusként dolgozott [**14**].

Mészáros részletesen ismerteti a lebegőkerék kutatását, azt a tényt, hogy a 60-as években újra keresni kellett a szerkezetet, ennek érdekében Intézménye közreműködést kezdeményezett a kolozsvári Történelmi Múzeum vezetőségével, s végül – bár romos állapotban, de – megkerült a lebegőkerék. A múzeum vezetősége felismerte a benne rejlő kultúrtörténeti értéket, s restauráltatta, annál is inkább, mivel egy külföldi múzeum érdeklődött iránta. A két intézmény szoros közreműködése a Martin-kutatásban a publikációkban is megnyilvánult. Mészáros Vince és Nicolae Cordoş a két intézmény muzeológusa ebben az időszakban intenzíven kutatta Martin Lajost, még közös publikációban is közölt eredményt [**15**].

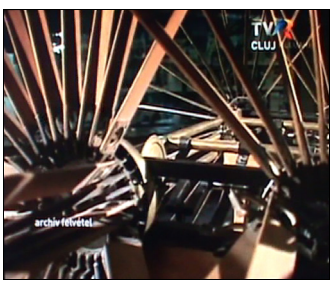
A restaurált s újra kiállított lebegőkerék sikeres története mindkét kutatót lelkesítette, s kutatásukat közreadták, így a lebegőkerékről két fotó is megöröklődött (**9–10. ábrák**).



9. ábra. *Martin Lajos lebegőkereke. Muzeul de Istorie al Transilvaniei (1974, Nicolae Cordoş [***16***. 347.p.]).*

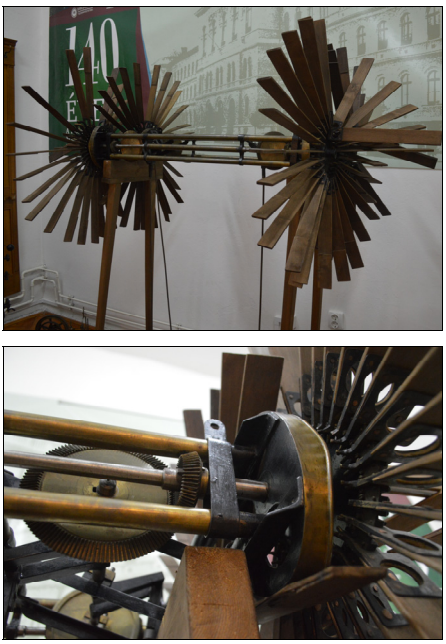
A nemzetközi szintű kutatásra a média is felfigyelt. Ekkor készült el Bardócz Sándor és Imecs Márton *Martin Lajos az aviatika kolozsvári úttörője* című dokumentumfilme, melynek szakmai tanácsadója Nicolae Cordoş volt (**11. ábra**).

10. ábra. *Martin Lajos lebegőkereke a kolozsvári múzeumban, 1976.[**14.** 49.p.].*



11. ábra. *Martin Lajos lebegőkereke Bardócz Sándor és Imecs Márton Martin Lajos az aviatika kolozsvári úttörője című dokumentumfilmében (1970-es évek).*

Hogy mikor került ismét raktárba a lebegőkerék, azt nem tudom, de a 2000-es évek elején ismét nem volt elérhető. Erről a periódusról s az EME-ben folyó Martin Lajos-kutatásról a 3. fejezetben részletesen írtam, itt csupán azokat a fotókat teszem közzé, amelyek az utoljára látható, kiállított lebegőkerékről készültek felméréseinkkor (2013-ban a BBTE Egyetemi Múzeumának időszakos kiállításán).



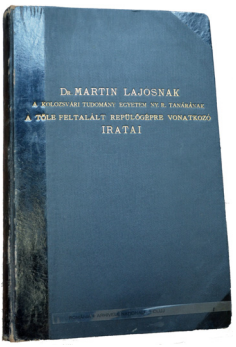
12. ábra. *Martin Lajos lebegőkereke. (2013)*

Jelenleg a lebegőkereket az Erdélyi Nemzeti Történelmi Múzeum (Muzeul Național de Istorie a Transilvaniei) Kolozsváron őrzi raktárában, nincs kiállítva, nem tekinthető meg.

4.2. A Martin Lajos-mappa

Martin Lajos keménykötésű mappája szürkéskék fedőlapján a következő aranybetűs felirat olvasható: **Dr. MARTIN LAJOSNAK** A KOLOZSVÁRI TUDOMÁNY EGYETEM NY. R. TANÁRÁNAK A TŐLE FELTALÁLT REPÜLŐGÉPRE VONATKOZÓ **IRATAI.**

A mappa összesen 291 oldalban gyűjtött dokumentumokból tevődik össze. Életrajza, szabadalmak, levelezések, a találmányok leírása, rajzai, valamit ezzel kapcsolatos levelezései, az ő, illetve azonos nevű fiának levelezése. A dokumentumok nyelve zömmel magyar vagy német, de angol és francia nyelvű is található köztük. A mappa dokumentumainak időperiódusa: 1871–1913 közötti.



13. ábra. *Martin Lajos mappájának borítója.[9]*

A mappa részletes tartalmát s feldolgozását egy további közleményben tesszük közzé.

Martin Lajos mappájának eredetije, a bekötött iratcsomó jelenleg a Román Nemzeti Levéltár Kolozs megyei Igazgatóságának a megőrzésében található.

5. Következtetések

Martin Lajos egybegyűjtött, digitalizált hagyatékának további feldolgozása, illetve az eredmények közzététele, monográfiájának összeállítása várható.

A repülőszerkezetet: a lebegőkereket jelenleg a kolozsvári székhelyű Erdélyi Nemzeti Történelmi Múzeum őrzi. A mappa a Román Nemzeti Levéltár Kolozs megyei Igazgatóságának levéltárában található (fond personal: Martin Lajos, nr. fond: 505, nr. inventar: 1436.), a kutatás kérvényszáma: 351/2013.06.13.

Minden összegyűjtött dokumentum az EDA-ban (az EME repozitóriuma) van digitálisan megőrizve, s további kutatásokra szándékozunk hasznosítani, illetve Martin Lajos folyamatos kultuszát ebből is táplálni.

A lebegőkerék szerkezetéhez és működési elvéhez minden adat összegyűlt, ideje ezt újra megépíteni. Reméljük, diákjainkkal együtt sikerül megvalósítani, hisz mindenképpen nyerünk belőle: ha sikerülne a felszállás, akkor azért, ha nem, akkor a szellemből, a követendő példából meríthetünk,

a mérnöki gondolkodás alapjait vethetjük meg a következő generációnak, merítve elődeink zsenialitásából.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az EME *Műszaki nagyjaink* c. projektjének keretében valósult meg, a Műszaki Tudományok Szakosztályának támogatásával. Köszönetemet fejezem ki Szilágyi Júlia, Tóth Orsolya, Katona Ágnes és Papp Kinga kollégáknak, akik a digitális anyag feldolgozásában vettek részt, valamint Máté Márton kollégának az értékes szakmai közreműködésért. Ugyanakkor ezúton fejezem ki köszönetemet az Erdélyi Nemzeti Történeti Múzeumnak, illetve a Román Nemzeti Levéltár Kolozs megyei Igazgatóságának, hogy lehetővé tették a forrásanyagok megtekintését és fotózását.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Bitay Enikő: *Műszakitudomány-művelés Erdélyben: Technical Science Cultivation in Transylvania*. In: Csibi Vencel-József (szerk.): XXV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó: 25nd International Conference on Mechanical Engineering, Conferința Internațională de Inginerie Mecanică, ed. a 25-a: OGÉT 2017. Kolozsvár, Románia, 2017.04.27–30. Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Kolozsvár/Cluj-Napoca, 2017. 18–21. 20.

[2] Szakács József – Bitay Enikő: *A műszaki kutatások és fejlesztések kialakulása Erdélyben, a Bánságban és a Partiumban (a kezdettől a XX. századig).* Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2006. 141–156. http://eda.eme.ro/handle/10598/15469

[3] Bitay Enikő: *In memoriam Szakács József (1931–2010).* Erdélyi Múzeum 73. kötet 1. füzet, 2011. Kolozsvár, 192–193. http://eda.eme.ro/handle/10598/26039.

[4] Bitay Enikő: *Az Erdélyi Digitális Adattár*. Tudományos és Műszaki Tájékoztatás (MTM), Budapest, 60. évf. 5. sz. / 2013. 203–216. http://tmt.omikk.bme.hu/show_news.html?id=5784&issue_id=548, Elérve: 2017. 10.23.

[5] Tulogdy János: *Martin Lajos élete és munkássága*. Erdélyi Múzeum, Új folyam 12. 46. kötet, 3/4. füzet, Kolozsvár, 1941. 351–365, 363. http://eda.eme.ro/handle/10598/26948

[6] Ifj. Martin Lajos 1941. október 17-én (Kolozsvárt, Donát út 64. szám alól) keltezett levele egy tanárnak, valószínűleg Tulogdy Jánosnak írta (gépelt aláíratlan példány Láris Ferenc ükunokájának hagyatékából).

[7] Bitay Enikő – Máté Márton: *Martin Lajos, a feltaláló mérnök és lebegőkereke. Lajos Martin, the Inventor Engineer and his Flying Wheel.* XVIII. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, EME, Kolozsvár, 2013. 74–82. http://eda.eme.ro/handle/10598/26787

[8] Bitay Enikő: *Az „egyetlen" erdélyi bányász. Debreceni Márton műszaki öröksége*. Tudomány- és Technikatörténeti Füzetek 9., EME, Kolozsvár, 2016, 154. http://eda.eme.ro/handle/10598/30115

[9] ******Dr. Martin Lajosnak a Kolozsvári Tudomány Egyetem ny. r. tanárának a tőle feltalált repülőgépre vonatkozó iratai.* Mappa, 1913. (Ifj. Martin Lajos állította össze és adományozta, 1913. szeptember 28-án.). A Román Nemzeti Levéltár Kolozs megyei Igazgatósága (Martin Lajos, fond: 505, nr. inv. 1436).

[10] Nemes Ferenc: *Az első erdélyi repülőgép regénye.* Pásztortűz, XIV. évf. 9. sz. Kolozsvár, 1938. szeptember. 471–474.

[11] Asztalos Lajos: *Helytörténet – Kolozsvár – közelről. Martin Lajos, a repülés kolozsvári úttörője*. II. rész. Szabadság, Kolozsvár, 2010. január 20.

[12] Gyurka László: *170 éve született Martin Lajos (1827–1897).* I. rész. Gyopár, Kolozsvár, 1997. 5. 9–16.

[13] Mészáros Vince: *Martin Lajos, a repülés magyar úttörője.* Élet és Tudomány, 23. évf. 24. sz. Budapest, 1968. jún. 1107–1111.

[14] Mészáros Vince: *Martin Lajos, a repülés magyar úttörője.* A Közlekedési Múzeum Füzetei 5. Budapest, 1976. 64.

[15] Mészáros Vince – Nicolae Cordoș: *Lilienthal-levelek Martin Lajoshoz*. Korunk. Kolozsvár. 1973. XXXII. évf. 5. sz. 790–795.

[16] Nicolae Cordoș: *Un profesor clujean – pionier al aeronauticii.* Acta Mvsei Napocensis, XI, Muzeul de Istorie al Transilvaniei Cluj-Napoca, 1974. 335–352.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 39–50. 04
http://hdl.handle.net/10598/30084

NAGY VAS-OXID-TARTALMÚ NANOKRISTÁLYOS ALUMINO-BOROSZILIKÁT ÜVEGEK

NANO-CRYSTALLIZED ALUMINO-BOROSILICATE GLASSES WITH HIGH IRON CONTENT

Bitay Enikő[1], Kacsó Irén[2], Kormos Fiammetta[3], Holczer Emil[3], Veress Erzsébet[4]

[1]*Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, 540485 Romania, Marosvásárhely/Târgu-Mureș, OP 9, CP 4, Tel.+40-751-016063, ebitay@ms.sapientia.ro*

[2]*National Institute for Research and Development of Isotopic and Molecular Technologies INCDTIM, OP 5 CP 700, 400293, Cluj, Romania, Tel. +40 745- 645670, iren.kacso@gmail.com*

[3]*DEKRA Certification SRL, 131 Brâncuși, RO-400458 Cluj/Kolozsvár, Tel/Fax +40 264443598, dekra@dekracert.ro*

[4]*Erdélyi Múzeum-Egyesület, 400750 Romania, Cluj/Kolozsvár, OP 1 CP 191, Tel. +40-743-119275, veresserzsebet@gmail.com*

Abstract
Compositional and structural characteristics as well as magnetic properties of high iron oxide containing borosilicate glasses prepared by the usual melt-quenching procedure were studied using FT-IR spectroscopy, XRD, optical microscopy and magnetic susceptibility determinations. The resulted glasses were all devitrified to some extent, with mainly hematite and magnetite nanocrystals separated in the glassy matrix. According to the magnetic susceptibility results, the Fe_2O_3/FeO rate in all glasses shifted towards Fe_2O_3:FeO = 1:1, favorizing the magnetite formation.

Keywords: *Fe-borosilicate glasses, magnetic susceptibility, FT-IR, XRD, optical microscopy*

Összefoglalás
Hagyományos olvasztással-dermesztéssel előállított, nagy vas-oxid-tartalmú aluminoboroszilikát üvegek mágneses tulajdonságait, kristályosodását és szerkezeti rendezettségét vizsgáltuk mágneses szuszceptibilitás méréssel, FT-IR spektroszkópiával, röntgendiffraktometriával (XRD) és optikai mikroszkópiával (OM) a fő rácsképző oxidok (SiO_2, B_2O_3) viszonylagos kezdeti mennyiségének és a kezdeti Fe_2O_3/FeO aránynak függvényében. Az OM, FT-IR és XRD adatok alapján az üvegek kristályosodása, lokális szerkezete és szerkezeti rendezettsége megfelel a kiinduló oxidösszetétel alapján az irodalmi adatok szerint várhatónak. A mágneses szuszceptibilitás adatokból következően az üvegolvadékban beálló Fe(II)-Fe(III) egyensúly minden esetben a magnetit keletkezésének kedvező 1:1 Fe_2O_3:FeO értékhez közelít. A következtetést az XRD- és OM-vizsgálat alátámasztja, igazolva, hogy az üveges mátrixban a hematitkrisztallitok mellett magnetit is van.

Kulcsszavak: *vas-oxidos boroszilikát üvegek, mágneses szuszceptibilitás, FT-IR, XRD, OM*

1. Mágneses oxidüvegek

A mágneses oxidüvegek vitrokrisztallin anyagok (üvegkerámiák), amelyek a szerkezetükben homogén eloszlásban levő mikro- és/vagy nanoméretű mágneses krisztallitoknak köszönhetően mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek. A mágneses krisztallitok anyaga átmenetifémek és ritkaföldfémek egyszerű, illetve vegyes oxidja. Az egyszerű oxid gyakran Fe_2O_3, a vegyesoxidok többnyire $M^{II}Fe_2O_4$ típusú ferritek (M^{II}=Ba, Sr, Zn, Mn, Fe, Ni, Co, stb., leggyakrabban Fe_3O_4) vagy ABO_3 általános képletű perovszkitok: A=M^{II} (Ba, Sr) és/vagy M^{I} (Na, Li); B = Ti, Zr, Nb, Ta, ritkábban Fe [1–10]. Az alapösszetétel megválasztásakor fontos szempont, hogy az üveg a felhasználási helyre jellemző körülményekből adódó környezeti hatásoknak ellenálljon. Ennek megfelelően a rácsképző oxid SiO_2, B_2O_3, Al_2O_3, P_2O_5, Bi_2O_3, PbO vagy ezek keveréke. A rácsmódosítók alkálifém-oxidok (Na_2O, K_2O, Li_2O), alkáliföldfém-oxidok (CaO, BaO, SrO), illetve az amorf üvegmátixban kiváló mágneses krisztallit-fázist képző és az elektromos, mágneses és optikai tulajdonságokat biztosító átmenetifém-oxidok (ZnO, PbO; Fe_2O_3, V_2O_5, MnO_2, Cu_2O, CuO, CeO_2, Cr_2O_3, MoO_3, WO_3, CoO, UO_3). Az átmenetifém-oxidok [11–14] szerepe kettős: a rácsmódosító funkció mellett rácsképzőként is megnyilvánul(hat)nak.

Az oxidüvegekre általánosan jellemző kémiai stabilitásukkal és viszonylag egyszerű alakíthatóságukkal társult különleges elektromos, mágneses, optikai tulajdonságaikból adódó számos alkalmazási lehetőségüknek köszönhetően a mágneses oxidüvegek elméleti és alkalmazott kutatása az utóbbi években gyors fejlődésnek indult A felhasználási lehetőségek az információtechnológiától az orvosi alkalmazásokig terjednek, de alkalmasak egyes környezetszennyező hulladékok hasznosításában is: egyes nehézfémhulladékok (hőerőműhamu, kohósalak, nukleáris hulladék, kalcinált háztartási hulladék) üvegbe olvasztásakor mágneses üveg keletkezik) [15–19].

A mágneses oxidüvegek nagyobb mennyiségben való előállítása a hagyományos üveggyártásnak megfelelően homogén olvadékuk gyors lehűtésével történik. Természetesen vékonyrétegként is előállíthatók az ismert kémiai vagy fizikai leválasztási módszerekkel. Az alkalmazás által megkívánt fizikai (technikai) tulajdonságok mindkét esetben a kristályosodási folyamat gondos ellenőrzése (irányítása) révén biztosíthatók. Az irányított kristályosodás (devitrifikáció) érdekében a kiinduló oxidkeveréknek tartalmaznia kell a nanokrisztallitokat képző oxidokat (például Fe_2O_3 adalékot), az elkészült üveget pedig megfelelő hőkezelésnek vetik alá. Az irányítottan kristályosodott anyag makroszkopikusan homogén, és optimális esetben csak a kívánt krisztallittípust tartalmazza, megfelelő méreteloszlásban és koncentrációban.

A jelen dolgozat a kolozsvári Raluca Ripan Kémiai Kutatóintézetben előállított, nagy vas-oxid-tartalmú alumino-boroszilikát üvegek tulajdonságainak vizsgálata során nyert egyes eredményeket mutatja be. A hat oxidkomponenst tartalmazó üvegeket azonos körülmények között, hagyományos olvasztással-dermesztéssel állítottuk elő, utólagos hőkezelésnek nem vetettük alá. A mágneses szuszceptibilitás mérése segítségével követtük az üvegolvasztás során beálló, dermesztéssel „befagyasztott” Fe(II)-Fe(III) egyensúly változását a fő rácsképző oxidok (SiO_2, B_2O_3) arányának, illetve az állandó SiO_2/B_2O_3 arány mellett adalékolt Fe_2O_3 és FeO arányának függvényében; optikai mikroszkópia, FT-IR spektroszkópia, XRD alkalmazásával pedig vizsgáltuk az üvegek kristályosodását és (lokális) szerkezeti rendezettségét.

2. Az üvegek előállítása, jellemzése

2.1. Az üvegek összetétele, szintézise

A teljesen száraz, finomra porított, 1 mg pontossággal bemért, analitikai tisztaságú kiindulóanyagokból készült (oxidok, karbonátok, bórsav), zárt rendszerben homogenizált, megfelelő összetételű kiinduló-keverékek olvasztása platinatégelyben, magas hőmérsékletű KO II típusú kemencében történt, levegő jelenlétében, A kiinduló anyagok közül az Al_2O_3, FeO és Fe_2O_3 Fluka termék, a többi „Reactivul București" termék volt.

A kiinduló összetételeket az **1. táblázat** foglalja össze.

1. táblázat. *A vizsgált üvegek összetétele*

Üvegtípus	Komponensek (mol%)					
	SiO_2	B_2O_3	Na_2O	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO
R20	32,4	34,4	14	3,7	7,8	7.8
R21	35,0	30,0	15	4,0	8,0	8,0
R22	40,0	25,0	15	4,0	8,0	8,0
R23	40,0	25,0	15	4,0	16,0	-
R24	40,0	25,0	15	4,0	-	16,0

A 100 g kiinduló keveréket tartalmazó tégelyt a kályhával együtt fűtöttük fel. A felfűtést 800^0C-ig 5 fok/min sebességgel, majd a következő diagram szerint vezettük: 800 ^{0}C (30 min) → 1000 ^{0}C (15 min) → 1200 ^{0}C (30 min) → 1300 ^{0}C (60 min) → 1400 ^{0}C (60 min) →1450 ^{0}C (szintézis, 180 min) → 1350 ^{0}C (letisztulás, 60 min) → 1300^0C (megnyugvás, 30 min) → kiöntés. Az olvadékot a homogenizálódás érdekében 1300^0C fölött mintegy 15 percenként platina keverővel mechanikusan kevertük.

A szintézis menetét ismételt cseppminta-vétellel ellenőriztük.

A szintézis befejeztével (a mintaként kivett csepp optikailag teljesen tiszta, homogén) az olvadékot 3 mm vastag rozsdamentes acéllemezre öntöttük ki, majd 10 fok/min sebességgel hagytuk a szobahőmérsékletig hűlni.

2.2. Az üvegek vizsgálata

2.2.1. Mágneses szuszceptibilitás mérések

2.2.1.1. A mágneses szuszceptibilitásról [20,21]

Külső mágneses tér hatására a spontán mágneses momentummal rendelkező és a mágneses momentum nélküli atomok is mágnesesődnek: a mágneses térirránnyal ellentétes irányítású járulékos mágneses momentum indukálódik bennük (*diamágneses* folyamat). A spontán mágneses momentummal rendelkező atomok ezenfelül rendeződni is igyekeznek, a tér irányításának megfelelően (*paramágneses* folyamat). Viszonylag kis térerejű külső mágneses térben a diamágneses folyamat során mágnesezett anyag *M* mágnesezettsége (térfogategységre eső mágneses momentuma) a *H* mágneses térerősség függvényében lineárisan változik:

$$M = \chi H$$

χ (a *térfogati mágneses szuszceptibilitás*) dimenzió nélküli mennyiség, az anyagok mágnesezhetőségének mértéke.

Paramágneses atomok hiányában a diamágneses anyagok eredő mágneses szuszceptibilitása az indukált mágneses momentum irányításából következően $\chi<0$. Ha az anyag paramágneses atomokat (is) tartalmaz, a fellépő és a diamágneses folyamat hatását rendszerint felülmúló paramágneses folyamat következtében az eredő mágneses szuszceptibilitás $\chi>0$ (az anyag paramágneses). A diamágneses szuszceptibilitás *hőmérséklettől független*, a paramágneses anyagok mágneses szuszceptibilitása *hőmérsékletfüggő*. Mind a diamágneses, mind a paramágneses anyagok indukált mágnesezettsége megszűnik a külső tér megszűnésével.

A gyakorlatban az anyagok mágneses viselkedésének jellemzésére a χ_M *fajlagos mágneses szuszceptibilitás* és a χ_A *moláris mágneses szuszceptibilitás* használatos:

$\chi_M = \chi/d$ *d* – sűrűség

$\chi_A = \chi \cdot A/d$ A – móltömeg

Az oxidok, oxidvegyületek (oxidüvegek és kerámiák is) általában *diamágnesesek*, χ_{dia} diamágneses szuszceptibilitásuk a kémiai összetételnek megfelelően:

$\chi_{dia} = \sum \chi_{Ai} \cdot c_i / A$,

ahol c_i az i típusú oxid mólszázalékos aránya; χ_{Ai} az i oxid moláris mágneses szuszceptibilitása; A az átlagolt móltömeg.

A paramágneses ionokat kis mennyiségben tartalmazó *paramágneses* anyagokban a mágneses ionok egymástól elszigeteltek, külső mágneses tér hiányában az atomi mágneses momentumok irányeloszlása rendezetlen; paramágneses szuszceptibilitásának hőmérsékletfüggését a *Curie-törvény* írja le:

$\chi = C/T$.

A kifejezésben C az anyagspecifikus *Curie-állandó*, T az abszolút hőmérséklet.

Nagyobb mennyiségű mágneses iontartalom esetében, vagy ha az anyag alapvetően átmenetifém oxidokból áll, a mágneses ionok kölcsönhatásba lépnek, és a mágneses momentumok irányítása szerint kisebb-nagyobb doménekbe rendeződnek. Ha a doménekben az atomi momentumok adott hőmérséklet alatt azonos irányúak, az anyag *ferromágneses*, ha azonos nagyságúak és váltakozó irányúak, az eredő mágneses momentum nulla (az anyag *antiferromágneses*), ha pedig váltakozó irányúak, de nagyságuk eltérő, az eredő mágneses momentum kisebb, de nullától különböző (az anyag *ferrimágneses*). Ezeknél az anyagoknál az M és H közötti összefüggés nem lineáris ($M \neq \chi H$), a mágneses szuszceptibilitás hőmérséklet-függése pedig *a Curie–Weiss-törvénynek* felel meg:

$\chi = C/(T \pm \theta_p)$.

A θ_p *kritikus hőmérséklet* a ferromágneses-paramágneses átalakulás hőmérséklete. Ha a hőmérséklet θ_p értékét meghaladja, az anyag másodrendű fázisátalakulással paramágnesessé válik: az atomi momentumok megmaradnak, de a domének mágnes rendeződése megszűnik.

A ferro- és ferrimágneses anyagok kritikus hőmérsékletének neve *Curie-hőmérséklet* (T_C), az antiferromágneses anyagoké *Neél-hőmérséklet* (T_N). Ferromágneses anyagokra nézve θ_p pozitív, ferri- és antiferromágneses anyagok esetében negatív. Az α-Fe_2O_3 (hematit) antiferromágneses, T_N = 960 K, a ferrimágneses γ-Fe_2O_3 (maghemit) pontosabban meg nem határozott Curie-hőmérséklete T_C = 863-948 K, a magnetit (Fe_3O_4) ferrimágneses, T_C = 860 K, a FeO antiferromágneses, T_N=198 K [23–25].

A mágneses szuszceptibilitás értéke *Gouy-* vagy *Faraday-mágnesmérleggel* határozható meg. A mágnesmérleg az F_x erőt méri, amellyel az m tömegű mintát az alkalmazott külső mágneses mező vonzza vagy taszítja.

Az M mágnesezettségű minta dV térfogatelemére inhomogén mágneses térben hatóF_x erő

$F_x = -dW/dx$,

W a mágneses kölcsönhatás energiája:

$$W = -m\chi \int_0^H H \, dH = -\tfrac{1}{2} m\chi H^2$$

$F_x = \tfrac{1}{2} m\chi(dH^2/dx) = m\chi H(dH/dx)$

Ha az elektromágnesen átfolyó áram állandó erősségű, és a minta kellően kis m tömegű, $H(dH/dx)$ jó közelítéssel állandó:

$H(dH/dx) = const$,

χ pedig az I áramerősséggel arányos:

$m\chi = kI$

k értéke meghatározható ismert minta (etalon) használatával, k ismeretében pedig χ kiszámítható a mérendő mintákra nézve .

2.2.1.2. Kísérleti meghatározások

A 77–300 K hőmérséklettartományban végzett kompenzációs mérésekhez Faraday-mágnesmérleget használtunk (egyensúlyi állapotban a mintára ható eredő F_x mágneses erő egyenlő a kompenzáló erővel). Az elektromágnes pólusai közé helyezett, két szálra függesztett, állítható hosszúságú kar egyik végére rögzített kvarc

mintatartó elmozdulását mértük: a kar másik végére rögzített tükör által visszavert fénynyaláb egy beosztásos skálára esett. A hőmérsékletmérés pontossága érdekében az alacsony hőmérséklet-tartományban Cu-konstantán, a magasabban Pt–Pt-Rh (10% Rh) bimetál hőmérőt használtunk, a feszültséget milivoltmérővel mértük. A mérleg érzékenységét diamágneses etalonokkal határoztuk meg. A pontos mérés érdekében a diamágneses ionokra és a mintatartóra korrekciót alkalmaztunk:

$$I_c = I_m - I_d$$

I_d az üres, I_m a feltöltött mintatartóval, mért áram erőssége.

A szuszceptibilitás a mérendő mintára k ismeretében számított χ érték, és az (etalont jellemző) χ_d szuszceptibilitás összege:

$$\chi_T = \chi + \chi_d$$

A χ_T^{-1}=f(T) függvény grafikus képe egy egyenes.

A Curie-állandó:

$$C = T_2 - T_1 / (1/\chi_{T2} - 1/\chi_{T1})$$

χ_{T1} és χ_{T2} a T_1 és T_2 hőmérséklethez tartozó szuszceptibilitás.

A moláris Curie-állandó:

$$C_M = CM$$

M az átlagolt móltömeg.

C_M segítségével kiszámítható a μ_{at} atomos mágneses momentum:

$$\mu_{at} = 2{,}827\ (C_M/a \cdot x)^{1/2}$$

a a mágneses ionok száma egy molekulában a minta összetételének megfelelő x moláris frakció értéknél (egy Fe_3O_4 egység két Fe^{2+} iont és egy Fe^{3+} iont tartalmaz).

A μ_{at} értékekből meg lehet határozni a minta kémiai összetételében levő mágneses ion(ok) töltését. Ha ugyanis a mágneses ionnak két töltésállapota lehet (Fe^{2+}, Fe^{3+}), az atomos mágneses momentum egyikre sem specifikus, hanem köztes értékű. A magnetit (Fe_3O_4) esetében a Fe^{2+} és Fe^{3+} ionok mólarányának megfelelően:

$$\mu_{at} = 5{,}26\mu_B,$$

mert

$$\mu_{at}^2 = x_{Fe2+}\,\mu_{Fe2+}^2 + x_{Fe3+}\,\mu_{Fe3+}^2$$

$$x_{Fe2+} = 2/3 \text{ és } x_{Fe3+} = 1/3$$

$$\mu_{Fe3+} = 5{,}92\mu_B \text{ és } \mu_{Fe2+} = 4{,}90\mu_B$$

μ_{at} a mért mágneses momentum, μ_{Fe2+} és μ_{Fe3+} a mágneses ionok elméleti mágneses momentuma a két töltésállapotban, x_{Fe2+} és x_{Fe3+} a mágneses ionok moláris frakciója az anyagban, $\mu_B = 9{,}274 \cdot 10^{-24}$ JT^{-1} pedig a Bohr-magneton.

E mérések segítségével meghatározható az anyag diamágneses, paramágneses, ferromágneses, ferrimágneses vagy antiferromágneses jellege. Mágneses anyagok esetében a mérések információt adnak a mágneses ion töltésére nézve, vagy ha az két töltésállapotban is jelen van, ezek móltörtként kifejezett koncentrációjáról a mintában.

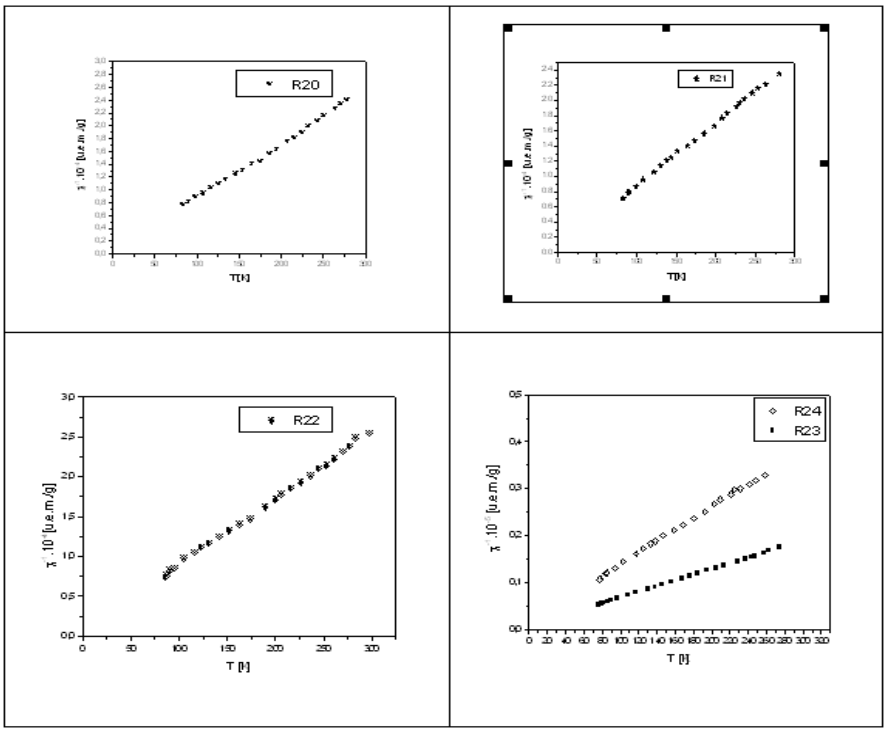
2.2.1.3. Eredmények

A mért mágneses szuszceptibilitás értékek változása az abszolút hőmérséklet reciprokának függvényében megfelel a Curie-törvénynek (**1. ábra**).

A fentebb ismertetett módon kiszámítottuk a Curie-állandót, ennek ismeretében a μ_{at} kísérleti atomos mágneses momentumot, majd figyelembe véve μ_{Fe3+} és μ_{Fe2+} értékeit, a Fe(II) és Fe(III) moláris frakcióját az üvegekben. Az eredményeket a **2. táblázat** tartalmazza.

2. táblázat. *A kísérletileg meghatározott Fe(II) és Fe(III) moláris frakciók.*

Üvegtípus	$-\Theta_p$	C_M	μ_{at}	x_{Fe3+}	x_{Fe2+}
R20	5	0.8819	5.49	0,48	0,52
R21	6	0.8897	5.44	0,56	0,44
R22	7	0.8784	5.41	0,54	0,46
R23	12	1.3307	5.76	0,62	0,38
R24	13.5	0.5413	5.2	0,42	0,58



1. ábra. χ_T *változása (1/T) függvényében.*

A Fe két különböző oxidációs állapotának megfelelő moláris frakció értékek az R20, R21 és R22 üvegek esetében megfelelnek az elvárásoknak. Megállapítható ugyanakkor, hogy az üvegolvadékban beálló redox egyensúly függ a SiO_2/B_2O_3 aránytól.

Az R24 minta esetében az eredmény az olvasztási körülményekkel magyarázható: a levegő jelenlétében történő olvasztás során (3 óra 1450 ^oC-on) a Fe(II) könnyen oxidálódhat. Annak magyarázata, hogy hasonló olvasztási körülmények között az R23 minta kezdeti Fe_2O_3 tartalma jelentős mértékben redukálódott, valószínűleg a magas hőmérsékleten termodinamikailag kedvezményezett Fe(II) állapot. A redox reakció során a Fe_2O_3 részben redukálódik, mivel azonban a felszabaduló O_2 gáz távozik a rendszerből, a lehűlés ideje alatt a visszaoxidálódás nem következik be: a magas hőmérsékletű redox egyensúly az üveg kiöntésekor „belefagy” az anyagba.

2.2.2. FT-IR mérések

2.2.2.1. Kísérleti körülmények

Az FT-IR spektrumokat FTIR JASCO 6100 spektrométerrel vettük fel, standard KBr pasztillákon, 2 cm^{-1} felbontással, a 4000 – 400 cm^{-1} közötti IR tartományban. Az adatfeldolgozáshoz (spektrumábrázolás, dekonvolúció) Origin 8 programot használtunk.

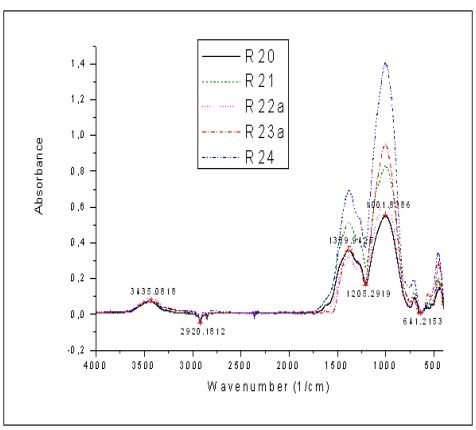
2.2.2.2. Eredmények

A rendezetlen anyagi rendszerek IR spektrumában a szerkezeti egységek egymáshoz közel eső, egymást átfedő abszorpciós maximumai nehezen értékelhető széles abszorpciós sávokat generálnak

(konvolúció). A boroszilikát és alumino-boroszilikát üvegek esetében jelentős a BO_3, B_2O_6 (boroxol gyűrű), BO_4, SiO_4 egységek rezgési módusainak megfelelő IR abszorpciók átfedése. Az FTIR spektrumok analízisére alkalmazott Fourier-dekonvolúciós eljárás segítségével (*dekonvolúció*: a konvoluált széles sávok komponensekre bontása) a sávszélességek csökkenthetők, az egymáshoz közel eső, eredetileg részleges vagy teljes átfedésben levő spektrumvonalak különválaszthatók, a felbontás javul. A dekonvoluált spektrum minősége természetesen függ a mért spektrum minőségétől. A dekonvolúciós adatok felhasználásával szimulált IR spektrumgörbe jó illeszkedés esetén ($R^2 \geq 0.995$ hibahatár felett) teljesen ráfekszik a kísérleti görbére [26–28].

A vizsgált üvegeken felvett FT-IR spektrumok a **2. ábrán** láthatók.

A felületükön erősen kristályosodó R22 és R23 üvegek esetében az esetleges szerkezeti különbségek megállapításának érdekében felvettük mind a belső (üveges), mind a külső (kristályos) fázis (R22a és R22b, illetve R23a és R23b) spektrumát (a teljes FT-IR spektrumokat bemutató **2. ábrán** csak az R22a és R23a üveges fázisok spektruma jelenik meg).



2. ábra. *A vizsgált üvegek FT-IR spektruma.*

A teljes spektrumokon megjelenő elnyelési sávok alapján, *dekonvolúciós analízis hiányában* a következő általános hozzárendelések tehetők: [29-31]

- 3435 cm^{-1} O–H
- 1600 cm^{-1} O–H
- 1390 cm^{-1} trigonális BO_3
- 1205 cm^{-1} B^3–O(B^3) csoportok
- 1000 cm^{-1} körül (a nagy intenzitású, domináns abszorpciós sáv) a tetraéderes, lineárisan kapcsolódó BO_4 és SiO_4 egységek szimmetrikus és aszimmetrikus B–O–B; Si–O–Si; O–Si–O; B–O–Si vegyértékrezgései és deformációs rezgései
- 641 cm^{-1} tetraborát
- 778 cm^{-1} boroxol gyűrű „lélegzése”
- 460-470 cm^{-1} különálló BO_4 egységek vegyértékrezgései.

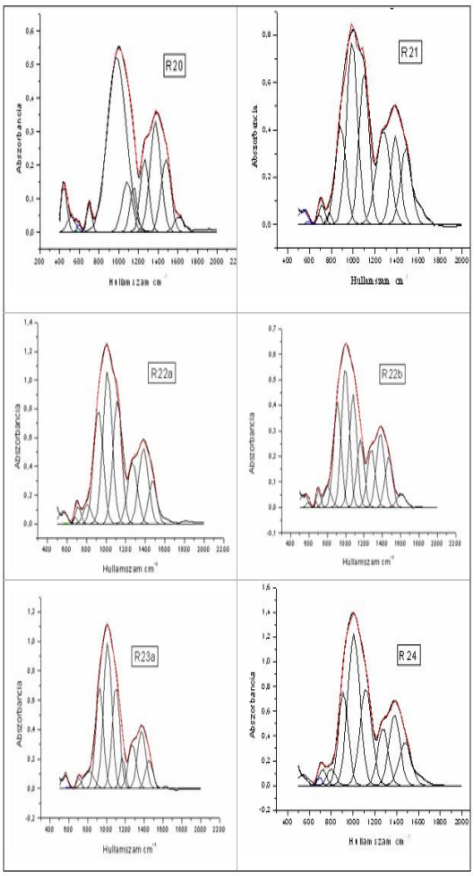
Mivel a boroszilikát és alumino-boroszilikát üvegek legfontosabb IR elnyelési spektrumtartománya a 1500–400 cm^{-1} közötti, az FT-IR spektrumok dekonvolúcióját ebben a hullámszám-tartományban végeztük el. A dekonvolúciós analízis eredményei a **3. ábrán** láthatók. A felületükön kristályosodó minták kristályos és üveges fázisának szerkezeti különbözőségéről az R22a és R22b spektrumok dekonvolúciós adatainak összehasonlításával nyerhetünk képet.

A felbontás következtében láthatóvá vált abszorpciós frekvenciákat és a megfelelő hozzárendeléseket a **3. táblázat** tartalmazza (a táblázatban csak az R22 és R23 minták üveges fázisára vonatkozó adatok jelenítettük meg).

Az 550 cm^{-1} körül minden minta spektrumában jelentkező elnyelési sáv részben a rácsszerkezet deformációs rezgéseinek, részben a vizsgált üvegek által tartalmazott FeO_4 csoportoknak (Fe^{2+}) tulajdonítható. A 690–710 cm^{-1} tartományban, illetve a 920 cm^{-1}-nél megjelenő sávok elsősorban a híd helyzetű O atomok deformációs rezgéseinek feleltethetők meg (Si–O–Si, B–O–B,

Si–O–B). 1010 cm^{-1} körül jelentkeznek a rácsban kapcsolódó SiO_4 és BO_4 egységek aszimmetrikus vegyértékrezgéseinek megfelelő sávok. Az 1270–1275, 1375–1390 és 1480 cm^{-1} körüli abszorbció főleg a különféle borátcsoportokat összekapcsoló, híd helyzetű B–O vegyértékrezgéseitől származik.

Az R22a – R22b és R23a – R23b minták spektrumfeldolgozásából származó adatokat a **4. táblázat**ban foglaltuk össze.



3. ábra. *Az FT-IR spektrumok dekonvolúciója az 1500–400 cm^{-1} közötti tartományban (R20-R24; az R22 minta esetében az ábrán látható az R22a üveges és R22b kristályos fázis spektrumfelbontása is).*

3. táblázat. *Az R20-R24 üvegek FT-IR spektrumának dekonvolúciója során megjelenő abszorpciós sávok és a megfelelő hozzárendelések (ν, δ: vegyértékrezgés, deformációs rezgés, A: görbe alatti terület, a sávintenzitást jellemzi)*

R20		R21		R22a		R23a		R24		Hozzárendelés	
$SiO_2<B_2O_3$ Fe^{3+}: Fe^{2+} 1:1		$SiO_2>B_2O_3$ Fe^{3+}: Fe^{2+} 1:1		$SiO_2>>B_2O_3$ Fe^{3+}: Fe^{2+} 1:1		$SiO_2>>B_2O_3$ Fe^{2+}		$SiO_2>>B_2O_3$ Fe^{2+}			
$R^2 = 0.998$		$R^2 = 0.992$		$R^2 = 0.996$		$R^2 = 0.998$		$R^2 = 0,999$		Szilikát csoportok	Borát csoportok
cm^{-1}	A	cm^{-1}	A	cm^{-1}	A	cm^{-1}	A	cm^{-1}	A		
443	9,5									Si-O-Si (δ)	
510	3,8										Fe^{2+}
571	0,4	540	6,3	560	9,1	555	7,8	545	10,7	gyűrűs szerk	
		689	2,1	685	2,2	686	0,3	694	3,2		B-O-B (δ)
703	5,5	714	5,9	712	8,7	707	4,2	721	11,4		B-O-B (ν, δ)
		781	2,8	807	13,9	810	17,1	801	13,0	Si-O-[NB] (δ)	boroxol
930	66,5	885	50,1	920	96,3	927	69,2	912	86,2	Si-O-[NB], Q0	B-O-B (δ)
1034	49,3	990	97,0	1014	125,4	1012	105,9	1008	169,0	Si-O-[NB]	B-O-Si (ν)
1127	32,1	1100	73,3	1115	97,2	1100	70,3	1120	107,3	Si-O-[NB]	B^4-O-B^4 (ν)
						1169	14,6			Si-O-[NB], Q3'	B^4-O(B^3)
1270	31,0	1275	64,3	1270	53,4	1273	32,0	1275	55,3		B^3-O(B^3) (ν)
1381	39,5	1389	41,9	1382	64,3	1373	43,0	1381	72,1		B'-O(B') (ν)
1482	26,3	1486	40,5	1475	30,8	1453	18,5	1480	48,5		B'-O(B') (ν)

4. táblázat. *Hasonlóságok és különbségek az R22 és R23 minták üveges és kristályos fázisának IR elnyelése esetében (A arányos a sávintenzitással)*

R22a		R22b		R23a		R23b	
belső, üveges		külső, kristályos		belső, üveges		külső, kristályos	
$SiO_2>>B_2O_3$ Fe^{3+}: Fe^{2+} = 1:1				$SiO_2>>B_2O_3$ Fe^{3+}			
cm^{-1}	A	cm^{-1}	A	cm^{-1}	A	cm^{-1}	A
						525	6,5
560	9,1	540	5,2	555	7,8	564	1,3
592	0,2	591	1,0	590	0,5	580	3,0
685	2,2	680	0,7	686	0,3	698	0,5
712	8,7	703	3,7	707	4,2	705	3,2
807	13,9	800	8,7	810	17,1	778	7,0
920	96,3	910	41,6	927	69,2	907	62,0
1014	125,4	996	57,7	1012	105,9	1011	115,3
1115	97,2	1080	45,5	1100	70,3	1123	66,0
		1160	26,8	1169	14,6		
1270	53,4	1278	24,4	1273	32,0	1277	25,6
1382	64,3	1379	32,0	1373	43,0	1374	38,6
1475	30,8	1470	19,9	1453	18,5	1457	17,5
		1604	6,3				
$R^2 = 0.996$		$R^2 = 0.998$		$R^2 = 0.998$		$R^2 = 0,999$	

Mint a **4. táblázat** adataiból kitűnik, az azonos elemi összetételű, de eltérő rendezettségű szerkezettel rendelkező fázisok IR spektrumában a jelentősebb elnyelési sávok gyakorlatilag azonos frekvenciáknál (vagy csak kissé eltolódva) jelentkeznek, a szer-

kezeti különbségek következtében azonban a sávintenzitások elég nagymértékben különbözhetnek. Ennek pontosabb jellemzésére a röntgen-pordiffrakciós adatok (mikroszerkezeti szempontból való) feldolgozása adhat lehetőséget.

2.2.3. Röntgen pordiffraktometria és optikai mikroszkópia

2.2.3.1. Kísérleti körülmények

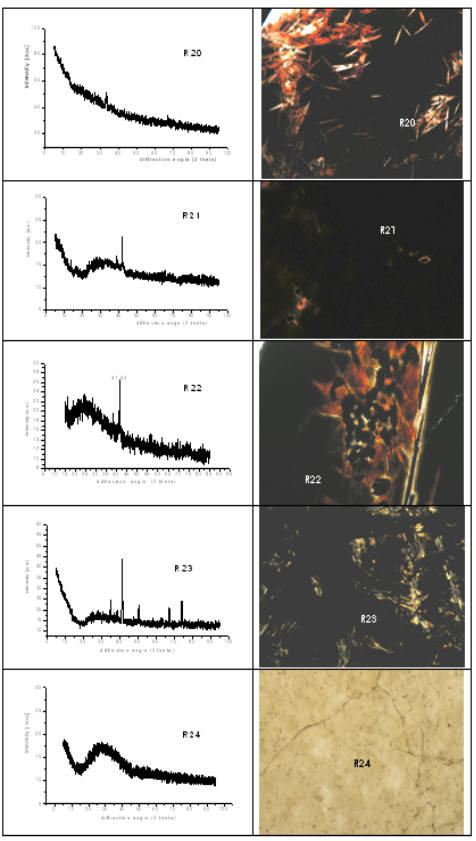
Az egyenletes vastagságú vékony rétegben a mintatartó felületére rögzített, keményacél golyósmalomban finom porrá őrölt minták XRD vizsgálatához standard Bruker D8 Advance diffraktométert használtunk, a következő műszaki paraméterek mellett: monokromatikus koherens Cu-K_α beeső sugárnyaláb, mérési tartomány: 2θ = 5–90º, $\Delta 2\theta = 0.01$º, sugárforrás: 45 kV-on 45 mA árammal fűtött Cu anódos röntgencső, Ni monokromátor, Soller rések, spektráltiszta α-Al_2O_3 belső standard. A detektálható kristályfázisok meghatározása a MATCH! pordiffrakciós fázisazonosító programmal történt, az IUCr/COD/AMCSD referencia adatbázis adatainak felhasználásával [32].

A minták 30 μm vastagságú vékonycsiszolatáról 100×, 200× és 400× nagyítással készült mikroszkópos képeket digitális kamerával ellátott Olympus BX 41 típusú mikroszkóppal vettük fel, transzmissziós üzemmódban, polarizáció nélkül.

2.2.2.1. Eredmények

Az R20–R24 mintán felvett röntgendiffraktogramokat és az ezekhez társított mikrofotókat a **4. ábrá**n mutatjuk be, a kivált kristályos fázisokra vonatkozó XRD adatatokat az **5. táblázat**ban foglaltuk összse. R22 és R23 esetében mindkét helyen csak az üveges fázisra vonatkozó eredményeket jelenítettük meg.

A mikrofelvételek alapján a vizsgált üvegek mindegyike kristályosodik (legnagyobb mértékben a kiinduló oxidkeverékében kizárólag Fe_2O_3 adalékot tartalmazó R23, legkevésbé a FeO adalékolt R24). A kristályos fázis XRD módszerrel azonosított fő komponense a tűszerű kristályokként megjelenő hematit. A kutatás által célzott magnetitet nagyobb mennyiségben csak az R22 mintában detektáltuk. Az R24 minta üveges szerkezetében a diffraktogramon meg sem jelenő, egyenletes eloszlású (egyelőre azonosítatlan) nanokristályos fázis mellett feltehetően egy láncszilikát látható.



4. ábra. *Az üvegek röntgendiffraktogramja és 200× nagyítású mikrofotója*

Az optikai mikroszkópos vizsgálat eredményei megerősítik, jól kiegészítik a röntgendiffrakciós adatokat.

Diffraktogramja alapján az *R20* minta csaknem teljesen üveges, alig kristályoso-

dott, az azonosítható kristályos fázis a tűszerű krisztallitokként megjelenő kvarc, kvarcit.

Az *R21* szerkezete csaknem teljesen rendezetlen, a jellegzetes üveges fázis jól láthatóan domináns. A kiinduló oxidkeverék összetétele közel áll az R20 mintáéhoz, a SiO_2 mennyiségének a B_2O_3 számlájára való kismértékű növelése következtében azonban az olvadék dermedése során kristályos fáziselválás lép fel. Mint az optikai mikroszkópos vizsgálat mutatja, a kivált hematit koncentrációja nem túl jelentős, krisztallitmérete viszonylag nagy.

Az. *R22* minta az előbbi mintáknál valamivel kristályosabb. A minta összetételében a B_2O_3 hátrányára tovább növelve a SiO_2 mennyiséget, a hematit mellett kristályos fázisként valamennyivel jelentősebb mennyiségben megjelenik a magnetit. A krisztallitok mérete ez esetben is túl nagy. A viszonylag zajos diffraktogram oka valószínűleg a méréshez használt minta szűkös mennyisége.

5. táblázat. *Az R20-R24 minták XRD adatai*

Minta	2θ (fok)	d (Å)	I (a.u.)	Azonosított ásványfázis
R20	33.42	3.11	–	kvarc (SiO_2)
	67.22	1.62	–	
R21	41.73	2.51	–	magnetit ($Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$)
	38.75	2.70	–	hematit (α-Fe_2O_3)
R22	38.36	2.72	19	hematit
	41.52	2.52	27	magnetit ($Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$)
	73.85	1.49	14	magnetit (Fe_3O_4)
R23	35.00	2.98	25	magnetit
	38.75	2.70	19	hematit
	41.35	2.53	40	magnetit
	50.40	2.10	22	magnetit
	62.80	1.72	16	magnetit
	63.70	1.70	15	magnetit
	67.15	1.62	20	kvarc
	74.10	1.48	22	magnetit
R24	a diffraktogramon kristályos fázis nem detektálható			

Az *R23* minta kiinduló oxidkeveréke adalékként csak Fe(III)-oxidot tartalmazott. Az olvasztás körülményei között az olvasztási hőmérsékleten beálló redox egyensúlynak megfelelően a Fe^{3+} csaknem felerészben redukálódott. A keletkezett, erősen kristályos üveg domináns kristályfázisa a magnetit, mellette kevés hematittal.

Mikrofotói alapján az R24 minta nanokristályos, diffraktogramja alapján azonban tisztán üveges szerkezetű. Az eltérés magyarázata a krisztallitok nagyon kis átlagos mérete és alacsony koncentrációszintje (az XRD mérések érzékenysége 1…3 %). A kristályos fázis összetételéről rgyelőre nincseknek adataink.

2. Következtetések

Az oxidüvegek esetében az időtállóságot, a gyakorlatban való alkalmazhatóságot elsősorban a szerkezeti, termikus és hidrolitikus stabilitás határozza meg. A felsorolt jellemzők szoros összefüggésben vannak az üvegösszetétel és üvegszerkezet homogénségével és a kristályosodási hajlammal. A mágneses üvegek esetében emellett elsődlegesen fontos az üvegmátrixban kiváló, a mágneses tulajdonságokat biztosító krisztallitok egyenletes eloszlása és átlagos mérete. Ez utóbbira nézve meghatározó lehet az üveghez adalékolt átmeneti fémek oxidációs állapota, amely a fémionok koordinációs környezete révén közvetlenül befolyásolja a szerkezetet és a kristálykiválást [33,34]. A jelen esetben az üvegszerkezet jelentősen függ az üveg összetételében levő vas oxidációs állapotától és az ezáltal meghatározott lokális koordinációtól.

Az itt bemutatott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a dolgozatban tárgyalt üvegek szerkezeti és kristályosodási jellemzőinek változása többnyire az elvárt módon követi a szakirodalmi adatoknak megfelelő trendet.

A mágneses szuszceptibilitás adatok alapján megállapítható ugyanakkor, hogy az olvasztás során beálló Fe(II)-Fe(III) egyensúlyt nem csak a Fe koncentráció és a kezdeti Fe_2O_3/FeO arány, hanem a fő rácsképző oxidok (SiO_2, B_2O_3) kezdeti mennyiségének aránya is erősen befolyásolja.

Az FT-IR és az optikai mikroszkópos vizsgálat által is alátámasztott XRD adatok szerint a kiinduló oxidösszetétel változásának befolyása az üvegek devitrifikációjára, lokális szerkezetére (és általában véve a szerkezeti rendezettségre) általában megfelel az irodalmi adatok alapján várhatónak [35–37].

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Divya, P.V., Kumar, V.: *Crystallization Studies and Properties of $(Ba_{1-x}Sr_x)TiO_3$ in Borosilicate Glass*. Journal of the American Ceramic Society, 90(2), 2007, 472–476.

[2] Kumar, D. és mások: *Preparation and Dielectric Characterization of Ferroelectric $(Pb_xSr_{1-x})TiO_3$ Glass Ceramics Doped with La_2O_3*, Applied Physics Letters, 89(11), 2006, 12908–12910.

[3] Yadav, A. és mások: *Crystallization Kinematics and Dielectric Behavior of $(Ba,Sr)TiO_3$ Borosilicate Glass Ceramics*. New Journal of Glass and Ceramics, 2(3), 2012, 126–131.

[4] Senthil Murugan, G. és mások: *Nonlinear-optic and ferroelectric behavior of lithium borate–strontium bismuth tantalate glass–ceramic composite*. Applied Physics Letters, 78(25), 2001, 4019–4021.

[5] Yao, K. és mások: *Effects of glass elements on the structural evolution of in situ grown ferroelectric perovskite crystals in sol-gel derived glass-ceramics*. Journal of materials research, 12(4), 1997, 1131–1140.

[6] Kaewkhao, J. és mások: *Structural and magnetic properties of glass doped with iron oxide*. Journal of Physics: Conference Series 266(1), 2011, 012012, 5 pp.

[7] Abdel-Hameed, S.A. és mások: *Preparation and Characterization of Magnetic Glass Ceramics Derived from Iron Oxides Bearing Rolling Mill Scales Wastes*. Nano Research & Applications, 1(6), 2015, 1–11.

[8] Malakhovskii, A.V. és mások: *Magnetic and magneto-optical properties of oxide glasses containing Pr^{3+}, Dy^{3+} and Nd^{3+} ions*. Journal of magnetism and magnetic materials, 263(1), 2003, 161–172.

[9] Pop, L. és mások: *Magnetic Behaviour of Some Oxide Glasses Doped With Rare Earth Ions*. In *AIP Conference Proceedings,* S. Ali Cetin and I. Hikmet eds., 899(1), 2007, 591.

[10] Haro-González, P. és mások: *Characterization of Er^{3+} and Nd^{3+} doped Strontium Barium Niobate glass ceramic as temperature sensors*. Optical Materials 33(5), 2011, 742–745.

[11] Singh, D. és mások: *Optical and structural properties of $ZnO–PbO–B_2O_3$ and $ZnO–PbO–B_2O_3–SiO_2$ glasses*. Journal of Physics: Condensed Matter, 20(7), 2008, 075228, 6 pp.

[12] Balu, L. és mások: Effect of ZnO on Physical, Structural and Mechanical Properties of B_2O_3 – Na_2O – ZnO Glasses, *IOSR Journal of Applied Physics*, 8(6), 2016, 140–146.

[13] Bahra, N.H. és mások: *Effect of Different Concentrations of Doped Rare Earth Element on Borate–Silica Oxide Glass Structure*. Journal of Optoelectronics and Biomedical Materials, 7(2), 2015**,** 47–52.

[14] Sasmal, N. és mások: *Influence of Ce, Nd, Sm and Gd oxides on the properties of alkaline-earth borosilicate glass sealant*. Journal of Asian Ceramic Societies, 4(1), 2016**,** 29–38.

[15] Coey, J.M.D. és mások: *Introduction to magnetic oxides*. In *Functional Metal Oxides: New Science and Novel Applications*, Ogale, S.B., Venkatesan, T.V., Blamire, M.G., Eds., Wiley-VCH Publ., 2013, 1–49.

[16] Schüppel, W. és mások: *Magnetic Oxide Particles Prepared by Glass Crystallization. In Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers*. In *Scientific and Clinical Applications of Magnetic Carriers*, Häfeli,U., Schütt, W., Teller, J., Zborowski, M., Eds., Springer US, 1997, 109–115.

[17] Edelman, I. Kliava, J.: *Oxide glasses with magnetic nanoparticles: transparent magnets (Faraday rotation and electron magnetic resonance studies)*. physica status solidi (b), 246(10), 2009, 2216–2231.

[18] Winterstein, A. és mások: *Magnetic and magneto-optical quenching in (Mn^{2+}, Sr^{2+}) metaphosphate glasses*. Optical Materials Express, 3(2), 2013**,** 184–193.

[19] Romero-Perez, M. és mások: "Magnetic properties of glasses with high iron oxide content", *Materials research bulletin*, 36(7), 2001, 1513–1520.

[20] Atkins, P. de Paula, J.: *Mechanical, electrical and magnetic properties of solids, , Magnetic properties*, In *Atkins' Physical Chemistry*, 10th Ed., Oxford University Press, 2014, 768–771.

[21] Preuss, K.: *How do we measure magnetic properties? Instrumentation and techniques*. http://www.chemistry.uoguelph.ca/educmat/chm710/, 7.4., 2015, 6pp.

[22] https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_4/advanced/t4_1_3.html.

[23] Zhang, P. és mások: *Magnetic properties of FeO: a DFT+DMFT study*, In *APS March Meeting 2014*, Abstract #G54.014, 2014APS.MARG54014Z.

[24] https://magwiki.wikispaces.com/Maghemite

[25] https://magwiki.wikispaces.com/Magnetite

[26] Griffiths, P.R. és mások: *Curve Fitting and Fourier Self-Deconvolution for the Quantitative Representation of Complex Spectra*. In Computer-enhanced Analytical Spectroscopy, Meuzelaar, H.L.C., Isenhour, T.L., Eds., Plenum Press: New York, 1989, 29–54.

[27] Barth, A.: *Fine-structure enhancement — assessment of a simple method to resolve overlapping bands in spectra*. Spectrochimica Acta A 56(6), 2000, 1223–1232.

[28] Gautam, C. és mások: *A Review on Infrared Spectroscopy of Borate Glasses with Effects of Different Additives*. ISRN Ceramics, 2012, Article ID 428497, 17 pp.

[29] Yahya, G.A.: *Studies on Some Lithium-Borate Glasses Containing Iron and Copper*. Turkish Journal of Physics, 27, 2003, 255–262.

[30] Silim, H.A.: *Composition Effect on Some Physical Properties and FTIR Spectra of Alumino–Borate Glasses Containing Lithium, Sodium, Potassium and Barium Oxides*. Egyptian. Journal of Solids, 29(2), 2006, 293–302.

[31] Azooz, M.A. és mások: *Characterization of bioactivity in transition metal doped-borosilicate glasses by infrared reflection and dielectric studies***.** Indian Journal of Pure and Applied Physics, 46(12), 2008, 880–888.

[32] http://www.crystalimpact.com/match/.

[33] Rose, P.B. és mások: *Crystallisation within simulated high level waste borositicate glass*. In *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVIII*, Hanchar, J.M., Stroes-Gascoyne, S., Browning, L., Eds., Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol. 824, MRS Warrendale PA, USA, 2004, 321–326.

[34] Mishra, R.K. és mások: *Structural aspects of barium borosilicate glasses containing thorium and uranium oxides*. Nuclear Materials, 359(12), 2006, 132–138.

[35] Sandu, V. és mások: *Nanostructured Ferrite Formation in Borosilicate Glass*. In *Multi-Functional Materials and Structures II*, Yin, Y., Wang, X., Eds., Trans Tech Publications, Switzerland, Advanced Materials Research Vol. 79–82, 2009, 445–448.

[36] Harizanova, R. és mások: *Phase Separation and Crystallisation in High Iron Containing Borosilicate Glasses*. In *Functional Properties of Nanostructured Materials*, R. Kassing, P. Petkov, W. Kulisch, C. Popov, Eds., Springer, Dordrecht, Nato Science Series, Vol. 223, 2006, 169–172.

[37] Harizanova, R. és mások: *Microstructures formed during devitrification of $Na_2O.Al_2O_3.B_2O_3.SiO_2.Fe_2O_3$ glasses*. Journal of Materials Science, 45(5), 2010, 1350–1353.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 51–62. 05
http://hdl.handle.net/10598/30086

FÁS SZÁRÚ BIOMASSZÁK PIROLÍZISÉNEK TERMOKINETIKAI MODELLEZÉSE

THERMOKINETIC MODELLING OF WOOD BIOMASS PYROLYSIS

Bodnár István[1], Plásztán Bence[2]

[1] *Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet, Magyarország, 3515 Miskolc-Egyetemváros; Tel: +36 46 565 142, vegybod@uni-miskolc.hu*

[2] *Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék, Magyarország, 3515 Miskolc-Egyetemváros; Tel: +36 46 565 168, bence.plasztan@gmail.com*

Abstract
The optimal parameters of the Pyrolysis Technology have been investigated. During the thermokinetic modelling of the procedure pyrolysis of different biomasses with chemical composition have been analysed. The modelling has been executed with different wood biomass at different percentages of moisture. On the basis of the wood's chemical composition and of the reaction equation we have made an approximate model, which helps to specify the resulting pyrolysis gas' chemical composition and the energetic properties. The results have been compared with the required reaction efficiency and with the energy generation.

Keywords: *biomass, pyrolysis, efficiency, modelling*

Összefoglalás
A pirolízistechnológia optimális üzemi paramétereit keressük. A folyamatok termokinetikai modellezése során eltérő kémiai összetételű biomasszák pirolízisét vizsgáltuk. A modellezést különböző hőmérsékleteken, a nedvességtartalom mértékének figyelembevételével végeztük. Egységnyi faanyag pirolízise során keletkezett gázok energetikai tulajdonságait határoztuk meg, és összevetettük a reakcióhoz szükséges energiaigénnyel.

Kulcsszavak: *biomassza, pirolízis, hatékonyság, modellezés*

1. Bevezetés

A fás szárú biomasszák hasznosítása egyidős az emberiség történelmével. Az emberiség létezése óta arra törekedett, hogy számára hasznossá tegye a természet által rendelkezésre bocsátott energiaforrásokat. Kezdetben szinte kizárólag megújuló energiaforrásokat alkalmaztunk, mint a biomassza, a víz, a szél és a napenergia. Az ipari forradalom idején a kőszéntelepek felfedezése, a XIX. század második felétől kezdődően a kőolaj- és a földgázlelőhelyek feltárása kiszorította a megújuló energiaforrásokat az energiaiparban, amelyek jellemzően a XX. században kerültek újra előtérbe. A megújulóenergia-források közül kiemelkedő a biomassza, amely folyamatos

erőmű-üzemeltetést tesz lehetővé a szakaszos napenergián és szélenergián alapuló, ingadozó teljesítményű rendszerekhez képest.

A biomassza alapú energiatermelés, tehát a korszerű biomasszatüzelés az elmúlt években egyre népszerűbbé vált. Ennek oka egyrészt a hagyományos, fosszilis alapú tüzelőanyagok viszonylag magas ára és mennyiségi korlátja, másrészt a környezettudatosság; valamint a fenntartható energiatermelés és -fogyasztás mint alapelv megjelenésére vezethető vissza.

A világ favagyona megközelítőleg 300 milliárd köbméterre tehető. Ebből évente átlagosan 3-4 milliárd köbméter kerül kitermelésre, aminek az egyik fele ipari, a másik fele pedig kémiai (rostanyag) és energetikai (tüzelőanyag) hasznosításra kerül [18]. Magyarország területének közel 20%-át erdő fedi, Európát tekintve ez az arány 45%. Hazánk 1,9 millió hektár erdőterületének faállománya mintegy 330 millió m^3-re tehető. Évente közel 11 millió m^3 a fanövekmény (folyónövedék), ami átlagosan 30 éves megújulási ciklusidőt jelent. Az éves energiahozam 160 PJ. Erdőink nagyobb részét, körülbelül 86%-át lombhullató fák képezik, akác (több mint 50%), cser, tölgyek, bükk, gyertyán, fenyő és egyéb lombos fák. Ennek megfelelően a hazai biomasszapotenciál 328 PJ-ra tehető, amiből jelenleg 49,2 PJ kerül hasznosításra, ez 15%-os hasznosítási arányt jelent [18].

Az energiatermelésre hasznosítható faanyag (energiafa) a kitermelt lombos fáknak a felét, a fenyőknek alig a 20%-át teszi ki. Az évente kitermelhető energiafa 4-4,5 millió m^3-re becsülhető. A száraz fa fűtőértéke 17-20 MJ/kg. Ezen számok alapján a hazai erdők évi energiafa-potenciálja 56 PJ-re becsülhető [18]. A biomassza a benne rejlő lehetőségnek köszönhetően a terület- és a településfejlesztésben, valamint a kistérségek munkahelyteremtésében kiemelt szerepet játszhat, ami ezáltal szerves részét képezheti a közmunkaprogramnak. A biomasszán alapuló fejlesztések lehetőséget adnak továbbá „falufűtőművek” és villamos erőművek létesítésére, amik nemcsak zöldenergiát termelnek, hanem bevételi forrást jelenthetnek a települések számára.

Mindazonáltal nem szabad elfelejteni, hogy a biomassza egy olyan megújuló energiaforrás, amely véges kapacitással áll a rendelkezésünkre, ezért a megújítható energiaforrás megnevezés lenne a helytálló. Túlzott kiaknázása a környezet elhasználódásához vezet, ami azt jelenti, hogy már a megújuló energiaforrások sem képesek újratermelődni, mert a fogyasztási folyamat gyorsabb, mint azok megújulási ciklusideje. Ebből következik, hogy elsősorban az erdészeti és a faipari feldolgozás során keletkező melléktermékek, hulladékok termikus hasznosításában célszerű gondolkozni és alternatív tüzeléstechnikákat alkalmazni.

2. Pirolízis

A pirolízis a szerves anyagok hőbontásán alapuló folyamat, ami jellemzően az oxigén teljes kizárása mellett játszódik le. Mivel a biomasszában az oxigén kémiailag jelen van, ezért kezelése során nem beszélhetünk tökéletes pirolízisről. Szerves hulladékok kezelése egy arra a célra megfelelően kialakított, rendszerint nyomás vagy vákuum alatt lévő, hő hatására bekövetkező kémiai bomlással történő átalakítást jelent [1]. A kezelés során gáz halmazállapotú energiahordozó szabadul fel, amit pirolízisgáznak vagy pirogáznak nevezünk.

A pirogáz döntően szén-monoxidban és hidrogénben, valamint metánban gazdag gázelegy, amelynek fűtőértéke megközelítheti a földgáz fűtőértékét az energetikailag inert összetevők leválasztását követően. Az energetikailag inert összetevőket főleg a szén-dioxid, a vízgőz és esetekben a nitrogén teszi ki, amelyek leválasztása körülményes. A gáztermékben előfordulhatnak fémgőzök, por, és szervetlen vegyületek, amelyek jó hatásfokkal leválaszthatók [2].

A gáztermék erőművi hasznosítása elsősorban gázmotoros rendszerekben célszerű, amely így alkalmassá teheti a földgáz üzemű erőművek kiváltását [3].

Szilárd fázisban pirolíziskoksz, röviden pirokoksz marad vissza, amiben a betáplált alapanyag karbon tartalma feldúsul [4]. Az így előállított energiahordozó a vaskohászatban, a cementgyártásban, valamint a széntüzelésű erőművekben alkalmazható kőszén kiváltására. Nehéz- és könnyűfémekkel szennyezett hulladék esetében a fémek rendszerint szilárd fázisban maradnak vissza, így azok visszanyerésére további kezelésnek vetik alá a pirokokszot [5].

Folyékony fázisban úgynevezett pirolízisolaj, piroolaj keletkezik, amely szén-hidrogéneket és kátrányt tartalmaz [4]. A klasszikus pirolízis hőmérséklet-tartományában (> 600 °C) a folyadékfázis keletkezése csekély valószínűségű. Megfelelő tisztítást és lepárlást követően akár különféle üzemanyagok is gyárthatók belőle, így a közlekedésben is alkalmazható haszontermékek állíthatók elő [6]. A keletkező termékek arányát az alkalmazott hőmérséklet, az alapanyag nedvességtartalma, valamint a kezelési idő jelentősen befolyásolja [5]. A nagyobb hőmérséklet és nedvességtartalom, valamint a hosszabb kezelési idő kedvez a gázhozamnak, mivel megnöveli a szénláncok elbomlásának valószínűségét. Emellett az sem elhanyagolható, hogy a kezelési idő növekedésével a kokszolódás mértéke is megnő, ami káros a folyamatokra nézve. [7].

A pirolízis a hagyományos égetéshez hasonlóan a termikus kezelési eljárások közé tartozik, de alapjában véve két különböző folyamatról beszélünk. Az égetéshez három lényeges dolog szükséges, ami az éghető anyag, az oxidálóanyag és a megfelelő égéstéri hőmérséklet. Ezzel ellentétben a pirolízis során csak éghető anyagra és hőre van szükség [8].

A gyakorlatban nem beszélhetünk tökéletes pirolízisről, mert maga a tüzelőanyag is tartalmaz valamekkora mértékben oxigént, így szén-monoxid, szén-dioxid, vízgőz valamint kén- és nitrogén-oxidok is keletkeznek [4]. További eltérés, hogy az égés hőtermelő, tehát exoterm folyamat, míg a pirolízis endoterm, azaz fenntartásához hőt igényel, amit rendszerint villamos fűtéssel visznek a rendszerbe, de alkalmazható közvetlen vagy köpenyfűtés is a felszabaduló forró pirolízisgáz visszacirkuláltatásával.

A joggyakorlatban a pirolízis, ahogy a többi alternatív termikus technológia, nem különbözik a hagyományos égetéstől, de műszaki értelemben egyik üzem sem tekinthető hagyományos égető rendszernek, mert különböző kémiai folyamatok játszódnak le az egyes technológiáknál. Az alternatív technológiák társadalmi megítélése, a környezeti és gazdasági hatásai mégis azonosak, mint a hagyományos hulladékégetőknek [2].

A pirolízis egy olyan gyűjtőfogalom, amely több technológiát is magába foglal. Az egészen kis hőmérsékletű (<300 °C) eljárás, mint a pörkölés (torrefaction) legfőbb célja a tüzelőanyagban lévő illékony vegyületek eltávolítása és a nedvességtartalom csökkentése, így a visszamaradó szilárd termék energiasűrűségének növelése. A szintén kis hőmérsékletű, 410−450 °C közötti hőmérséklettartományban alkalmazott krakkolással üzemanyagok állíthatók elő.

A kokszosítás, más nevén a svélezés cél-ja a pörköléshez hasonlóan olyan szilárd végtermék előállítása, amelyben a karbon feldúsul. A folyamat során felszabaduló gáztermék elégetésével a technológia energiaigénye fedezhető. Az alkalmazott hőmérséklet rendszerint a 400−600 °C tartományban található [2].

A klasszikus pirolízis a hulladék, illetve tüzelőanyag szerves molekuláinak a hőbontását valósítja meg 500−800 °C-on, aminek eredményeként gáznemű és szilárd frakció jön létre. Ezen belül beszélhetünk lassú és gyors pirolízisről [2].

A pirolízist gyakran kiegészítik gázosítással. A kigázosítás a pirolíziskokszban maradó szén folyamatgázzá (pirolízisgázzá) történő átalakítását jelenti 800−1.000 °C-on. Mivel a folyamat során gázosodást segítő anyag (pl. levegő, tiszta oxigén) jelenléte szükséges, ezért ezt a megoldást a legtöbb szakirodalom már a gázosításhoz sorolja. A gyakorlatban ezt a kialakítást pirolitikus elgázosításnak is nevezik.

3. Fás szárú biomasszák kategorizálása

A fás szárú biomasszák pirolízissel történő kezelésére, hasznosítására vonatkozóan termokinetikai modellvizsgálatokat végeztünk, amelyek a moláris anyagmegmaradás tételén alapulnak. A modellegyenlet fel-írásához ismerni kell az alapanyag egymólnyi karbontartalmára vonatkozó, fajlagos kémiai összetételét tömegszázalékban. Az (1) összefüggés mutatja a hulladék egymólnyi karbontartalomra vonatkozó hidrogén és az oxigén-tartalom-átszámítást, valamint mutatja a felírási formalizmust [9]:

$$a_C \cdot C + a_H \cdot H + a_O \cdot O =$$

$$C_{a_C} + H_{a_H} + O_{a_O} = C + H_{\frac{a_H}{a_C}} + O_{\frac{a_O}{a_C}} =$$

$$CH_{\frac{a_H}{a_C}} O_{\frac{a_O}{a_C}} = CH_k O_l \,, \qquad (1)$$

ahol:

a_C a tüzelőanyag móláriskarbontartalma,

a_H a hidrogéntartalma

a_O az oxigéntartalma [mol/kg$_{\text{tüzelőanyag}}$];

k és l a tüzelőanyag egymólnyi karbontartalmára vonatkoztatott hidrogén- és oxigéntartalma, tehát a H/C és az O/C arány.

Néhány jellegzetes fafajta H/C és O/C arányát szemlélteti az **1. táblázat**, amiket az elemi összetételek függvényében az ismertetett módon határoztuk meg.

1. táblázat. *Fafajták H/C és O/C arányai a száraz bázisra vonatkoztatva*

	Akác	Bükk	Fenyő	Nyár	Tölgy
H/C	1,42	1,45	1,45	1,45	1,20
O/C	0,66	0,60	0,65	0,60	0,56

A táblázatból látható, hogy az egyes fafajták fajlagos összetételüket tekintve széles skálán mozognak, ezért a fás szárú biomasszák kémiai összetétele alapján készítettünk egy összefoglaló táblázatot (**2. táblázat**), amely a H/C és az O/C arányok alapján tartalmazza az egyes fajtákat. Összesen 46 kategóriát különítettünk el, ami jellemzően lefedi az ismert fafajtákat, valamint a fahulladékokat [10]. A feltüntetett arányok alapján elkészítettük az elemzéseket pirolízisre, 500 °C hőmérsékletű kezelés mellett, változó nedvességtartalom esetében.

2. táblázat. *Fás szárú biomasszák H/C és O/C kategóriái [-]*

H/C	O/C	O/C	O/C	O/C	O/C	O/C
1,15	-	0,45	0,50	0,55	-	-
1,20	-	0,45	0,50	0,55	0,60	-
1,25	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	-
1,30	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,40	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,45	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,50	-	-	0,50	0,55	0,60	0,65
1,55	-	-	0,50	0,55	0,60	0,65
1,60	-	-	-	-	0,60	0,65

4. Termokinetikai modell alapegyenletei

A termokinetikai modellvizsgálat során meghatároztuk az egyes alapanyagokból előállított gáztermékek kémiai és energetikai tulajdonságait. A folyamatok modellezésére termokinetikai modellt alkalmaztunk, ami a moláris tömeg- és energiamegmaradás tételén alapul [9]. A modell alkalmazásával közelítő becslést lehet adni a keletkező gáz kémiai összetételére, fűtőér-

tékére, viszkozitására és a lejátszódó kémiai reakciók energetikai hatékonyságára. Mivel a modell lényege, hogy egyszerűbbé és gyorsabbá tegye a számítást, ezért az egyszerűsített modellegyenletek felírásakor egyes összetevőket, mint például a nitrogén-oxidokat, valamint az etilén- és acetilén-vegyületeket elhanyagoltuk. A modellegyenlet a tüzelőanyag egymólnyi karbontartalmára vonatkoztatott hidrogén- és oxigéntartalmára kerül felírásra [9, 11, 12].

A modellvizsgálatokat az egyensúlyi állandók módszerével, előre definiált elemi összetételű alapanyagra vonatkozóan, rögzített hőmérséklet és üzemi nyomás mellett végeztük el. Az egyensúlyi állandók módszere a megadott hőmérsékleten az egyensúlyi átalakuláshoz tartozó számítás. Lényege, hogy a Gibbs-féle szabadenergia minimalizálásának elve alapján határozzuk meg a vizsgált folyamatok során keletkező termékek összetételét [13]. Az elemzések elkészítéséhez a Gaseq nevű, a NASA-módszeren alapuló szoftvert alkalmaztuk, amit Chris Morley fejlesztett ki, és mindenki számára térítésmentesen elérhető, valamint szabadon felhasználható oktatási és nem profitorientált célokra. Elsősorban gázfázisú reagensek kölcsönhatását leíró egyenletek megoldására használható, de a termikus kezelési technológiák termokinetikai folyamatainak szimulálására is alkalmas. Abban az esetben, ha az elméleti és az alkalmazott moláris oxigénigény aránya egyenlő eggyel (λ=1), vagy egynél nagyobb, akkor visszakapjuk az égési egyenleteket.

A kibővített modellegyenlet a moláris anyagmegmaradás tétele alapján a következő módon írható fel:

$$CH_kO_l + n_m \cdot H_2O + a \cdot N_2 = x_1 \cdot H_2 + x_2 \cdot CO + x_3 \cdot H_2O + x_4 \cdot CO_2 + x_5 \cdot CH_4 + x_6 \cdot O_2 + x_7 \cdot NO + x_8 \cdot NO_2 + x_9 \cdot N_2 + x_{10} \cdot N_2O + x_{11} \cdot C + x_i \cdot C_dH_fO_g \qquad (2)$$

ahol:

n_m a tüzelőanyag egymólnyi karbontartalmára vonatkoztatott nedvességtartalma,
a_a a tüzelőanyag nitrogéntartalma,
x_1 a keletkező nyers szintézisgáz moláris hidrogéntartalma,
x_2 a szén-monoxid-tartalma,
x_3 a vízgőztartalma,
x_4 a szén-dioxid-tartalma,
x_5 a metántartalom,
x_6 a maradó oxigéntartalom,
x_7 a nitrogén-monoxid,
x_8 a nitrogén-dioxid tartalom,
x_9 a nitrogéntartalom,
x_{10} a dinitrogén-oxid-tartalom,
x_{11} a visszamaradt szilárd karbon,
x_i a keletkező egyéb összetevők moláris mennyisége (pl. etilén, acetilén).

A modellvizsgálatok arra irányultak, hogy meghatározzuk a keletkező gáztermék kémiai összetételét, amiből származtatni tudjuk a technológiai, valamint az energetikai hatékonyságot jellemző tulajdonságokat és paramétereket.

A paraméteres alapegyenletek megadása azért szükséges, mert ezeket felhasználva építettük fel a modellvizsgálatokat. A bemeneteli összetételek függvényében és a keletkező termékek ismeretében felírt 2. képlet egyenlőségjelének jobb oldalán található ismeretlen mennyiségek meghatározására, azaz az egyenlet megoldására az egyensúlyi állandók módszerét választottuk.

Alkalmaztuk az egyensúlyi állandók módszerét, amihez előbb felírtuk minden egyes komponensre a moláris anyagmérleg egyenletet, és ellenőriztük, hogy teljesül-e a moláris anyagmegmaradás tétele (3–5. összefüggések), végül meghatároztuk az egyensúlyi állandókat (6–7. képlet) [9, 12]:

Karbonegyensúly:

$$1 = x_2 + x_4 + x_5 \qquad (3)$$

Hidrogénegyensúly:

$$k + 2 \cdot n_m = 2 \cdot x_1 + 2 \cdot x_3 + 4 \cdot x_5 \qquad (4)$$

Oxigénegyensúly:

$$l + n_m = x_2 + x_3 + 2 \cdot x_4 + 2 \cdot x_6 \qquad (5)$$

Víz-gáz reakcióegyensúlyi állandó:

$$K_1 = \frac{x_1 \cdot x_4}{x_2 \cdot x_3} \qquad (6)$$

Metánképződési egyensúlyi állandó:

$$K_2 = \frac{x_5}{x_1^2} \qquad (7)$$

ahol K_1 és K_2 a víz-gáz és a metánképződés egyensúlyi állandók, amik függnek a hőmérséklettől és a nyomástól. A modellezés során állandó 500 °C hőmérsékleten és állandó 1 bar üzemi nyomáson vizsgálódtunk.

Az egyes keletkező termékek moláris mennyiségben kifejezett értékét az egyensúlyi mólszámmal (x) jelöljük. Az egyensúlyi mólszám megmutatja, hogy a keletkező komponens milyen mennyiségben keletkezik a többi termékkomponenshez képest.

A Gibbs-féle szabadenergia az egyensúlyi számok, a nyomás és a hőmérséklet függvényében a (8.) képlet alapján írható fel [9, 14]:

$$\frac{G}{R \cdot T} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_i \cdot G_i^0}{R \cdot T} + x_i \cdot ln \frac{x_i}{\sum x_i} + x_i \cdot ln\, p \right) \qquad (8)$$

ahol G a Gibbs-féle szabadenergia, G_i^0 az i-edik alapanyag 1 mol anyagmennyiségre vonatkoztatott fajlagos szabadenergiája atmoszferikus nyomáson, R az egyetemes gázállandó, T a rendszer hőmérséklete, p a rendszer nyomása, x_i az i-edik komponens egyensúlyi mólszáma, azaz az i-edik alapanyag anyagmennyisége a keverékben, n a kémiai elemek száma, $\sum x_i$ a végtermék egyensúlyi mólszámainak összege, a keverék anyagmennyisége.

Termodinamikai egyensúlyi állapotban a G/RT hányados minimalizálása a cél, amit az elemi összetétel határoz meg.

A modellvizsgálatok során a modellegyenletek megoldására a Gaseq szoftverben az állandó nyomáson és hőmérsékleten vett egyensúlyi állandók módszerét alkalmaztuk. A szoftvert kémiai egyensúlyi folyamatok elemzése céljából fejlesztették ki, így használata megfelelő a termikus kezelési technológiák vizsgálatára. A kezelési folyamatok szimulálásával megfigyelhettük, hogy a bemenő paraméterek változtatása hogyan befolyásolja a pirolízis során keletkező gáztermék összetételét.

5. Energetikai hatékonyságvizsgálat

Az energiahatékonyság napjaink egyik kulcsfontosságú kérdése. Az energiahatékonysági politika szorosan kapcsolódik a kereskedelmi, az ipari versenyképesség, valamint az energiabiztonsági tevékenységekhez, de egyre fontosabbá vált a környezetvédelmi előnyök, mint a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére irányuló törekvések egyik alapeszközeként [15]. Az energia átalakításának hatékonyságára számos hagyományos és nem konvencionális mérőszám ismert és alkalmazható. A következőkben három nem konvencionális paramétert mutatunk be.

A reakció- vagy más néven a kémiai hatásfok (9.) megmutatja, hogy a szilárd tüzelőanyag energiatartalmának mekkora része jelenik meg az előállított gáztermékben [16, 17]. A reakcióhatásfok ismeretében meghatározható az égetés tökéletességét jellemző paraméter. Számítási módszerét a (10.) képlet mutatja. Ezek alapján:

$$\eta_r = \frac{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}} \qquad (9)$$

$$\eta_é = 1 - \eta_r \qquad (10)$$

ahol: η_r a reakcióhatásfok, (m_{gt}) a gáztermék tömegárama, F_{gt} a gáztermék fűtőértéke, (m_{szt}) a szilárd tüzelőanyag tömegárama, F_{szt} a tüzelőanyag fűtőértéke és $\eta_é$ az égési hatásfok.

A fajlagos energiakihozatal megmutatja, hogy egységnyi tömegű bemenő szilárd tüzelőanyagra vonatkoztatva mekkora energiamennyiség állítható elő. Felhasználásá-

val közvetlenül számítható az eredő energiakonverziós hatásfok.

A fajlagos energiakihozatal a (11.) összefüggéssel írható fel

$$e_k = \frac{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}{\dot{m}_{szt}} = \eta_r \cdot F_{szt} \qquad (11)$$

ahol e_k a fajlagos energiakihozatal.

Energetikai szempontból van egy lényeges technológiai paraméter, a fajlagos gáztermelés, amely megmutatja, hogy egy kg tüzelőanyagból (a segédgázokat is figyelembe véve) hány kg gáztermék állítható elő [10]. A fajlagos gáztermelés

$$k_{gt} = \frac{\dot{m}_{gt}}{\dot{m}_{szt}} \qquad (12)$$

ahol k_{gt} a fajlagos gáztermelés.

Pirolízis esetében a gáztermék mellett éghető piroolaj és pirokoksz is keletkezik, amikre vonatkozóan szintén meghatározható a fajlagos pirokokszkihozatal (k_{pk}), és a fajlagos piroolajkihozatal (k_{po}) mértéke. A fajlagos kihozatalok összege egyet ad.

A 46 fás szárú biomassza kategóriákra vonatkozóan a pirolízist folyamatos üzemben vizsgáltuk. A reakció-hőmérsékletet 500 °C-ra választottuk, és segédgázt nem alkalmaztuk. Az alkalmazott üzemi nyomás 1 bar. Az ismertetésre kerülő hatékonyságmátrixok e reakciókörülményekre vonatkoznak.

A felállított modell és az így kapott eredmények maximum 35%-os nedvességtartalmú fás szárú biomasszára alkalmazhatók. A modellezés folyamata során a száraz fa és a 35%-os nedvességtartalom közötti tartományban a nedvesség hatása lineáris függvénnyel írható le. 35%-nál nagyobb nedvességtartalom esetében a linearizált modell nem alkalmazható, mivel nagyobb nedvességtartalom esetében a modell 100%-nál nagyobb kémiai hatásfokot eredményez.

Az energetikai hatékonyságot jellemző paraméterek közül, kiindulásként a fajlagos energiakihozatalt határoztuk meg az előállított pirolízisgáz kémiai összetétele alapján (**3**. és **4. táblázat**).

3. táblázat. *Fajlagos energiakihozatal mértéke pirolízisnél, e_k [MJ/kg$_{fa}$]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	5,0557	4,6962
1,20	-	5,3548	4,9392
1,25	5,7804	5,5874	4,9653
1,30	6,0386	5,7008	5,1989
1,35	6,2317	5,8263	5,3213
1,40	6,2237	5,9501	5,4605
1,45	6,4525	5,9798	5,5505
1,50	-	-	5,5769
1,55	-	-	5,6990
1,60	-	-	-

4. táblázat. *Fajlagos energiakihozatal mértéke pirolízisnél, e_k [MJ/kg$_{fa}$]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	4,6143	-	-
1,20	4,6350	4,4128	-
1,25	4,7949	4,4936	-
1,30	4,8707	4,5893	4,1822
1,35	5,0088	4,5337	4,3322
1,40	5,0723	4,7053	4,4967
1,45	5,0955	4,7363	4,4724
1,50	5,1337	4,8342	4,4310
1,55	5,2298	4,7961	4,5427
1,60	-	4,8978	4,7612

Megfigyelhető, hogy az alapanyag H/C arányának növekedése nagyobb fajlagos energiakihozatalt eredményez, míg az O/C aránynál fordított tendencia tapasztalható. Míg előbbi esetben jellemzően hidrogénfelszabadulással, utóbbinál szén-dioxid- és vízgőzképződéssel számolhatunk.

A nedvességtartalom fajlagos energiakihozatalra gyakorolt hatását az **5.** és **6. táblázat**ból olvashatjuk le, amely 10%-os nedvességtartalom-növekedésre vonatkozik. Látható, hogy a növekvő nedvességtartalom pirolízis alkalmazása során pozitív irányban befolyásolja a fajlagos energiakihozatalt.

5. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energiakihozatalra, Δe_k [MJ/kg$_{fa}$]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,5436	0,5796
1,20	-	0,5129	0,5553
1,25	0,4696	0,4896	0,5528
1,30	0,4423	0,4778	0,5294
1,35	0,4223	0,4655	0,6145
1,40	0,4236	0,4528	0,5029
1,45	0,4003	0,4497	0,4942
1,50	-	-	0,4914
1,55	-	-	0,4795
1,60	-	-	-

6. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energiakihozatalra, Δe_k [MJ/kg$_{fa}$]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,5875	-	-
1,20	0,5849	0,6069	-
1,25	0,5702	0,5990	-
1,30	0,5623	0,5892	0,6274
1,35	0,5485	0,5942	0,6131
1,40	0,5417	0,5774	0,5971
1,45	0,5388	0,5739	0,5986
1,50	0,5353	0,5647	0,6024
1,55	0,5264	0,5676	0,5914
1,60	-	0,5581	0,5709

Ez a tendencia jellemző a pirolízisreakció hatásfokának alakulására (**7–10. táblázatok**).

7. táblázat. *Pirolízisreakció hatásfoka, η_r [%]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	34,38%	33,32%
1,20	-	36,39%	35,18%
1,25	38,78%	38,22%	36,06%
1,30	40,66%	39,54%	38,13%
1,35	42,33%	41,24%	39,67%
1,40	43,09%	42,75%	41,27%
1,45	45,16%	43,94%	42,83%
1,50	-	-	43,95%
1,55	-	-	45,69%
1,60	-	-	-

8. táblázat. *Pirolízisreakció hatásfoka, η_r [%]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	33,12%	-	-
1,20	34,09%	33,35%	-
1,25	35,80%	34,89%	-
1,30	37,15%	36,28%	34,58%
1,35	38,75%	37,40%	36,55%
1,40	40,14%	38,99%	38,29%
1,45	41,34%	40,14%	38,88%
1,50	42,35%	41,69%	40,13%
1,55	43,92%	42,70%	41,24%
1,60	-	44,24%	43,76%

9. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízisreakció hatásfokára, $\Delta\eta_r$ [%]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	12,91%	13,47%
1,20	-	12,89%	13,52%
1,25	14,41%	12,97%	13,79%
1,30	12,74%	13,15%	13,93%
1,35	12,84%	13,42%	15,01%
1,40	13,10%	13,62%	14,35%
1,45	13,23%	13,93%	14,65%
1,50	-	-	14,96%
1,55	-	-	15,23%
1,60	-	-	-

10. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízisreakció hatásfokára, $\Delta\eta_r$ [%]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	13,63%	-	-
1,20	13,96%	14,34%	-
1,25	14,18%	14,73%	-
1,30	14,48%	14,99%	15,63%
1,35	14,69%	15,63%	15,97%
1,40	15,02%	15,71%	16,12%
1,45	15,40%	16,06%	16,45%
1,50	15,66%	16,35%	17,12%
1,55	15,95%	16,87%	17,17%
1,60	-	17,12%	17,41%

A fajlagos fagáztermelésnél eltérő hatás figyelhető meg (**11**. és **12. táblázat**). Ennél

a kategóriánál mind a H/C, mind az O/C arány növekedése nagyobb fajlagos gáztermelést eredményez. A növekvő nedvességtartalom hatására nagyobb a fajlagos gáztermelés (**13.** és **14. táblázat**), azonban itt a H/C és az O/C aránypárok fordítottan arányosak.

11. táblázat. *Fajlagos gáztermelés mértéke pirolízis esetén, k_{gt} [$kg_{gáz}/kg_{fa}$]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,1652	0,2200
1,20	-	0,1671	0,2268
1,25	0,1538	0,1781	0,2523
1,30	0,1616	0,1980	0,2667
1,35	0,1754	0,2261	0,2884
1,40	0,2012	0,2468	0,3067
1,45	0,2180	0,2759	0,3327
1,50	-	-	0,3582
1,55	-	-	0,3794
1,60	-	-	-

12. táblázat. *Fajlagos gáztermelés mértéke pirolízis esetén, k_{gt} [$kg_{gáz}/kg_{fa}$]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,2348	-	-
1,20	0,2668	0,3002	-
1,25	0,2868	0,3339	-
1,30	0,3138	0,3561	0,4076
1,35	0,3320	0,4060	0,4312
1,40	0,3599	0,4117	0,4419
1,45	0,3893	0,4375	0,4650
1,50	0,4087	0,4572	0,5089
1,55	0,4296	0,4917	0,5117
1,60	-	0,5075	0,5251

A pirokoksz keletkezése a gázképződéssel fordítottan arányos. Ez az állítás nemcsak matematikailag, hanem azon elv alapján is levezethető, hogy az alapanyagban található nedvesség- és illóanyag-tartalom a hő hatására gőz/gáz formájában felszabadul, és reagál a karbonnal, ami ezáltal csökkenti a visszamaradó szilárd végtermék mennyiségét.

13. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos fagáztermelésre, Δk_{gt} [$kg_{gáz}/kg_{fa}$]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,1438	0,1384
1,20	-	0,1436	0,1377
1,25	0,1448	0,1425	0,1351
1,30	0,1440	0,1405	0,1337
1,35	0,1426	0,1377	0,1335
1,40	0,1400	0,1356	0,1297
1,45	0,1383	0,1327	0,1271
1,50	-	-	0,1245
1,55	-	-	0,1224
1,60	-	-	-

14. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos fagáztermelésre, Δk_{gt} [$kg_{gáz}/kg_{fa}$]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,1369	-	-
1,20	0,1337	0,1303	-
1,25	0,1317	0,1269	-
1,30	0,1290	0,1247	0,1194
1,35	0,1272	0,1196	0,1171
1,40	0,1244	0,1191	0,1160
1,45	0,1214	0,1165	0,1137
1,50	0,1195	0,1146	0,1092
1,55	0,1174	0,1111	0,1090
1,60	-	0,1095	0,1077

A **15.** és **16. táblázat**okból látható, hogy az alapanyag H/C és O/C arányának növekedése csökkenti a fajlagos koksztermelést. A tüzelőanyag nagyobb fajlagos hidrogén- és oxigéntartalma arra utal, hogy az nagyobb mennyiségben tartalmaz illó vegyületeket.

A növekvő nedvességtartalom a gázképződésnek kedvez, így a koksztermelésnél csökkenő tendencia figyelhető meg. A keletkező fajlagos pirolízisolaj mennyisége azon elv szerint határozható meg, hogy a keletkező fajlagos gáz (k_{gt}), koksz (k_{pk}) és olajtermékek (k_{po}) összege egységnyi értéket képvisel.

$$k_{gt} + k_{pk} + k_{po} = 1 \qquad (13)$$

15. táblázat. *Fajlagos kokszterme lés mértéke pirolízis esetén, k_{pk} [kg_{koksz}/kg_{fa}]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,4084	0,3810
1,20	-	0,4074	0,3776
1,25	0,4141	0,4019	0,3648
1,30	0,4102	0,3920	0,3576
1,35	0,4033	0,3780	0,3468
1,40	0,3904	0,3676	0,3377
1,45	0,3820	0,3530	0,3247
1,50	-	-	0,3119
1,55	-	-	0,3013
1,60	-	-	-

16. táblázat. *Fajlagos kokszterme lés mértéke pirolízis esetén, k_{pk} [kg_{koksz}/kg_{fa}]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,3736	-	-
1,20	0,3576	0,3409	-
1,25	0,3476	0,3241	-
1,30	0,3341	0,3130	0,2872
1,35	0,3250	0,2880	0,2754
1,40	0,3111	0,2851	0,2701
1,45	0,2963	0,2722	0,2585
1,50	0,2867	0,2624	0,2366
1,55	0,2762	0,2451	0,2352
1,60	-	0,2373	0,2285

17. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos kokszterme lésre, Δk_{pk} [kg_{koksz}/kg_{fa}]*

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	-0,0714	-0,0687
1,20	-	-0,0713	-0,0683
1,25	-0,0719	-0,0707	-0,0671
1,30	-0,0715	-0,0697	-0,0663
1,35	-0,0708	-0,0683	-0,0658
1,40	-0,0695	-0,0673	-0,0643
1,45	-0,0687	-0,0658	-0,0630
1,50	-	-	-0,0618
1,55	-	-	-0,0607
1,60	-	-	-

Példaként szemléltetjük három eltérő fajlagos összetételű és változó nedvességtartalmú fafajta pirolízisére kapott eredményeit (**17.** és **18. táblázat**ok). A referencia fafajtáknál megfigyelhető, hogy a nagyobb nedvességtartalom növeli a fajlagos energiakihozatal mértékét, ezen keresztül pedig a reakcióhatásfokot, tovább kedvez a fajlagos gázképződésnek, és csökkenti a pirolíziskoksz mennyiségét. Amennyiben a vizsgálati eredményeket összehasonlítjuk a táblázatokból leolvasott, illetve köztes H/C és O/C arányoknál lineáris interpolációval meghatározott értékeket, akkor megkaphatjuk a táblázatrendszerünk pontosságát.

18. táblázat. *10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos kokszterme lésre, Δk_{pk} [kg_{koksz}/kg_{fa}]*

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	-0,0679	-	-
1,20	-0,0663	-0,0646	-
1,25	-0,0653	-0,0630	-
1,30	-0,0640	-0,0618	-0,0592
1,35	-0,0631	-0,0593	-0,0580
1,40	-0,0617	-0,0591	-0,0575
1,45	-0,0602	-0,0578	-0,0563
1,50	-0,0592	-0,0568	-0,0541
1,55	-0,0582	-0,0550	-0,0540
1,60	-	-0,0542	-0,0533

19. táblázat. *Fafajták pirolízise, összefoglalás*

Fafajta	Nedvesség [%]	e_k [MJ/kg_{fa}]	η_r [%]
Energiafűz	0	4,4032	35,89
Energiafűz	15	5,3056	59,79
Bükkfa	0	4,7363	40,14
Bükkfa	20	5,8841	72,26
Tölgyfa	0	4,5906	33,98
Tölgyfa	23	4,6007	66,78

20. táblázat. *Fafajták pirolízise, összefoglalás*

Fafajta	Nedvesség [%]	k_{gt} [kg_{gt}/kg_{fa}]	k_{pk} [kg_{pk}/kg_{fa}]
Energiafűz	0	0,3846	0,2988
Energiafűz	15	0,5673	0,2082
Bükkfa	0	0,4375	0,4074
Bükkfa	20	0,6705	0,2648
Tölgyfa	0	0,2735	0,3543
Tölgyfa	23	0,5794	0,2011

7. Következtetések

A termokinetikai modellvizsgálatok azt az eredményt hozták, hogy a fás szárú biomassza pirolízissel történő hasznosítás során a nedvességtartalom növekedése a fajlagos energiakihozatalt (**5–6. táblázat**), a kémiai hatásfokot (**9–10. táblázat**) és a fajlagos fagáztermelést (**13–14. táblázat**) pozitív irányba változtatja. A nagyobb nedvességtartalom nagyobb energiatartalmú és mennyiségű fagázt eredményez. A pirolízisolaj és a pirokoksz mennyisége (**17–18. táblázat**) a nedvességtartalommal fordított arányban áll.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] BASU, P.: *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Practical design and theory,* Second edition, Elsevire, San Diego, 2013. p. 529.

[2] SZUHI, A.: *Az új termikus technológiák környezeti hatásai (pirolízis, elgázosítás és plazma technológia).* Humusz Szövetség és Vidék-fejlesztési Minisztérium 2013. p. 14.

[3] WAMPLER, T., P.: *Applied pyrolysis handbook.* Taylor & Francis, Secound edition, 2007. p. 285.

[4] SZUHI, A.: *Új termikus technológiák és hagyományos hulladékégetők.* Környezetvédelmi-Vízügyi Minisztérium, 2009. p. 36.

[5] HILL, T. & DOWEN, S.: *Pyrolysis and gasification.* Briefing (Draf 2), UK Without Incineration Network (UKWIN), 2010. p. 9.

[6] HANAOKA, T., INOUE UNO, S., OGI, T., MINOWA, T: *Effect of wood biomass components on air-steam gasification.* Biomass and Bioenergy, Vol. 28. No. 1. 2005, pp. 69−75.

[7] HOGG, R.: *Energy from waste by pyrolysis and gasification the experience and performance of an operational plant.* Solid Waste Management, 2007, pp. 385−392.

[8] HELSEN, L., BOSMANS, A.: *Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process. Proceedings of the International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining,* Houthalen-Helchtern, Belgium, 2010, pp. 133−180.

[9] ZAINAL, Z., A., ALI, R., LEAN, C., H., SEETHARAMU, K., N.: *Prediction of perfor-mance of a downdraft gasifier using equilibrium modelling for different biomass material.* Energy Conversion and Management. Vol. 42. 2001. pp. 1499−1515.

[10] RED, T., B., DAS, A.: *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems,* Solar Energy Research Ins., 1988. p. 148.

[11] WANG, Y., KINOSHITA, C. M.: *Kinetic model of biomass gasification.* Solar Energy, Vol. 51. No. 1. 1993, pp. 19−25.

[12] MOUNTOURIS, A., VOUTSAS, E., TASSIOS, D.: *Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and exergy analysis.* Energy Conversion and Management. Vol. 47. 2006. pp. 1723−1737.

[13] HATZILYBERIS, K. S.: *Design of an indirect heat rotary kiln gasifier.* Fuel Processing Technology. 92, 2011. pp. 2429−2454.

[14] MORLY, C.: *Method for calculating equilibrium compositions at specified temperature,* Gaseq, a chemiacal equilibrium program for windows. www.gaseq.co.uk 2005. p. 6.

[15] PATTERSON, M. G.: *What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues.* Energy Policy. Vol. 24, No. 5. pp. 377−390. 1996.

[16] RAJVANSHI, K., A.: *Biomass gasification.* Alternative Energy in Agriculture. Vol. 2. No. 4. 1986. pp. 83−102.

[17] SCHUSTER, G., LÖFFER, G., WEIGEL, K., HOFBAUER, H.: *Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study.* Bioresource Technology. Vol. 77. 2001. pp. 71−79.

[18] GYULAI, I.: *A biomassza dilemma,* Magyar Természetvédők Szövetsége, Föld Barátai Magyarország, 2010. p. 116.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 63–70. 06
http://hdl.handle.net/10598/30087

SZIMULÁCIÓS ALKALMAZÁSOK A NYÍREGYHÁZI EGYETEM MŰSZAKI KÉPZÉSEIBEN

ROLE OF SIMULATION TECHNIQUES IN ENGINEERING EDUCATION OF UNIVERSITY OF NYÍREGYHÁZA

Dezső Gergely[1], Szigeti Ferenc[2]

[1] *Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológiai Tanszék, Magyarország, Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, +36-42-599400, dezso.gergely@nye.hu*

[2] *Nyíregyházi Egyetem, Műszaki és Agrártudományi Intézet, Műszaki alapozó, Fizika és Gépgyártástechnológiai Tanszék, Magyarország, Nyíregyháza, Sóstói út 31/b, +36-42-599400, szigeti.ferenc@nye.hu*

Abstract
Spreading of scientific and engineering simulation methods an application in research and industry implies the answer of education system, which simulation methods and software appear in training programs. Depth of introduction to theoretical basics and practical applications depends on level and aim of education. In bachelor of engineering and technical teacher trainings especially interesting questions may be put up. Examples are demonstrated from educational practice of University of Nyíregyháza. As a hypothesis it can be stated that recently there are a great educational potential in secondary and higher educational institutions, what can be utilized more effectively than it is today.

Keywords: *simulation,, software applications, engineering education, technical teacher training*

Összefoglalás
A természettudományos és a műszaki szimulációs módszerek alkalmazásának elterjedése a kutatásban és a gazdasági életben természetes módon maga után vonta az iskolarendszernek azt a válaszát, hogy e módszerek és az azokhoz kapcsolódó szoftveres alkalmazások megjelennek az oktatásban. A képzés céljától függően szükséges bemutatni az elméleti alapismereteket és a gyakorlati alkalmazásokat. Különösen érdekes kérdések vetődnek fel a mérnöki alapképzésben és a mérnöktanár képzésben. Példákat mutatunk be a Nyíregyházi Egyetem oktatási gyakorlatából. Hipotézisünk szerint jelenleg a középiskolákban és a felsőoktatási intézményekben szoftver formájában olyan oktatási potenciál fekszik, amelyet a jelenleginél lényegesen sokoldalúbban, intenzívebben ki lehet használni.

Kulcsszavak: *szimuláció, számítógépes alkalmazás, mérnökképzés, mérnöktanárképzés*

1. Bevezetés

Magyarországon műszaki képzés az ISCED-97 szabványnak megfelelő 3–6. szinteken folyik. Ez szokásos szóhasználattal a középiskolai (ISCED 3), a graduális (ISCED 5) és a posztgraduális (ISCED 6) képzéseket jelenti, beleértve a speciális helyzetben levő felsőfokú szakképzéseket (ISCED 4) [1,2]. Tanulmányunk a graduális képzésre összpontosít, némi kitekintéssel a többi felsorolt szintre is.

A felsőfokú graduális képzésben a műszaki képzési terület két fontos részre oszlik. Az egyik a mérnökképzés, amelynek számos szakterülete van, célja elsősorban a gazdaság magasan képzett munkaerőigényének kielégítése, valamint kisebb részben a felsőoktatás személyi állományának utánpótlása. A másik fontos terület a mérnöktanárképzés, amelynek szakmai ágazatai a mérnökképzés szakterületeinek felelnek meg, célja a szakgimnáziumi oktatók képzése, továbbképzése. A mérnöktanárképzés különleges helyzetére jellemző, hogy jellegénél fogva az ISCED 5 szinten zajlik, kimenete pedig erőteljesen visszahat az ISCED 2–3–4 szintek működésére, hosszabb távon saját maga szakmai utánpótlását is megalapozza.

A Nyíregyházi Egyetemen az elmúlt időszakban sikeresen előrehaladt a szoftver infrastruktúra fejlesztése. Ez elsősorban akadémiai célú licencek megvásárlását és korábban beszerzett szoftverek frissítését jelenti. Időszerű volt a szoftverállomány felülvizsgálata és osztályozása aszerint, hogy milyen típusú képzésben és milyen mélységben célszerű azokat oktatni.

A szerzők elsősorban a műszaki alapozó és gépgyártás-technológia képzésben vesznek részt, ezért a példák többsége erről a területről származik.

2. A szimuláció

A mérnöki szimuláció összetett, multidiszciplináris tevékenység.

Mindezzel együtt, különböző mélységben megjelenik a középiskolákban, a felsőoktatás graduális szintjén és a doktori képzésben is. Példaként említhető egy középiskolai szakoktatást szolgáló Sulinet tananyag [3], és egy, a mester-, valamint doktori képzés céljára készült egyetemi tankönyv [4].

Az idegen szavak szótára szerint a szimuláció tettetést jelent, a természettudományokban és a műszaki tudományokban azonban ezt nem a hétköznapi értelemben kell érteni.

A tudományos szimuláció fogalmára egységes meghatározást nem lehet találni a szakirodalomban, de általánosan jellemző, hogy valamilyen valóságos rendszer utánzását jelenti, általában absztrakt módszerekkel, melynek célja a rendszer működésének mélyebb megértése [5]. A szimulációra több okból is szükség lehet, ezek közül a legfontosabbak:

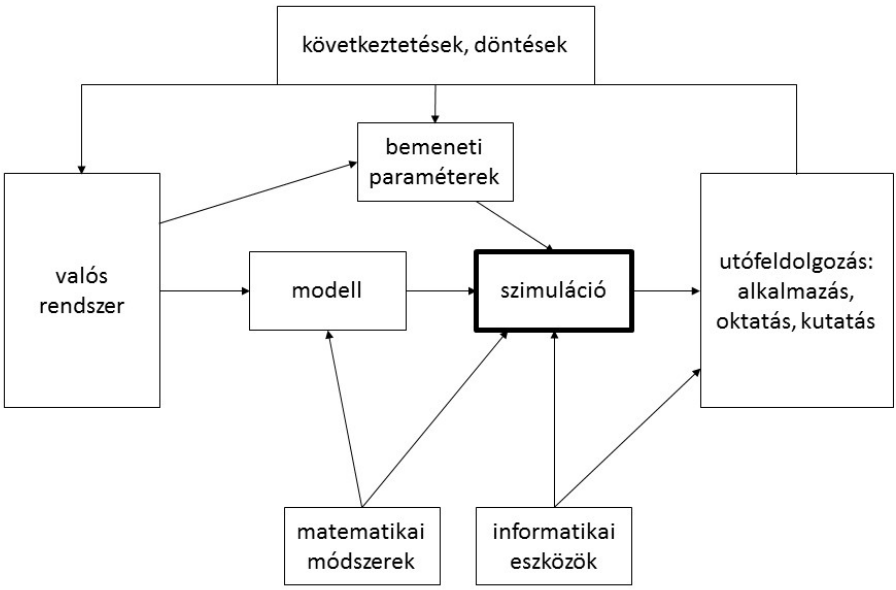
- a rendszer közvetlenül nem hozzáférhető tanulmányozás céljából,
- nem érdemes, vagy nem kifizetődő a közvetlen tanulmányozás,
- a rendszer viselkedését szélsőséges körülmények között kívánjuk tanulmányozni,
- igen nagyszámú vizsgálatot szeretnénk elvégezni,
- a közvetlen vizsgálatnak biztonsági vagy etikai akadályai vannak.

A szimuláció alapja minden esetben egy modell. A modell egy olyan absztrakt gép, amely bizonyos szempontból a valóságos rendszer működését írja le. Gyakran a modell matematikai objektumokból épül fel (pl. számok, vektorok, operátorok), amelyek között összefüggések állnak fenn (pl. differenciálegyenletek, integrálegyenletek, algebrai egyenletek stb.). A modell a valóságból kiindulva, az idealizáció folyamata során épül fel. A modellalkotás külön tudományos tevékenység, általában több kutató sokéves munkája szükséges a tudományos modellek felépítéséhez. Ennek részleteivel itt nem foglalkozunk, ugyanakkor nagyon fontos, hogy az oktatási folyamat során a tanulókban tudatosuljon ez az igen fontos tény. Ebben segíthetnek a tudománytörténet érdekes fejezetei.

A modellek megoldása kézi eszközökkel csak korlátozottan lehetséges, akkor, ha a modell nem túl bonyolult, és a kezdeti vagy peremfeltételek egyszerűen (pl. téglatest alakú tartomány). Általában azonban

nem létezik analitikus megoldás, numerikus módszereket kell alkalmazni annak közelítésére, ami nagy mennyiségű számítás elvégzéséhez vezet. Erre a célra kiválóan alkalmasak a számítógépek az 1980-as évek óta. Nagyjából innen datálható a szimulációs technikák elterjedése a gazdasági szférában is.

A szimuláció célkitűzése lehet
– alkalmazás,
– oktatás,
– kutatás.



1. ábra. *A szimuláció helye a mérnöki tevékenységben*

A szimulációt sztereotipikusan szokás számítógép előtti tevékenységként elképzelni. Ez azonban félrevezető, mert a szimuláció mélyen összefügg a modellalkotással, a valós rendszer vizsgálatával is (**1. ábra**). Fontos megjegyezni, hogy a szimulációs számítások nemcsak digitális számítógépeken, hanem analóg számítógépeken vagy akár papíron is elvégezhetők. Ezenfelül ismert az ún. fizikai szimuláció technikája, amely során a vizsgált rendszerhez bizonyos szempontból hasonló valódi rendszereket építenek fel, és azok működtetésével jutnak információkhoz, következtetésekhez a szakemberek. Ilyen például a gépkocsik töréstesztje, járművek szélcsatornás vizsgálatai vagy számos anyagvizsgálati módszer.

Megjegyezzük, hogy esetenként a szimulációt összetévesztik az animációval. Ennek oka az, hogy mindkettőnek a kimenete lehet egy látványos mozgókép. A kevésbé gyakorlott felhasználó számára nem nyilvánvaló a különbség a két technika között. Az animáció a felhasználó által definiált mozgások megjelenítése, szemléltetése. Az animáció nem feltétlenül felel meg egy valódi fizikai rendszer mozgásának. A szi-

muláció egy rendszer modelljének a megoldását jelenti, amit nem szükségszerű mozgóképpel megjeleníteni, de a korszerű szoftverek erre is lehetőséget adnak.

A továbbiakban a szoftvereszközökkel végzett szimulációkra szorítkozunk.

3. Szimulációs szoftverek

A szimulációra alkalmazható szoftveres megoldások tárháza napjainkban szinte kimeríthetetlen. Az interneten számos ingyenes szoftver is rendelkezésre áll, melyek színvonala és alkalmazási területe tág határok között mozog. A kutatásban ezeknek gyakran hasznát lehet venni. A műszaki képzésben gyakori a kereskedelmi szoftverek oktatása, mert a gazdaság szereplői is gyakran ezekre a megoldásokra támaszkodnak. A Nyíregyházi Egyetem Műszaki és Agrártudományi Intézetében az alábbi szoftverek érhetők el oktatási és kutatási célokra.

Szimulációs modullal is rendelkező tervezőszoftverek:

– Solid Works,
– Solid Edge,
– Catia,
– Autocad Inventor.

Elő- és utófeldolgozó szoftverek:

– Patran,
– Mentat,
– Simufact Welding.

Végeselem módszer általános célú megoldószoftverei, esetenként elő- és utófeldolgozó és más kiegészítő (pl. többtest szimulációs) modulokkal:

– Ansys,
– Marc,
– Nastran,
– Dytran,
– Adams.

Gyártásszimulációs szoftverek:

– Edge Cam,
– Keller Symplus.

4. Alkalmazási lehetőségek az oktatásban

Gyakran felvetett és vitatott kérdés, hogy az oktatás mely szintjén, és milyen mélységben szerepeljenek a szimulációs módszerek.

Általános egyetértés van abban, hogy nem szabad a tanulótól elvárni olyan számítógépes módszerek alkalmazását, amelyeknek elvi alapjait vagy nem ismerheti az oktatás adott szintjén, vagy ismerheti, de még nem tanulta.

Az igazi kérdés az, hogy az elvi alapok megismerésében

– meddig szükséges és
– meddig lehetséges

elvezetni a tanulót.

Nem is szükséges szimulációs technikákról beszélni ahhoz, hogy jó példát találjunk erre a dilemmára. A mérnöki tervező szoftverek kiváló lehetőséget adnak arra, hogy két- és háromdimenziós műszaki ábrázolást, illetve testmodelleket készítsenek akár középiskolás tanulók is. Ezt tanulják is, sőt igen komoly tanulmányi versenyeken szerepelnek, annak ellenére, hogy nem mélyednek el a gráfelméletben, a vektor- és mátrixalgebrában, a függvényinterpoláció és függvényapproximáció kérdéseiben. Ennek az az oka, hogy viszonylag könnyen szétválasztható a szoftveres megoldásnak a felhasználói szintje és a csak programozók számára fontos belső megoldásai, algoritmusai.

A szimulációs szoftvereknek is van felhasználói oldala és programozói oldala, azonban a legtöbb esetben ezek lényegesen nagyobb átfedéssel rendelkeznek, mint más típusú szoftverek esetén.

A többtest szimuláció legyen az első példa erre. A legegyszerűbb esetben több merev testből álló rendszer mozgásegyenletét oldjuk meg numerikusan negyedrendű Runge–Kutta-módszerrel. Úgy tűnik, ez egy pontos meghatározás. Azonban a módszer számos olyan paramétert tartalmaz, ame-

lyeknek beállítása lényegesen befolyásolhatja az elvégzett számítás hibáját és a gépigényt is, ilyenek például a lépésköz, vagy hibabecsléses lépésközváltoztatás esetén a tolerancia. Ez akkor válik érdekessé pedagógiai szempontból, ha figyelembe vesszük, hogy a merev testek dinamikájának alapjait középiskolában is megismerik a tanulók, a felsőoktatásban tovább mélyítik ismereteiket, ugyanakkor a numerikus módszerekről még BSc képzésben sem tanulnak (legfeljebb az említés szintjén) annyit, hogy a paramétereket értelmezni tudják, csak a mesterképzés nyitja meg ehhez az ajtót, és a doktori képzés kereteiben mélyed el e kérdésekben az, akinek szüksége van rá. Feltehető tehát az a kérdés, hogy vajon a középiskolás tanulók vagy BSc szintű képzésben részt vevő hallgatók használjanak-e többtest szimulációs módszereket. Itt hangsúlyozzuk, hogy nem az úgynevezett „kinematikai szimulációra" vonatkozik a kérdés, amely az animációtól nem sokban különbözik, hanem a dinamikai szimulációra. Ennek ellene szól a numerikus módszerekben való járatlanság, ugyanakkor mellette szól a korszerű szoftverek által kínált eszközrendszer megismerése, valamint az erős motiváló hatás. E kérdésre a válasz a pedagógus személye és munkája. A pedagógus feladata megmutatni a tanulóknak, hogy ismereteiket, készségeiket mire használhatják, ezzel együtt azt is, hogy hol vannak az alkalmazás határai, mi az, amit meg kell majd tanulniuk a továbblépéshez.

A végeselem módszerrel történő szimuláció oktatása kifejezetten a felsőoktatás kérdése. Ebben az esetben még nagyobb az átfedés a felhasználó által bemenetként megadott adatok és a megoldás során használt matematikai, informatikai eljárások között. Nyilvánvaló, hogy maga a végeselem felosztás létrehozása is igen különleges feladat. A felosztás közvetlen generálásától kezdve a CAD testmodellből kiinduló automatikus felosztás elkészítéséig számos lehetőség áll rendelkezésre. Esetenként a végeselem felosztás elkészítése nehezebb feladat, mint a rákövetkező fizikai egyenlet megoldása. A végeselem módszer matemetikai rejtelmei azonban itt nem érnek véget, mert a mátrix diagonalizására használt eljárásoknak, az alkalmazott anyagmodelleknek, tranziens számítások esetén az időbeli léptetésnek és számos más tényezőnek döntö hatása lehet a számítás végeredményére. Egyes vélemények szerint a numerikus módszerek alkalmazása még ma is művészet. Vagy ha nem is az, mindenképpen igen komoly tapasztalat szükséges ahhoz, hogy egy műszaki problémát valaki úgy oldjon meg szimulációval, hogy az a gyakorlatban is hasznos legyen.

Ez a kérdéskör azért érdekes, mert Magyarországon a BSc szintű műszaki képzésben szerepel a végeselem szimuláció oktatása. Ennek óraszáma azonban csekély. Ahhoz, hogy a hallgatók tágabb kontextusban is értelmezhető bevezetést kapjanak, meg kell mutatni az elvi alapokat, meg kell ismertetni velük legalább egy szoftveres alkalmazást, és meg kell mutatni nekik azt, hogy a módszerrel kapható eredmények hogyan használhatók fel. A témakör nehézsége és szépsége ugyanarra az okra vezethető vissza. Arra, hogy a végeselem módszerbe való bevezetés egy erősen integráló tantárgy. Szintetizálja a matematikai, fizikai, CAD, anyagtudományi és informatikai alapismereteket. Ha ezekben számottevő hiányosság van, akkor az oktató – akarata ellenére – csak légvárat épít. Ugyanakkor, ha a hallgatóban összeáll a kép, megérti a fizikai és matematikai modellezés lényegét és szépségét, akkor igen nagy előrelépést tesz a természettudományos és műszaki gondolkodás terén, az oktató pedig valódi sikerélményben részesül.

A mérnöktanárképzésben a szimulációs alkalmazások megismerésének szépsége és problémája hatványozottan jelentkezik. Itt ugyanis a felhasználás nem mérnöki munkát jelent, hanem a középiskolai oktatómunkát. A tanár két fő területen találkozhat

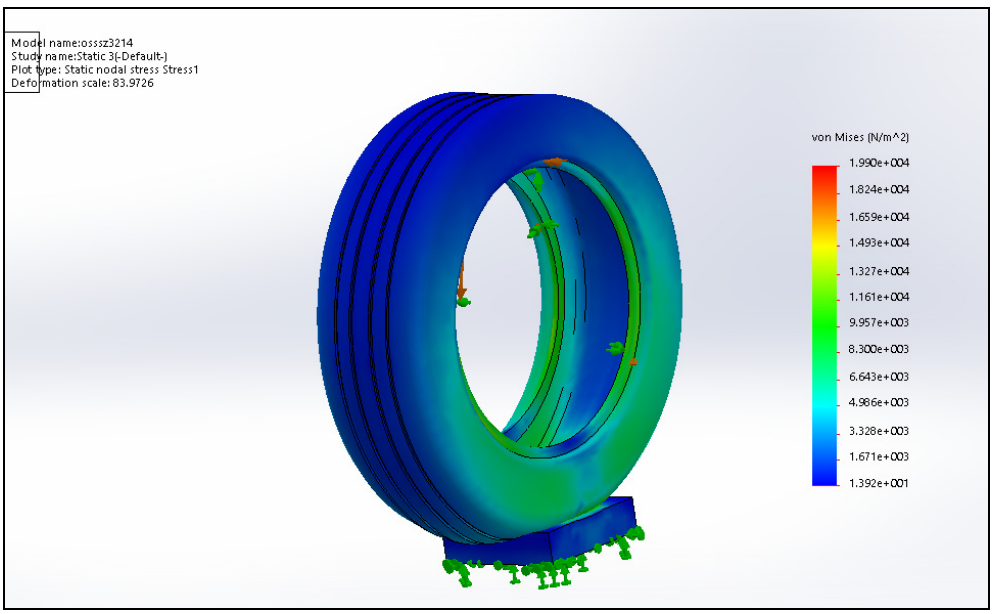
mérnöki szimulációkkal az oktatásban. Az egyik mód az, ha neki kell oktatnia egy ilyen szoftver használatát. A másik mód az, ha az oktatásban szemléltetésre használja a szimulációt. Nem vitás, hogy erre fel kell készíteni a mérnöktanárokat. Ennek mélyebb elemzése azonban meghaladja e dolgozat kereteit.

5. Példák

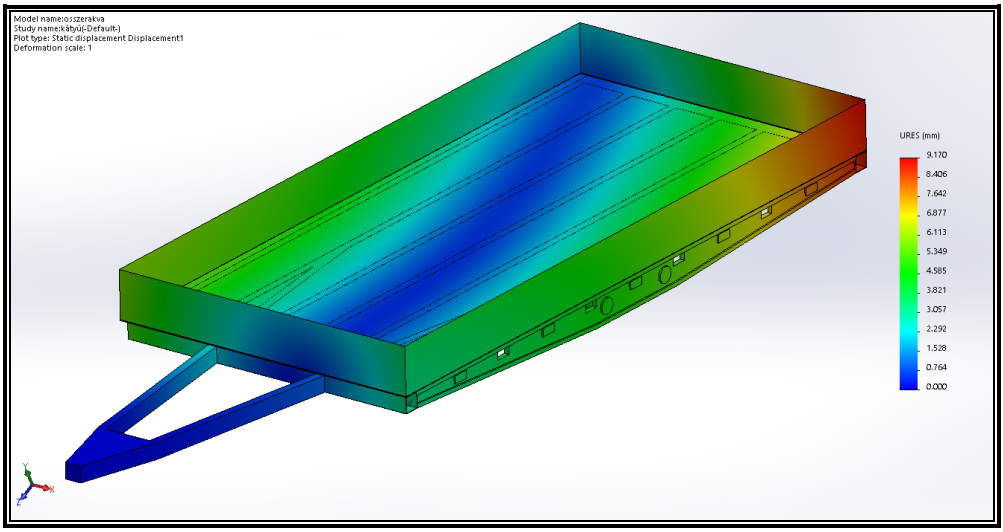
Olyan példákat mutatunk be szimulációs számításokra, amelyek az egyetemi alapképzésben elsajátított alapismeretekre építve hallgatóink munkájával készültek el. Az oktatóval konzultálva a hallgató maga választhatott műszaki problémát, amelyet megvizsgált. Úgy egyszerűsítettük a feladatot, hogy a tanult ismeretanyaggal kezelhető legyen. Mechanikai, statikai vagy kvázistatikus közelítésben tárgyalt számításokat végeztek a hallgatók.

Az ilyen számítások még nem elégítik ki az ipari vagy tudományos alkalmazás követelményeit, de jelentősen segítik a hallgatót több területen:

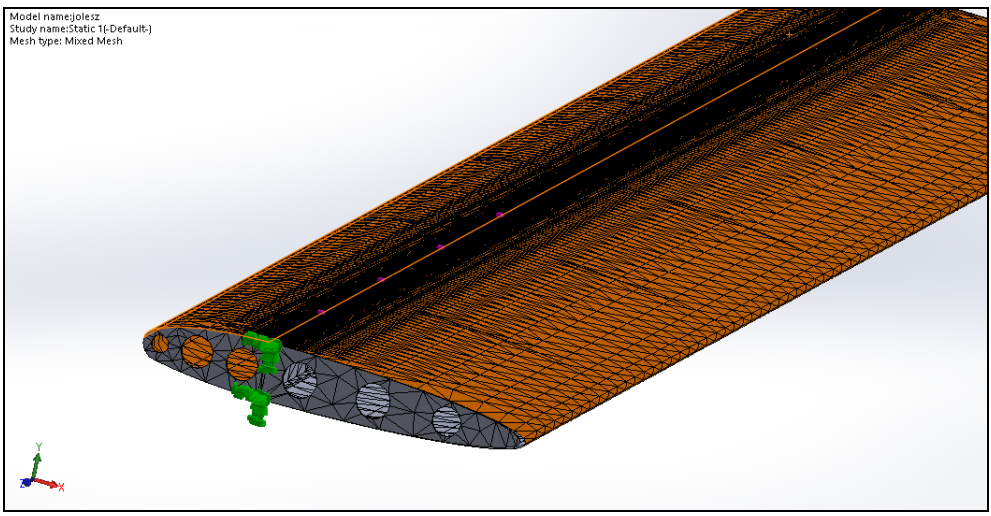
- a gyakorlati alkalmazás során mélyebben megismeri a szimuláció fő elemeit, lépéseit,
- tapasztalatot szerez a szimuláció eredményeinek értelmezésében, így később értő felhasználója lehet mások eredményeinek – a mérnökképzés szempontjából ez az egyik legfontosabb eredmény,
- sikerélményhez jut olyan témában, ami egybeesik érdeklődésével, így erősödhet a tanulás és a mérnöki pálya iránti motivációja, elkötelezettsége.



2. ábra. *Gumiabroncs feszültségállapota gyorsítás során (kvázisztatikus közelítésben) [6]*



3. ábra. *Személygépkocsi-utánfutó deformációja aszimmetrikus terhelés esetén (kátyúban) [6]*



4. ábra. *Vitorlázó repülőgép szárnyának elcsavarodása [6]*

6. Következtetések

A szimulációs szoftverek alkalmazási lehetőségeit vizsgáltuk a műszaki oktatás különböző területein. Megállapítható, hogy a szimulációs szoftverekre a szokásos szakmai, közvetlen ipari hasznosíthatóságot előtérbe helyező értelmezésen túl számos más szerep is vár, várhat a műszaki képzés különböző szintjein ISCED 3 és 6 között.

Ezek az alkalmazási területek: az általános és speciális műszaki kompetenciafejlesztés, az oktatásban a szemléltetés, a motiváció és a differenciálás, továbbá az egész életen át tartó tanulásra való felkészítés.

Ezeken a területeken olyan oktató képes sokoldalúan fejleszteni a tanulókat, aki maga is ismeri és használja a szoftvereszközöket.

Összességében hipotézisként megfogalmazható, hogy jelenleg a középiskolákban és a felsőoktatási intézményekben szoftver formájában olyan oktatási potenciál fekszik, amelyet a jelenleginél lényegesen sokoldalúbban, intenzívebben ki lehet használni. Ehhez olyan oktató személyzet szükséges, amelynek van kellő kapacitása erre a felkészültség és a munkaidő tekintetében is.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] FORGÁCS A.: *ISCED – az oktatás nemzetközi osztályozási rendszere*, http://ofi.hu/isced-az-oktatas-egyseges-nemzetkozi-osztalyozasi-rendszere (letöltve: 2016. november 11.)

[2] *International Standard Classification of Education ISCED 1997*, UNESCO átdolgozott kézikönyv, 2006, http://www.uis.unesco.org/Library/Documents/isced97-en.pdf (letöltve: 2016.11.11)

[3] *Speciális számítógéppel oktatott módszerek az elektronikai alapismeretek tantárgyainak oktatásában*, 7.1. alfejezet, SDT tananyag, http://www.sulinet.hu/ikt/docs/17_szakmacsoport/elektronika/elektronika_07.html (letöltve: 2016.11.11)

[4] CSIZMADIA B,, NÁNDORI E. (szerk.): *Modellalkotás*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2003, ISBN 963 19 4525 1, különösen a 2.1.2. alfejezet

[5] SILVA P. S., TRIGO A., VARAJAO J., PINTO T: *Simulation – concepts and application*. Organizational, Business and technological aspects of the Knowledge Society, Third World Summit on the Knowledge Society, WSKS 2010, Corfu, Greece, September 22-24, 2010. Proceedings, Part II, pp 429-434

[6] A Nyíregyházi Egyetem géppészmérnök BSc képzésében oktatott „VEM alapjai” című tantárgy keretében készített beadandó házi feladatok közül felhasználtuk Makszim Balázs, Molnár Dániel és Molnár Richárd munkáját. Tantárgyfelelős és oktató: dr. Dezső Gergely.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 71–78. 07
http://hdl.handle.net/10598/30088

POLIMER ANYAGOK LÉZERSUGARAS JELÖLHETŐSÉGE

LASER MARKABILITY OF POLYMER CABLE INSULATIONS

Dobránszky János[1], Bitay Enikő[2]

[1] *MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. Magyarország, telefon: +36 1 463 1934, Dobranszky.Janos@eik.bme.hu*

[2] *Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Șoseaua Sighișoarei 1C, Corunca 540485, Románia, telefon: +40-75-1016063, ebitay@ms.sapientia.ro*

Abstract
The paper presents laser marking experiments that were carried out on many, different colour, automotive cable insulation for determining their ability to laser marking. It was studied that how deep is the degradation caused by the laser beam, compared to the insulation thickness. Yellow, red, green and black colour insulations were marked by using a TRUMPF VectorMarc workstation, than investigated by preparing cross-sectional metallographic samples. Minimal and maximal value of the laser affected depth was 32 and 159 microns for the green and the yellow colour insulation respectively.

Keywords: *laser markability, laser marking, polymer insulation, marking depth*

Összefoglalás
A cikk azokat a kísérleteket ismerteti, amelyeket a szerzők annak érdekében végeztek, hogy meghatározzák többféle autóvillamossági kábel eltérő színű szigetelésének lézerrel való jelölhetőségét. A jelölhetőséget annak alapján értékelték, hogy milyen, az eredeti vastagsághoz mért relatív mélységbe hatolt be a lézersugár a polimer anyag roncsolódását okozva. A sárga, piros, zöld és fekete színű kábelszigetelések a TRUMPF VectorMarc munkaállomáson készített jelölések után metallográfiai keresztcsiszolatukon voltak vizsgálva.

Kulcsszavak: *lézeres jelölhetőség, lézeres jelölés, polimer szigetelés, jelölési mélység*

1. Bevezetés

A műanyagok lézersugaras jelölése talán a leginkább elterjedt lézersugaras megmunkálás. A jelölés része a tömeggyártásnak, ahol gyakran szabad szemmel nem is követhető sebességgel „folyik” a gyártmány a gyártósoron, és ebben a dinamikus folyamatban kell sokszor minden egyes terméket egyedi azonosítóval ellátni [1, 2, 3].

A jelölés hatásmechanizmusát tekintve lehet gravírozás, ablálás, hőkezelés, habosítás és hőszínezés. Az autóipari kábelek szigeteléseinek jelölésére gyakorlatilag csak a hőszínezés jöhet szóba, mivel minden más jelölési mechanizmus az anyag szerkezetének vagy mennyiségének olyan mértékű változását okozza, amely már zavarná az alapvető rendeltetést [4, 5, 6].

Természetes, hogy ebben a technológiai környezetben a jelöléssel szemben nemcsak a legalapvetőbb műszaki követelmények fogalmazódnak meg – mint pl. a láthatóság vagy a tartósság –, de a gyorsaság is. A bemutatott kísérletek az eredeti, 0,26 s ciklusidő rövidítése céljával készültek.

A hőre lágyuló műanyagok lézeres jelölése során különböző kölcsönhatások mennek végbe, és ezek közül néhány nem teljesen ismert. Az teljesen nyilvánvaló, hogy a kölcsönhatás a lézer és az anyag között számos tényezőtől függ, és a kölcsönhatás eredménye is eltérő. Például a szürke színű PA66 anyagot töltőanyag nélkül is lehetséges jelölni, de a (tűz esetén) önkioltó tulajdonságú PA66-ot talán lehetetlen jelölni.

Annak érdekében, hogy a hőre lágyuló polimer anyagokat lehetséges legyen lézerrel megjelölni, alapvető követelmény, hogy az anyag elnyelje a lézersugár által szállított energiát. Ennek hatására az anyag színe megváltozik (vagy hasonló hatás alakul ki). Az abszorpció természetesen megvalósulhat magában a polimer anyagban, de ha mégsem, akkor szükség van színezőanyagok (pigmentek) és/vagy más adalékanyagok hozzáadására.

A legtöbb, hőre lágyuló műanyagot, amely nem pigmentált (tehát színe a polimer anyag eredeti színe), nem lehet jelölni lézerrel, illetve lehet, de a jelölés láthatósága gyenge, mert az anyag nem nyeli el a lézerfényt, amelynek hullámhossza a jelölésben elterjedten használt Nd:YAG lézerforrásnál 1064 nm.

A hőre lágyuló, töltőanyag vagy pigmentek nélküli – ún. természetes hőre lágyuló polimerek – három általános kategóriába oszthatók a lézeres jelölésre való alkalmasságuk alapján:

- 1. csoport
  Olyan polimerek, amelyek jól elnyelik a lézersugárzást; ennek következtében elszenesednek (feketednek), amitől jól észrevehetően sötétebb lesz az a terület, ahol a lézersugárzás elnyelődött. Példák az ilyen anyagokra: a poliészterek (PES) és a poliszulfonok (PSU).
- 2. csoport
  Azok a hőre lágyuló polimerek, amelyek kiszámíthatatlanul nyelik el a sugárzást, ezért elszenesedésük szabálytalan, a jelölési nyomok tehát nem egységesek, azaz nem folytonos jelölés. Például az ilyen anyagok közé tartoznak a polisztirolok (PS) vagy habosítható kopolimerek közé tartozó sztirol-akrilnitril (SAN) és az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS). Ez a 2. csoport magába foglalja a sztirol- és poliészteralapú gyantákat (PET és PBT). Ha megfelelő pigmentet vagy különleges adalékanyagot is tartalmaznak, ezek az anyagok egyenletesebben jelölhetők, és kiváló minőségű jelölést is kaphatunk. Mindkét, eddig említett csoportban optimalizálható egy pigment/adalék keveréke annak érdekében, hogy a sötét háttéren olyan jelölés jöjjön létre, amelynek színe megközelíti a fehéret.
- 3. csoport
  Olyan, hőre lágyuló műanyagok, amelyeknek nagyon kicsi vagy akár el is hanyagolható a lézersugár-elnyelésük. Ez a csoport magában foglalja a PA, POM, PP, PE és a PPS polimereket. Az eredeti, színezetlen, állapotában ezeket az anyagokat nem lehet megjelölni lézerrel. Azonban egy világos színű, közel fehér jelölés készíthető sötét színű pigment hozzáadásával. Ezek a hőre lágyuló polimerek tehát a pigment színétől függően világos és sötét színű jelöléssel is elláthatók az adalékanyagok fajtájától függően.

A lézeres jelölést erősen befolyásolják a töltőanyagok, a keménységnövelő erősítők, a különleges adalékok, mint pl. az önkioltó viselkedést biztosító adalékanyagok.

Ellentétben azzal, amit gondolnánk, az üvegszálak jelenléte csak kismértékben csökkenti a (lézeres) jelölhetőséget. Lévén saját színük, bizonyos típusú töltőanyagok vagy önkioltó adalékanyagok csökkenthetik a műanyag alkalmasságát a lézeres jelölésre. Ugyanakkor bizonyos önkioltó rendszerek adalékanyagai javíthatják a lézeres jelölés kontrasztját.

2. A kísérleti anyagok és a vizsgálathoz használt eszközök

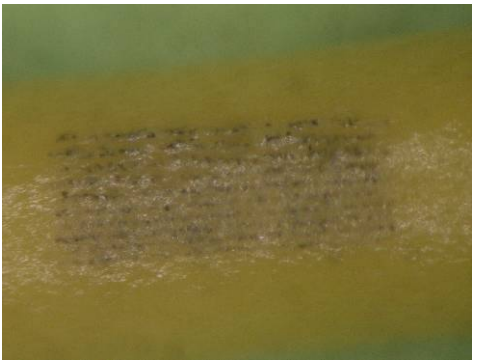
Az együttműködő ipari partnerünkkel egyeztetett és előzetesen kísérleti céllal kipróbált szakmai programnak megfelelően elvégeztük a hat különböző autóipari villamos vezeték szigetelésén a lézersugaras jelöléseket, majd az elhelyezett lézersugaras jelölések anyagvizsgálatát.

A jelek TRUMPF VectorMarc VMc 5 típusú munkaállomáson készültek, 55 kHz frekvencia, 5 µs impulzushossz és 0,05 mm átfedés alkalmazásával; a ciklusidő 120 ms.

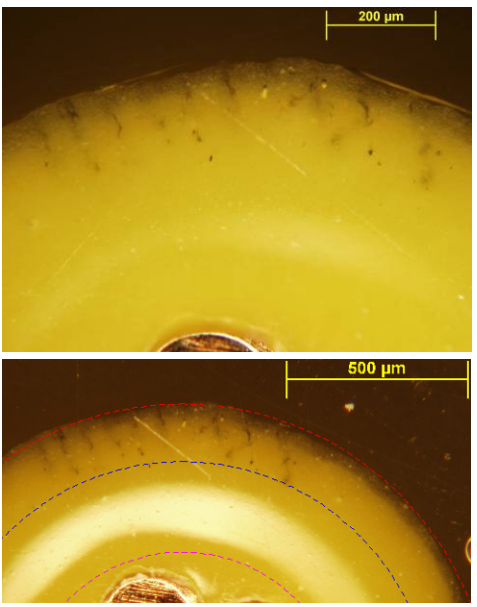
A vizsgálatok célja az volt, hogy meghatározzuk a lézersugár behatolási mélységét, hatását és az esetleges szerkezeti elváltozásokat a szigetelésnek a felület alatti zónájában. A vizsgálatokat a következő színű vezetékeken végeztük:

– sárga,
– piros,
– piros-fekete,
– zöld-sárga,
– fekete-H,
– fekete-R.

A lézeres jelölési kísérletek után a jelölések topográfiai jellemzőit Nikon SMZ-2 típusú sztereobinokuláris mikroszkóppal vizsgáltuk. A huzalok keresztcsiszolatainak optikai mikroszkópos vizsgálatát Olympus PMG-3 fémmikroszkóppal végeztük. A lézersugár behatolási mélységét a mikroszerkezeti fotókon kvantitatív képelemző módszerrel mértük.



1. ábra. *A 2×0,6 mm-es jelölés képe a szigetelés felületén*



2. ábra. *A lézersugár által érintett zóna a keresztcsiszolaton; a behatolási mélység 159 mikrométer*

3. A kísérletek eredménye

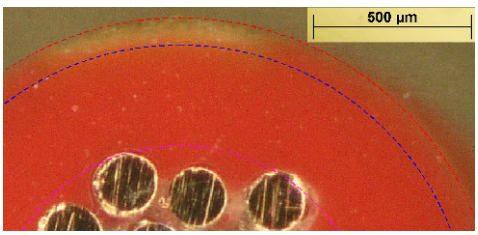
3.1. A sárga színű vezeték vizsgálata

Az **1.** és a **2. ábrán** látható a lézersugaras jelölés felületi képe, illetve a keresztcsiszolatról készített kép. A behatolási mélységet a külső szaggatott vonalig terjedő távolság jelenti. A lézersugár szűk csatornákon, de viszonylag mélyre hatol be.

3.2. A piros színű vezeték vizsgálata

A **3.** és a **4. ábrán** látható a lézersugaras jelölés felületi képe, illetve a keresztcsiszolatról készített kép. A behatolási mélységet a **4. ábrán** a szaggatott vonalak köze jelöli. A lézersugár széles csatornákon, de viszonylag kis mélységre hatolt be, a felületi kitöltés teljesen egyenletes.

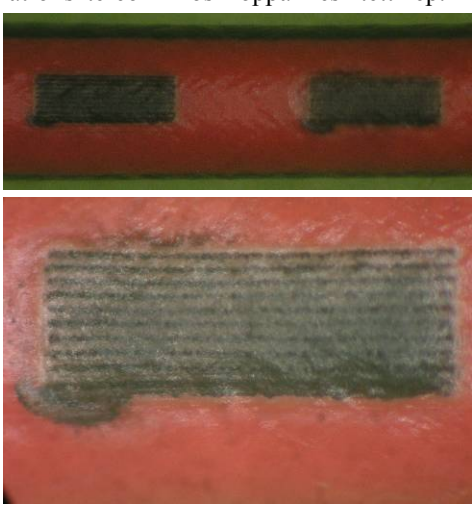
3. ábra. *A 2×0,6 mm-es jelölés képe a szigetelés felületén*



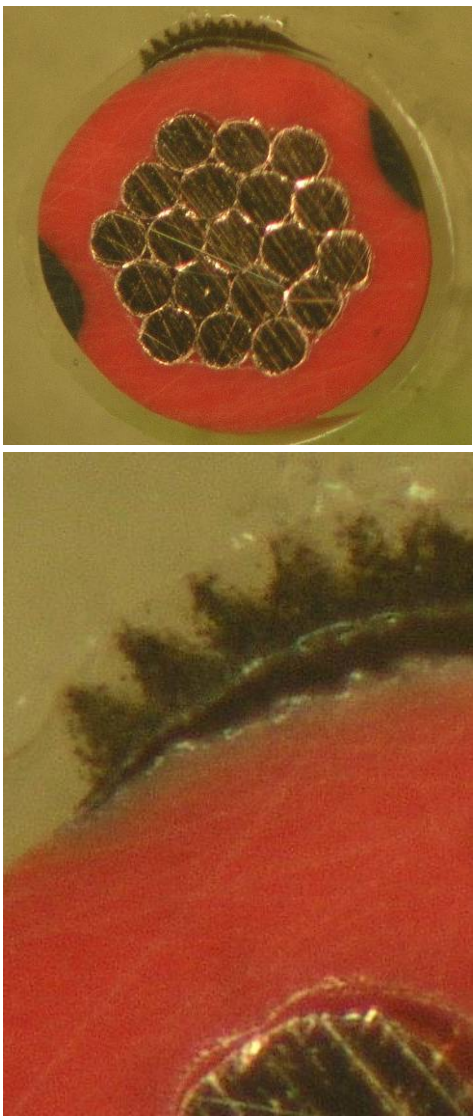
4. ábra. *A lézersugár által érintett zóna a keresztcsiszolaton; a behatolási mélység 88 mikrométer*

3.3. A piros-fekete színű vezeték vizsgálata

Az **5. ábrán** látható a lézersugaras jelölés felületi képe, a **6. ábrán** pedig a csiszolatról sztereomikroszkóppal készített kép.

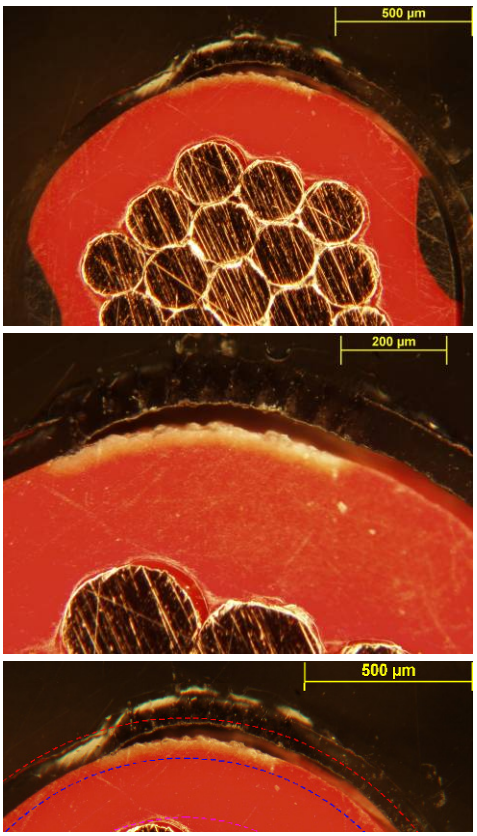


5. ábra. *A lézeres jelölés a piros színű anyag felületén*



6. ábra. *Sztereomikroszkóppal készített makrofotók a keresztcsiszolatról. Jól látható az átlátszó bevonati réteg határa is a hő okozta szétválás miatt.*

A behatolási mélységet a **7. ábrán** a szaggatott vonal jelöli. A lézersugár az átlátszó rétegben befelé szélesedő csatornákon hatolt be, és elválasztotta azt a piros színű szigetelőtől, amelyben már kicsi a behatolási mélysége.

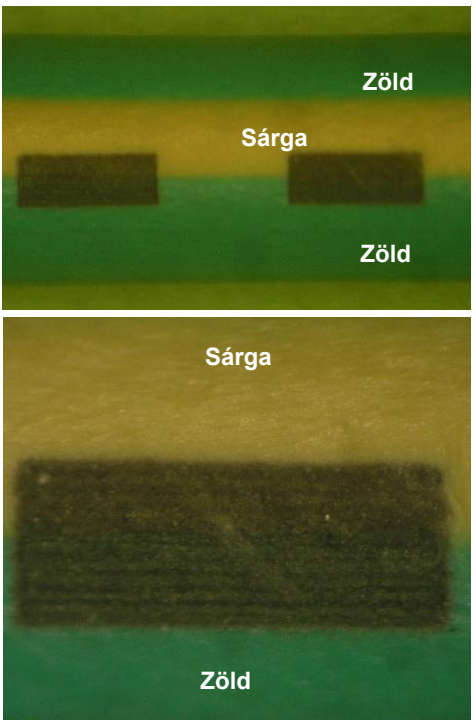


7. ábra. *Fémmikroszkóppal készített makrofotók a keresztcsiszolatról. A lézersugár behatolási mélysége 117 mikrométer*

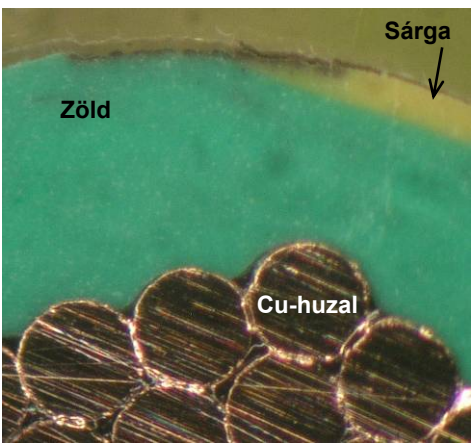
3.4. A sárga + zöld színű vezeték vizsgálata

A **8. ábrá**n látható a sárga és a zöld színű terület határára felvitt lézersugaras jelölés felületi képe, illetve a **9. ábrá**n a metallográfiai csiszolatról sztereomikroszkóppal készített kép. A behatolási mélységet a **10. ábrá**n szaggatott vonalak határolják a kétféle színű szigetelőanyagban egyaránt.

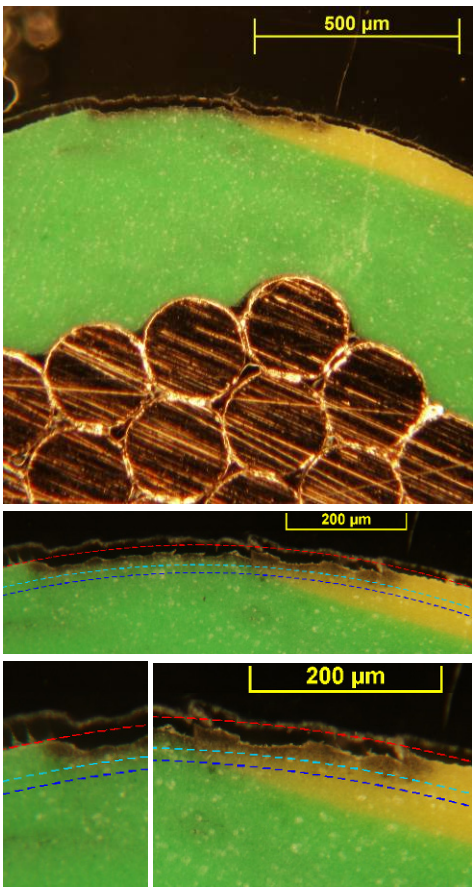
A lézersugár a sárga színű rétegben egyértelműen észlelhetően mélyebbre hatolt be, mint a zöld színű szigetelésbe, de mindkét anyagnál jóval kisebb a behatolási mélység a többihez képest.



8. ábra. *A 2×0,6 mm-es jelölés képe a szigetelés felületén*



9. ábra. *Sztereomikroszkóppal készített kép a keresztcsiszolatról. Jól látható, hogy a zöld színű műanyagban valamelyest kisebb mértékű a lézersugár által okozott látható elváltozás.*

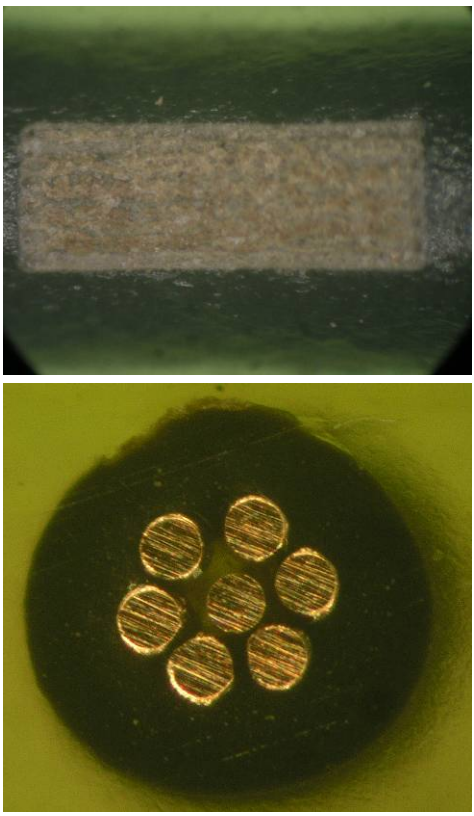


10. ábra. *Fémmikroszkóppal készült kép a lézersugárral kezelt zóna keresztmetszeti csiszolatáról. A lézersugár behatolási mélysége a zöld anyagba 32, a sárga anyagba 45 mikrométer.*

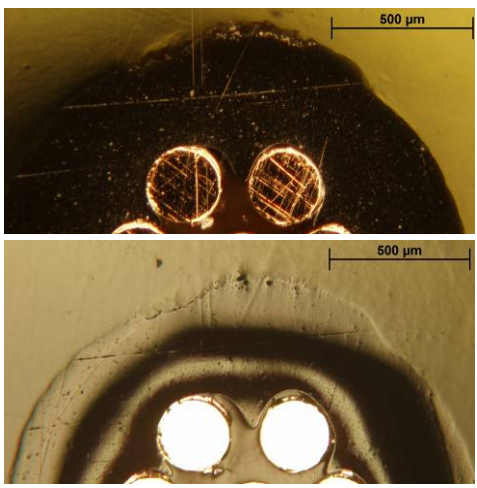
3.5. A fekete színű vezeték vizsgálata

A **11. ábrá**n látható a jelölés felületi és metszeti képe, a **12. ábrá**n a fémmikroszkóppal készített képek. A vezeték átmérője az összes közül a legkisebb (1,6 mm) volt, ezért itt már jelentősebb a téglalap alakú jelölési terület szélére és közepére beeső lézersugár beesési szögének eltérése.

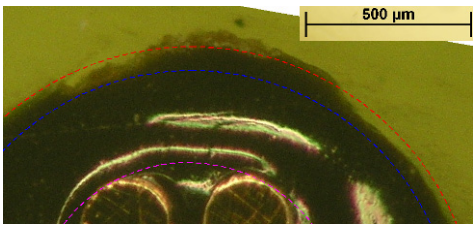
A behatolást a **13. ábrá**n szaggatott vonal jelöli. A nagyobb felületi görbületváltozás ellenére a lézersugár viszonylag egyenletesen és kis mélységre hatolt be.



11. ábra. *Makrofotók a felületről és a keresztcsiszolatról*



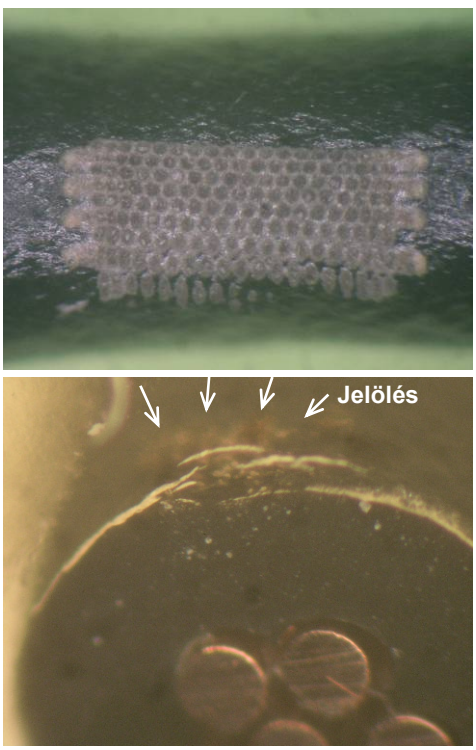
12. ábra. *Világos és sötét látóteres kép a csiszolatról*



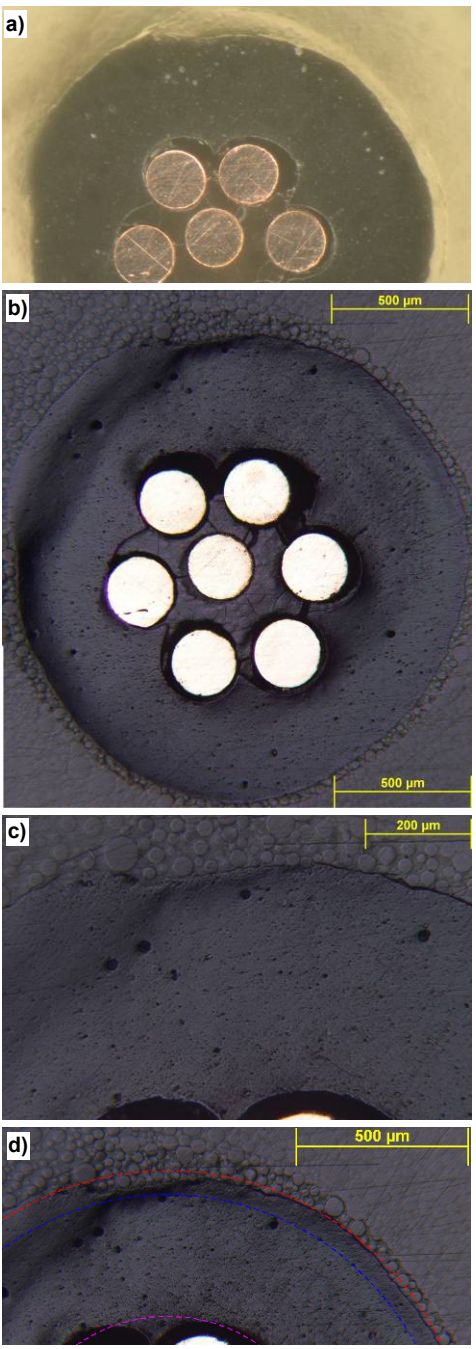
13. ábra. *A lézersugárral kezelt zóna keresztcsiszolatán látható a lézersugár behatási mélysége: 72 µm*

3.6. Fekete színű, de eltérő összetételű szigetelés jelölése

A **14. ábrán** látható a lézersugaras jelölés felületi képe, illetve a keresztcsiszolatról készített képek. A behatolási mélységet a **14.d ábrán** a két külső szaggatott vonal jelöli. A lézersugár viszonylag kis mélységre és egyenletesen hatol be.



13. ábra. *A jelölés sztereomikroszkóppal készített képe a felületről és 45°-os perspektívából*



14. ábra. *A vezeték keresztcsiszolatáról készített képek. A lézersugár behatolási mélysége 66 mikrométer*

7. Összefoglaló értékelés

Elvégezve a különböző vastagságú és színű vezetékek szigetelésén található lézersugaras jelölések vizsgálatát, bemutattuk azt, hogy milyen változások mennek végbe a szigetelőanyagok felülete alatti zónában.

A lézersugaras jelölési mechanizmusok közül a hőszínezés technológiai tartományában kívántunk maradni, ami a *3.6. alfejezet*ben bemutatott vezeték kivételével minden esetben sikeresen meg is valósult; az említett kivétel esetében már a habosítási folyamatba is belecsúszott a technológia.

Mérésekkel meghatároztuk a lézersugár hatására elváltozást szenvedett zóna mélységét is, amely mérési adatokat az **1. táblázat**ban összegezünk.

1. táblázat. *A jelölések behatási mélysége metrikus értékben és a szigetelés vastagságának százalékában megadva*

Sorsz.	Szín	Behatolás	
		µm	%
1.	Sárga	159	39,0
2.	Piros	88	21,2
3.	Piros-fekete	117	40,3
4.	Zöld-sárga	45	11,0
5.	Zöld-sárga	32	7,9
6.	Fekete-H	72	18,4
7.	Fekete-R	66	15,7

A mérési eredmények alapján egyértelműen levonható az a következtetés, hogy a lézersugaras jelölés behatolási mélysége jelentősen függ a vezetékek szigetelésének színétől és nyilvánvalóan az anyagától.

A technológiai változók szerepét nem elemeztük, mivel éppen az azok változatlansága esetén kapott eredmény az egyik fő kérdés a gyártási folyamatban. Természetesen a lézersugár behatolási mélysége tudatosan befolyásolható.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Cornish P: *Laser beam absorption and mark depth of laser marked wires*. Ref: ST0012, Spectrum Technologies Ltd. Bridgend, UK (1997)

[2] *LATI Thermoplastics laser marking*. LATI Industria Termoplastici S.p.A. Vedano Olona (2008)

[3] Bosman J: *Processes and strategies for solid state Q-switch laser marking of polymers*. Thesis Enschede, Velden, The Netherlands (2007)

[4] *The ultraviolet (UV) laser marking performance of common aerospace wire and cable constructions*. Abbreviated report, ST0057, Spectrum Technologies PLC, Bridgend, UK (2008)

[5] Zhang J, Williams C: *Development of RoHS compliance colored ptfe tape for aerospace electric wire insulation.* 60th IWCS Conference, Charlotte, USA, November 6–9, 2011, Paper 5-3.

[6] Varga B: *Lézeres jelölés alkalmazása az elektronikai termékek azonosítására*. Elektronet: elektronikai informatikai szakfolyóirat, 16 (2007:2) 32–34.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők közül Bitay Enikő kutatómunkáját a Magyar Tudományos Akadémia Domus ösztöndíjprogramja, valamint az A1-CT-TOK-12 Határon Túli Tapasztalt Oktató-kutatói Ösztöndíj támogatta.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 79–84 old.
http://hdl.handle.net/10598/30089

REAKTÍV PLAZMAPORLASZTÁSI FOLYAMAT AUTOMATIZÁLÁSA

AUTOMATION OF THE REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING PROCESS

Fekete Albert-Zsombor[1,2]

[1]*S.C. Tetronic S.R.L., 547530, Románia, Marosszentgyörgy, Wesselényi Erzsébet utca 6 szám; Tel. +40-766-649950, zsombor.fekete@tetronic.ro*

[2]*Sapientia – Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, 540485, Románia, Marosvásárhely, Segesvári út 1C; Tel. +40-766-649950; levelezési cím: zsombor.fekete@tetronic.ro*

Abstract

The reactive magnetron plasma sputtering process used to create various thin film coatings is a highly unstable process, which requires control. The aim of the paper is to present the structure of a particular multilayer hierarchical control system, which contributes to the measurement, processing, data archiving and the control of various interdependent parameters of the sputtering process. The paper presents in detail the digital communication protocol and proposes a mechanism for synchronization of different units of the distributed system.

***Keywords**: reactive magnetron sputtering, embedded systems, network, communication protocol, embedded SNTP client*

Összefoglalás

A különféle vékonyréteg-bevonatok előállítására alkalmazott reaktív magnetronos plazmaporlasztási eljárás rendkívül instabil folyamat, amely szükségessé teszi a szabályozást. A dolgozat célja egy sajátos többszintű hierarchikus irányítási rendszer felépítésének ismertetése, amely nagymértékben hozzájárul a porlasztási folyamat valamennyi paraméterének a méréséhez, feldolgozásához, tárolásához és szabályozásához. A dolgozat hangsúlyosan tárgyalja a digitális kommunikációs protokollt és az osztott rendszer elemeinek szinkronizálására javasolt eljárást.

***Kulcsszavak:** reaktív plazmaporlasztási folyamat, beágyazott rendszerek, hálózat, kommunikációs protokoll, beágyazott SNTP kliens*

1. Bevezető

A Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem marosvásárhelyi karán létrehozott és működtetett Vékonyréteg Fizika kutatólaboratórium munkatársai többnyire kopásálló nanoszerkezetű vékonyréteg-bevonatok előállítására és szerkezeti összetételének elemzésére irányuló kutatásokat végeznek. Jelen kutatás során a kitűzött cél egy irányítási hálózat kiépítése, melynek köszönhetően lehetőség nyílik az egyenáramú magnetronos plazmaporlasztási folyamat komplex vezérlési és szabályozási feladatainak leosztására folyamatközeli beágyazott rendszerekre, több szinten történő adatmentés megvalósítására, biztonsági szolgáltatások beágyazására [3], valamint a mért és számolt értékek irányítási rétegben történő

központosított elérésére folyamatirányító számítógépes alkalmazás (SCADA) révén.

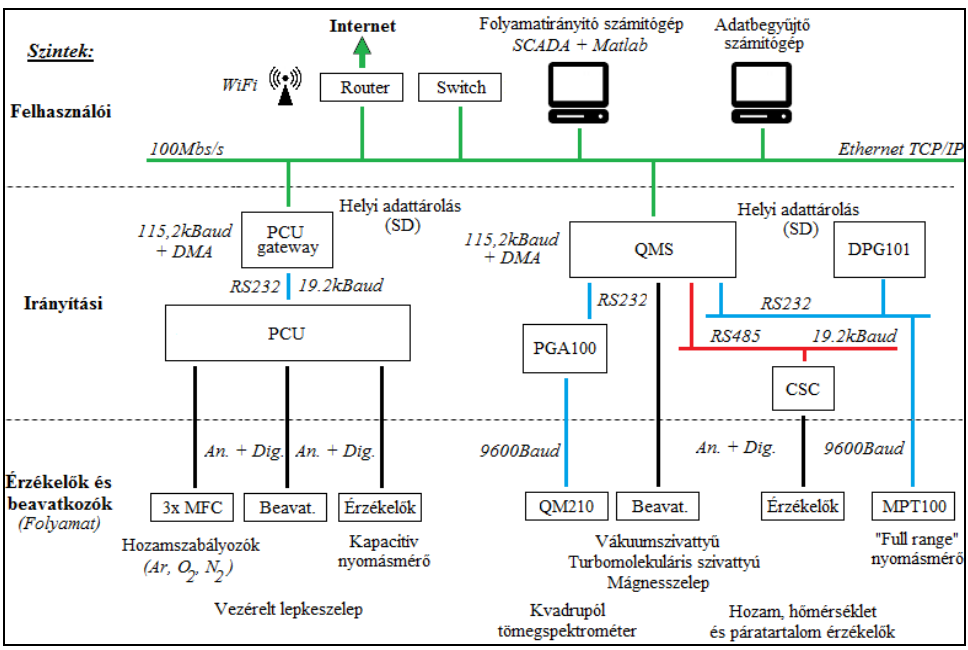
Ugyanakkor fontos kiemelnünk, hogy a vákuumrendszer szennyeződésének elkerülése végett bevezetett folyamatos vákuumozás fenntartása feltételezi a bemutatott rendszerek közel 70%-ának szünetmentes üzemelését, így a beágyazott rendszerek megfelelő hűtésének biztosítása mellett a redundanciákra épülő védelmi rendszer [3] bevezetése is kulcsfontosságú.

2. Kísérleti berendezés

A porlasztóberendezés felépítésében részt vevő és a hierarchikus rendszer kialakítása során használt elemek közül a legfontosabbak: a gázelegy összetételének meghatározására használt kvadrupól típusú tömegspektrométer (Leybold–Heraeus QM210 és PGA100), kapacitív (Pfeiffer Vacuum CMR365), Pennig és Piráni (Pfeiffer Vacuum MPT100) típusú nyomásmérők, a lepkeszelep beavatkozó (Futaba S3152 szervóhajtás és Hengsler RI41 enkóder), a hőmérséklet- (DS18S20), hűtővízhozam- és páratartalom-érzékelők (SHT11), a három gázhozamszabályozó (SEC 400), a vákuumrendszer felépítésében részt vevő különféle elővákuum és turbomolekuláris szivattyúk (Osaka Vacuum H5000F), és a felsőbb szinteken lévő beágyazott saját fejlesztésű vezérlőegységek, mint például a dinamikus nyomásszabályozó (PCU), a tömegspektrométer vezérlő (QMS), valamint a hűtési és védelmi feladatokat ellátó beágyazott rendszer (CSC) [3].

A kiépített osztott rendszer elemei, ahogyan az **1. ábrán** is megfigyelhetjük, egy többszintű hierarchikus rendszerbe szerveződnek:

– felhasználói szint;
– irányítási szint;
– érzékelők és beavatkozók szintje.



1. ábra. *A reaktív plazmaporlasztási folyamat szabályozására kialakított többszintes hierarchikus irányítási rendszer felépítését szemléltető tömbvázlat*

Minden réteg jól meghatározott és elkülöníthető feladatot lát el. Ennek fényében kiemelhetjük, hogy a folyamatközeli rétegek szintjén vannak megoldva a mérési, beavatkozási és irányítási feladatok, valamint a lokális microSD adathordozóra, rendszerint a szabályozó mintavételi frekvenciájával történő adatmentés. Felfele haladva, bár nő az adatátviteli sebesség és a cserélt adatmennyiség, a válaszidő pontos meghatározásának lehetősége csökken. Ennek magyarázata a *2.2 alfejezet*ben olvasható.

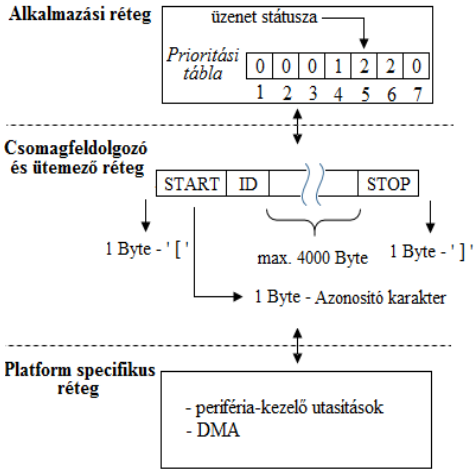
2.1. Kommunikációs protokoll

A megvalósított osztott rendszer esetében szükségessé vált egy egységes kommunikációs protokoll és csomagszerkezet kidolgozása, amely használható szinkron és aszinkron soros kommunikáció, valamint Ethernet hálózaton küldött TCP csomagok esetében egyaránt, hardver platformtól és adatmérettől (6B..4kB) függetlenül.

A javasolt megoldás egy többrétegű függvénycsalád, amelynek felépítését a **2. ábrá**n láthatjuk. A kialakított függvények három, jól elhatárolható rétegbe szerveződnek:

– alkalmazási vagy felhasználói réteg;
– csomagfeldolgozó és ütemező réteg;
– platformspecifikus réteg.

Az algoritmus adaptalása különböző számítástechnikai eszközökre csupán a legalsó rétegben lévő hardverspecifikus utasítások és függvények lecserélését feltételezi. Amennyiben a beágyazott rendszer (rendszerint fejlettebb architektúrával rendelkező mikrovezérlővel ellátott elektronikai áramkör) tartalmaz Direct Memory Access (DMA) meghajtót, akkor az algoritmus automatikusan függetleníti a processzortól a kommunikációs periféria és a belső RAM memória közötti adatcserét. Ennek eredményeképpen a kialakított protokoll beágyazható 8, 16 vagy 32 bittes architektúrával rendelkező mikrovezérlőkbe, valamint alkalmazható a folyamatirányító számítógépen futtatott SCADA és Matlab alkalmazások esetében is.



2. ábra. *Kommunikációs protokoll – platform független többrétegű függvénycsalád felépítése*

Haladva felfele a következő réteg felelős a kimenő üzenetek összeállításáért, valamint a bejövők feldolgozásáért és az így kapott adatok RAM-ban lévő adatstruktúrákba történő tárolásáért. Voltaképp ezen a szinten definiáljuk a változó méretű csomagszerkezeteket. A típusazonosító (**2. ábra** – ID) alapján nemcsak az üzenet mérete és feldolgozási módja határozható meg, hanem a céleszköz is. Ezáltal az osztott rendszer bármely pontjába küldhető adatcsomag, függetlenül az adatátviteli közegtől és a köztes csomópontok számától. A felhasználói rétegben belső időzítők és a prioritási tábla segítségével kiválasztható az adott sorszámú csomag küldési módja: 0 – nem küldjük el, 1 – csak egyszer küldjük el, 2 – minden üzenetküldési ciklusban elküldjük. A kialakított struktúrának köszönhetően egy időben több üzemmód is megvalósítható:

– <u>ciclikus küldés</u> testre szabható küldési frekvenciával, többnyire a mért értékek (32B..4kB) és a védelmi rendszer állapotjelzői számára fenntartott üzemmód (~6B);

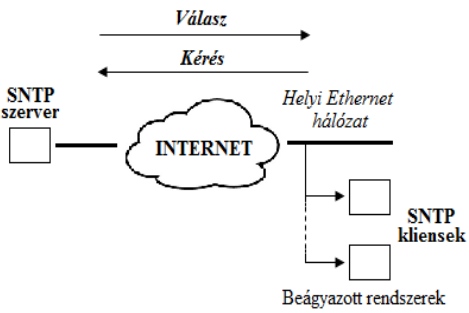
– aciklikus küldés állapotok számára, azaz csak változás esetén kerül elküldésre a kívánt állapot;
– kérésre történő egyszeri küldés, mint például a tömegspektrométer konfigurációs állományának (~1kB) vagy a referenciaértékeknek (5B..0,5kB) a küldése.

A küldési frekvenciát egyértelműen a mért paraméter változási sebessége és a mintavételi periódus határozza meg, amely 40 ms és 2-3 s között változhat. Ezen üzemmódok együttes alkalmazásának segítségével az adatforgalom optimalizálását kívántuk elérni, elkerülve a fölösleges adatforgalmat.

2.2. Szinkronizálás – SNTP kliens

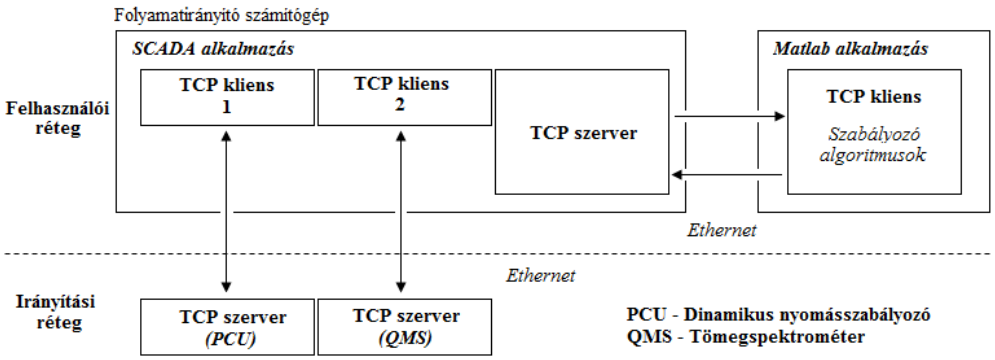
Osztott rendszerek esetében használt kommunikációs hálózatoknál felmerülnek időzítési és szinkronizációs problémák. Megfigyelhetjük, hogy a folyamatközeli szinteken használt aszinkron RS232, valamint a mester-szolga kialakításban működtetett RS485 lokális hálózatok esetében nem jelennek meg ütközések, hiszen egy időben csak egy egység használja az adatátviteli közeget, és ennek eredményeképpen nem beszélhetünk vonalhozzáférési hibák megjelenéséről. Ismerve a helyi hálózatok adatátviteli sebességét, az üzenetek küldési frekvenciáját, a csomagok méretét, valamint az optikai leválasztók által behozott B/ns nagyságrendű késéseket könnyedén meghatározható az üzenetek érkezési frekvenciája, amely időben állandó. Ennek eredményeképpen az irányítási rétegben kerültek implementálásra a gyors szabályozóhurkok, mint például a három gázhozamszabályozó [1], valamint az adaptív PID és Fuzzy szabályozási struktúrákkal megvalósított dinamikus nyomásszabályozás [1]. Az elmondottak a felhasználói szinten lévő Ethernet hálózatra nem érvényesek, hiszen a TCP csomagok formájában küldött adatok esetében biztosítani tudjuk az üzenetek megérkezését, azonban változó a küldés és fogadás között eltelt idő. Ez a jelenség többnyire az adatátviteli közegben fellépő ütközéseknek tulajdonítható, más szóval függ a hálózat terhelési fokától.

Annak érdekében, hogy a SCADA alkalmazás időrendi sorrendbe tudja rendezni a két vezérlőegységtől kapott csomagokat, minden üzenet felhasználói része tartalmaz egy sajátos időbélyeget. Ezen eljárás csak akkor működik, ha a két beágyazott rendszer belső számlálói szinkronizálva vannak. Erre a feladatra egy SNTP („*Simple Network Time Protocol*”) kliens alkalmazás beágyazását [2] valósítottuk meg a mikrovezérlős rendszerekbe.



3. ábra. *Beágyazott SNTP szolgáltatás működési elve*

Az SNTP kliens oldali szolgáltatás a TCP/IP referenciamodell alkalmazási rétegében helyezkedik el, és minden 10 percben kérést küld (**3. ábra**) egy megadott időszervernek, amely visszatéríti az aktuális időt Coordinated Universal Time (UTC) formátumban [2]. Megfelelő feldolgozás után, amennyiben eltérés mutatkozik a kapott és a mért idő között, a belső időzítő automatikusan újraszinkronizálódik. Sikertelen kapcsolódás esetén a kliensalkalmazás más időszerverek elérésével próbálkozik, egy körlistában megadott információk alapján [2]. Internethozzáférés hiányában a SCADA alkalmazás a rendszer elindulásának pillanatában kiküld egy szinkronizációs üzenetet, amely hasonló szerepet tölt be, mint az időszerver által visszatérített pontos UTC idő.



3. ábra. *Kiépített TCP kapcsolat SCADA alkalmazás és háttérben futó Matlab alkalmazás között*

2.3. A számítási kapacitás növelése – beágyazott Matlab alkalmazás

Mivel a reaktív plazmaporlasztási folyamat egyes paramétereinek szabályozása komplex irányítási struktúrák használatát feltételezi, az információs rétegben kiépült egy TCP kapcsolat egy háttérben futó Matlab alkalmazás és a SCADA rendszer között, azzal a céllal, hogy stabilan működő környezetet lehessen biztosítani a számításigényes algoritmusok lefuttatásának. Ezen eljárás kiváló tesztfelületet biztosít fejlesztési folyamatok során, hiszen Matlab környezetben online futtatni tudunk egy időben akár több szabályozási algoritmust is. Ez esetben az osztott rendszer mindhárom rétegén keresztül zárulnak a lassú szabályozási hurkok (T_s >=1s), mint például a porlasztási folyamat során használt reaktív gázok parciális nyomásainak szabályozása.

Egyedüli megkötés tehát, hogy a választott mintavételezési periódus, amelyet az adott folyamatközeli beágyazott rendszer időzít, nagyobb kell legyen, mint az osztott rendszer mérésekre alapozott maximális válaszideje, amely tartalmazza természetesen a vezérlőjel kiszámításának idejét is. Az utóbbi függvénye a választott szabályozási struktúra összetettségének, valamint a központi számítógép hardverkonfigurációjának. Figyelembe véve az **1. táblázat**ban összefoglalt, mérésekre alapozott három rétegen keresztül történő, pár száz miliszekundumos üzenetküldési periódusokat, valamint a lassú folyamatok másodpercnél nagyobb mintavételelezési periódusát, a javasolt beágyazott Matlab környezet alkalmas a nagyobb számításigényű szabályozási struktúrák lefuttatására.

3. Mérési eredmények

A mérések többnyire a kialakított többszintes rendszer adatátviteli sebességének meghatározására, valamint a különböző üzenettípusok küldési frekvenciájának ellenőrzésére irányultak. Az idők mérésére a használt számítástechnikai eszközök (számítógép – SCADA alkalmazás, beágyazott mikrovezérlős alegységek – QMS, PCU) szolgáltak. Elmondhatjuk, hogy a kialakított hálózat felhasználói és irányítási rétegei között elérhető egy maximális 1Mbps-os adatátviteli sebesség, úgy hogy a beágyazott mikrovezérlők egy közel 20%-os számítási kapacitástartalékkal rendelkeznek. Természetesen az **1. táblázat**ban bemutatott, jellegzetesebb felhasználói üzenetek küldési periódusaiból egyértelműen látni lehet, hogy a hálózat nincs maximális kapacitással kihasználva. Ez részben a bemutatott üzenetküldési módoknak, valamint az adott mérő- és beavatkozóegységek mintavételezési periódusainak tudható be.

1. táblázat. *A jellegzetesebb felhasználói üzenetek küldési periódusai*

Üzenet	Réteg	Küldési típus	Periódus
Dinamikus nyomás (**20B**) *(MPT100)*	1,2	ciklikus	40 ms
Dinamikus nyomás (**30B**) *(MPT100)*	1,2,3	ciklikus	400 ms
Védelmi rendszer (**16B**) (*CSC*)	1,2 / 1,2,3	ciklikus	100 ms / 400 ms
Nyomás-szabályozó (**30B**) (*PCU*)	1,2 / 1,2,3	ciklikus	200 ms / 500 ms
Tömegspektrométer - *SCAN* (**4kB**)	1,2 / 1,2,3	kérésre	24s..10 perc*
Tömegspektrométer - *1 csatorna* (**160B**)	1,2 / 1,2,3	ciklikus	0,3s..3s/ 0,4s..3s *

* *Megjegyzés:* A küldési periódust meghatározza a tömegspektrométer konfigurációs állománya.

A bemutatott rendszerben közel 40 különböző felhasználói üzenetet, valamint együttesen 60 mérési eredményt, származtatott értéket, rendszer- és hibaállapotot különböztetünk meg.

4. Következtetések

A bemutatott saját fejlesztésű és a gyakorlatban is megvalósított rendszerek a porlasztóberendezés mérő és vezérlő alegységeinek közel 40%-át teszik ki. Következtetésképpen elmondhatjuk, hogy az időzítési és szinkronizálási problémákra talált megoldások, a bevezetett könnyen adaptálható csomagszerkezetek, a mérési eredmények, valamint a megvalósított beágyazott rendszerek és ezek többszintes architektúrába való szervezése lehetővé teszik a porlasztási folyamat valamennyi paraméterének mérését és szabályozását. Fontos kihangsúlyoznunk, hogy a megbízhatóan és az előírásoknak megfelelően működő osztott rendszer, valamint a folyamat utólagos kiértékelésére bevezetett több szinten történő adatmentés mind hozzájárul a folyamat megismételhetőségének biztosításához.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti dr. Kelemen András, dr. Bíró Domokos, dr. Papp Sándor és drd. Jakab-Farkas László urakat a bemutatott rendszer kialakítása során nyújtott nélkülözhetetlen segítségükért.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Fekete A. Zs., Papp S.: *Modeling of dynamic and partial pressures in reactive sputtering processes*. In Proceedings The 6th edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference, University of Tîrgu Mureş, Romania, 2012, pp. 249–253

[2] *** TCP/IP programcsalád leírása: *Microchip TCP/IP Stack Help* (verzió: 5.42.08 - 2013), pp. 465–470

[3] Fekete A. Zs., Jakab-Farkas L.: *Development of an embedded system for accessing mass spectrometry measurements through Ethernet network.* Proceedings of the XXIth International Scientific Conference of Young Engineers, Cluj-Napoca, Romania, March 17-18, pp. 161–164

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 85–90. 09
http://hdl.handle.net/10598/30090

A RECCS 2016 TAPASZTALATAI

THE EXPERIENCE OF THE RECCS 2016

Gobesz Ferdinánd-Zsongor

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezetmechanikai Tanszék, Cím: 400020 Románia, Kolozsvár, C. Daicoviciu (Bástya) u. 15; Telefon: +40-246-401351, go@mecon.utcluj.ro

Abstract
The third year students of the Civil Engineering Faculty from Cluj-Napoca participated with two teams at the „RECCS 2016 – World Championship in Spaghetti Bridge Building" organized by the Óbuda University, winning the first and the third place in the Bridge category. Comparing the measurements of the break tests with our structural analysis, it turned out that, during the design of such rigid and fragile structures, paying attention to get smaller deformations is more important than checking internal forces.

Keywords: *spaghetti bridge, competition, engineering education.*

Összefoglalás
A kolozsvári Építőmérnöki Kar harmadéves hallgatói két csapattal vettek részt az Óbudai Egyetem által szervezett „RECCS 2016 – tésztahídépítő világbajnokság"-on, első és harmadik helyet szerezve a híd kategóriában. A töréspróbák méréseit és a számításainkat összevetve kiderült, hogy e merev és törékeny alkotások tervezésénél fontosabb a minél kisebb alak változásra, mint az erők játékára figyelni.

Kulcsszavak: *tésztahíd, verseny, mérnöki oktatás.*

1. Bevezetés

A RECCS egy igen rangos és népszerű magyarországi tésztahídépítő verseny, melyet 2005-ben hirdettek meg először „*RECCS 2005 – Kárpát Medencei Tésztahíd Építő Verseny*"-ként, majd 2010-ben „*Közép Európai Tésztahíd Építő Verseny*" lett [1]. A kezdetei az Ybl Miklós Műszaki Főiskolai Kar vetélkedőjéhez kötődnek, melybe 2004-ben a Bánki Dónát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar (akkor még Bánki Dónát Műszaki Főiskola) hallgatói is bekapcsolódtak. Eredményeiken felbuzdulva, nagy lelkesedéssel indították 2005-ben a RECCS-et, melyen eleinte négy ország hallgatói vettek részt (Magyarország, Románia, Szlovákia és Szerbia), majd 2010-ben Olaszországból és Iránból is érkeztek résztvevők. A RECCS 2011-ben az Óbudai Egyetem által szervezett „*Tésztahíd Építő Világbajnokság*"-gá nőtte ki magát, melyen már 9 ország (Irán, Lettország, Magyarország, Németország, Olaszország, Portugália, Románia, Szerbia és Szlovákia) több egyetemének és főiskolájának a csapatai vettek részt [1]. Immár 2 kategóriában (híd meg tartó) folyt a verseny a teherbírás tekintetében, de innovációs meg esztétikai díjakat is osztottak. A Kolozsvári Műszaki Egyetem építőmérnök hallgatói is ez alkalommal vettek részt először a RECCS-en,

azóta rendszeresen jelen voltak, és a sorozatosan évente megrendezett világbajnokságokon gyűjtött tapasztalatok bizonyítékaként egyre jobb eredményeket értek el.

A tésztahídépítésnek kevésbé ismert, de szép és gazdag hagyománya van világszerte, Kanadától Ausztráliáig [2]. Nem tudni pontosan, hogy mikor és hol kezdtek el ilyen szerkezeteket építeni (egyes feltételezések szerint az 1960-as évek végén Angliában), de az első komoly verseny a kanadai Okanogan College nevéhez fűződik. 1983-ban hirdették meg az első ilyen nyitott mérnökhallgatói vetélkedőt, majd 1988-ban vezették be a nehézsúlyú osztályt, megkülönböztetve a tésztaszerkezeteket méreteik (és teherbíró képességük) alapján.

A RECCS is e nehézsúlyú osztály jellemzői alapján alakította ki a versenyszabályzatát (röviden: 1000 *mm*-es távolság a feltámasztási pontok között, 600 *mm*-ig engedett magasság és 130 *mm*-ig engedett szélesség, illetve 1000 *g* maximális ősztömeg), különbséget téve a futófelülettel rendelkező hidak meg a futófelület nélküli tartók között [1]. A törésprobák során a száraztésztából és ragasztóból készített szerkezeteket középen lefelé húzó növekvő erőnek vetik alá, folyamatosan mérve a terhelést és a függőleges elmozdulást. A végső teherbírást az összeroppanás előtti pillanatban rögzített erő értéke adja, ennek alapján jutnak helyezéshez a versenyző csapatok.

A Kolozsvári Műszaki Egyetem csapatai az Építőmérnöki Kar hallgatói közül verbuválódnak. A világbajnokságon való részvételhez át kell esniük legalább egy helyi versenyen. A 2016 tavaszán rendezett kari vetélkedőkre eleinte 7 csapat iratkozott fel, de a végén csupán 2 csapat bizonyított (a harmadéves hallgatókból álló „Kamikaze” és „Musztáng”), mindkettő túlszárnyalva a 410 *kg-erő* (402 *daN*) küszöbét a végső teherbírás tekintetében.

A tésztahídépítés folyamata mérnöki feladatként van kezelve. A kezdeti elképzelés után (aminek a verseny szabályzatából eredő méretek és tömegkorlát meg a különféle tésztafajták mechanikai jellemzői adják az alapját) szerkezeti modellezés és számítás következik. Amikor megfelelőnek tartja a modell jellemzőit és viselkedését a csapat, akkor sablonok és segédeszközök tervezése következik. Ezt követi a szükséges anyagok beszerzése, selejtezése, majd kezdődhet az építés.

Eddigi tapasztalataink szerint a pontos és gondos kivitelezés fontosabbnak bizonyult a modellezésnél meg a szerkezeti számításnál. Előző években folytatott sorozatos kísérletek után a húzott elemekhez spagettit, a nyomottakhoz pedig rövidre vágott és csiszolt penneket használnak, ezek átlagos teherbírási jellemzői az alábbi táblázatokban vannak röviden feltűntetve.

1. táblázat. *Szakításra mért értékek átlagai a spagettiszálak esetében [3]*

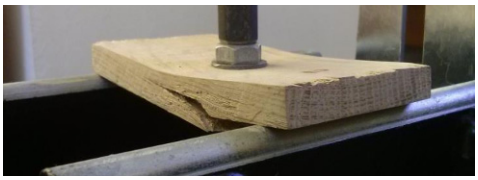
Spagettiszál	Hossz [*mm*]	Erő [*N*]
1	150	40-60
1	470	50
2	460	90
4	480	150
6	485	230
9	450	390
12	460	500

2. táblázat. *Nyomásra mért értékek átlagai a toldott pennedarabok esetében [3]*

Pennetoldás	Hossz [*mm*]	Erő [*N*]
2	50	-1600
4	95	-1200
6	125	-900
6	165	-600

A tésztahidak egyik fontos része a terhelőelem, mely egy 100×50×10 *mm*-es falemezből áll (**1. ábra**), melynek a közepén 9 *mm*-es furatban 8 *mm*-es szemes csavar van,

alátéttel és csavaranyával rögzítve. A megfelelő fafajta kiválasztásához szintén sok kísérlet vezetett. Szemléltetésként csupán háromféle falap jellemzőit összegeztük a **3. táblázat**ba. Nyilvánvaló, hogy a három közül az akác a legerősebb (és a legrugalmasabb), de nem szabad figyelmen kívül hagyni a rostok irányát a falapokban.



1. ábra. *Egy terhelőelem töréspróbája [4].*

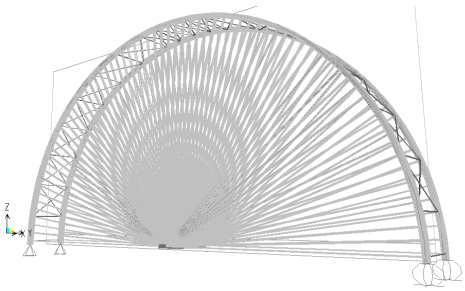
3. táblázat. *Hajlítási eredmények a fa terhelőelemek töréspróbáiból [4]*

Fafajta	Lehajlás [*mm*]	Erő [*N*]
Lucfenyő	6,90	1684
Bükk	7,45	2985
Akác	13,00	5678

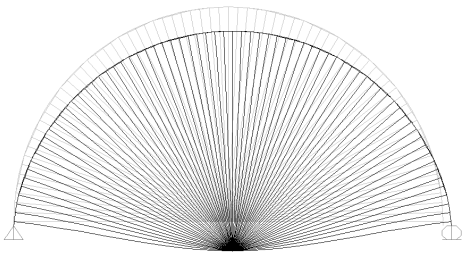
2. Előzetes számítások, tervezés és tesztelés

A szabályszerűen elkészített szerkezetek számítási modelljeinek statikai vizsgálata diszkrét központi húzóerőkre történt, különkülön: 450, 500, 550, majd 600 *kg-erő*re (mivel a híd kategóriában 570,3 *kg-erő*, a teró kategóriában pedig 578,2 *kg-erő* jelent világcsúcsot eddig [1]). A helyi selejtezőkre tervezett tésztahidak elméleti vizsgálatát a **2.** és **3. ábra** meg a **4. táblázat** szemlélteti.

Mivel a ragasztott csomópontok és a terhelőelem (falap) anyagának a modellezése végtelen-merevként történt, nem volt eltérés a lineáris rugalmas meg a geometriailag nem lineáris (nagy elmozdulásokat figyelembe vevő) szerkezeti vizsgálat eredményei között.



2. ábra. *A helyi versenyre tervezett szerkezetek számítógépes modellje térbeli nézetben*



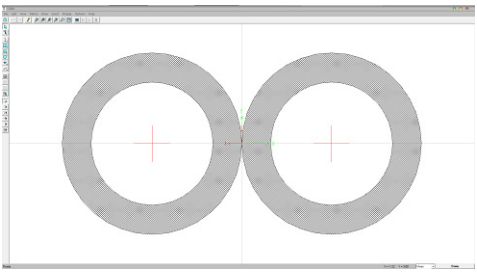
3. ábra. *A tésztahíd szerkezeti modelljének az alakváltozása központi húzásra*

4. táblázat. *A két azonos tésztahíd számítási eredményei, soronként az említett húzóerőkre. A kihasználtság %-ban értendő.*

Bekötők [*daN*]	Ívek [*kN*]	Süllyedés [*mm*]	Kihasználtság	
			Bekötők	Ívek
Terhelés [*kg-erő*]: 450				
5,01	-1,11	9,08	55,7	61,7
Terhelés [*kg-erő*]: 500				
5,56	-1,23	10,08	61,8	68,3
Terhelés [*kg-erő*]: 550				
6,11	-1,35	11,09	67,9	75,0
Terhelés [*kg-erő*]: 600				
6,67	-1,47	12,10	74,1	81,7

A páros spagettikből készült bekötők szakítóértékeként az **1. táblázat** 3. sorában található 90 *N* értéket, a párosan illesztett pennékből készített íveknél (**4. ábra**) pedig a **2. táblázat** 3. sorában látható 900 *N* nyo-

más kétszeresét vettük számításba a kihasználtsághányad megállapításánál.



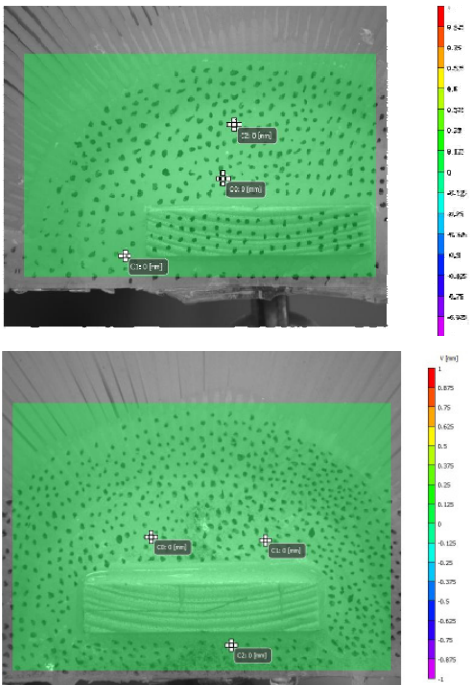
4. ábra. *A párosan illesztett pennékből tervezett ívek metszeti modellezése*

A **4. táblázat**ban látható adatokból úgy tűnik, hogy a számított modell még nagyobb terhelést is bírna, hiszen 600 *kg-erő* esetén a szerkezet alkotóelemei 75–80%-ban érnék el a végső teherbírásukat. Az alakváltozások mérete viszont intő jel, hiszen a ragasztott száraztészta ridegen viselkedik, kevésbé tűri a hajlítást.

5. ábra. *Kép a helyi selejtezőről, a használt berendezésekkel (törőállvány és mérőműszerek)*

A gyakorlati töréspróbákra a fenti megfontolásokból elmozdulásmérő rendszert is alkalmaztunk (egy 75 *mm*-es Pentax lencséjű, 2448×2048-as felbontású, másodpercenként 75 keretet rögzítő Sony IMX250-es kamerával, amit egy VIC-2D digitális képkorrelációs mérőrendszerhez csatlakoztattunk), mint az **5.** és **6. ábra** szemlélteti.

A két csapat azonos geometriájú (a **2. ábrá**n látható) szerkezetekkel jelentkezett, így a teherbírásbeli különbség csupán a kivitelezési pontatlanságokból adódhatott.



6. ábra. *A digitális képkorrelációs rendszerhez szükséges pontok kijelölése (az elmozdulások kiszámításához) a két híd terhelőelemén él*

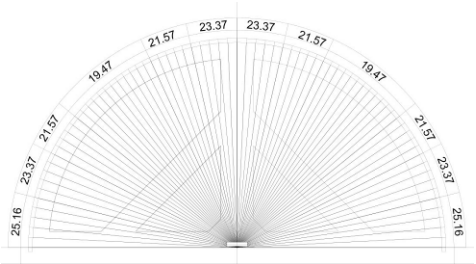
Az elmozdulásmérő rendszer alkalmazása nagyon szerencsésnek bizonyult, mert – bár a törőállványunk húzórendszere 800 *kg-erő* feletti terhelésre volt kivitelezve – 410 *kg-erő*nél lefagyott a húzórendszer, mindkét alkalommal. Így az esetleges balesetek elkerülése végett várnunk kellett, amíg a tésztahidak szétroppantak.

A végső teherbírást utólag, mindkét esetben, 440 *kg-erő* körüli értékre becsültük az elmozdulásmérő berendezés által rögzített adatok kiértékelése alapján.

3. Megmérettetés a RECCS-en

A RECCS 2016-ra e két csapattal jelentkeztünk. A „Mesztáng” ugyanolyan geometriájú szerkezettel indult, mint ami-

lyent a helyi vetélkedőre épített, míg a „Kamikaze” egy áttervezett geometriájú tésztahíddal (**7. ábra**) próbálkozott.



7. ábra. *A „Kamikaze” csapat által használt új sablon, váltakozó küllőkiosztással*

5. táblázat. *Az újabb híd számítási eredményei, soronként a feltűntetett terhelésre. A kihasználtság itt is %-ban értendő*

Bekötők [*daN*]	Ívek [*kN*]	Süllyedés [*mm*]	Kihasználtság	
			Bekötők	Ívek
Terhelés [*kg-erő*]: 450				
5,34	-1,11	8,99	59,3	64,7
Terhelés [*kg-erő*]: 500				
5,93	-1,23	9,98	65,9	68,3
Terhelés [*kg-erő*]: 550				
6,52	-1,35	10,98	72,4	75,0
Terhelés [*kg-erő*]: 600				
7,12	-1,47	11,98	79,1	81,7

A **4.** és **5. táblázat** értékeiből észlelhető, hogy a változatos küllőkiosztás nem okoz számottevő eltérést a bekötők meg az ívek igénybevételében (bár az új híd esetében a bekötők meg az ívek kihasználtság hányada közelebb került egymáshoz). Az ívekben szinte azonos nyomás keletkezik, olyannyira, hogy *KN*-ban kifejezve azonosak az értékek, de a terhelési pont úthossza az újabb modellnél csökkent (mind az 5 erő értékére).

Mindkét hidat Budapesten, az Óbudai Egyetem által rendelkezésre bocsátott munkahelyiségben építették meg a csapatok 5 nap leforgása alatt.

8. ábra. *Tésztahidak építése a munkahelyiségben*

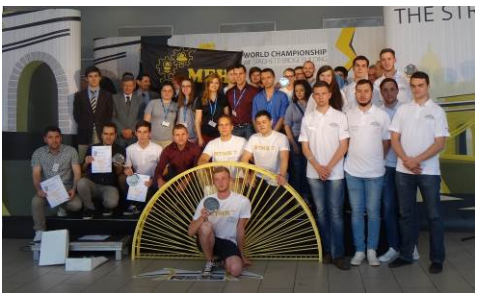
A 2016-os világbajnokságon hét ország (Bulgária, Irán, Lettország, Litvánia, Magyarország, Románia és Törökország) felsőoktatási intézményeiből érkezett csapatok vettek részt. A szervezők az előzetes elbírálás után 6 híd és 10 tartó nevezését fogadták el.

9. ábra. *Verseny közben szétrobbanó tartó [1]*

A legjobb eredményt a lettországi Rigai Műszaki Egyetem „Stiks 7” csapata (Lubgans Lauris, Lodītis Lauris és Zeps Kristaps) érte el 468,8 *kg-erő*vel a tartó kategóriában. A harmadik helyet is ők szerezték meg, míg a második helyen az Óbudai Egyetem csapata végzett [1].

A híd kategóriában a kolozsvári „Kamikaze” csapat (Zajzon Csaba, Szász Gábor, Ambrus Lénárd és Bálint Róbert) lett a nyertes 455,3 *kg-erő* végső teherbírással, második helyen a törökországi Atatürk Egyetem csapata végzett, míg a szintén kolozsvári „Musztáng” csapat (Veres Le-

vente, Balázs Levente, Takács Edmond és Kiss Tekla) 430,9 *kg-erő*vel érdemelte ki a harmadik helyet [1].



10. ábra. *Csoportkép a RECCS 2016 díjazott csapataival (fehér trikóban középen a rigai „Stiks 7" csapat, jobboldalt pedig a kolozsvári „Musztáng" és „Kamikaze" csapat látható).*

4. Következtetések

A RECCS honlaprendszerén [1] közzétett adatok szerint a nyertes „Kamikaze" csapat hídjánál a terhelési pont gyakorlatilag 9-10 *mm*-nyi utat tett meg a vonólánc megfeszülésétől a tésztahíd szétroppanásáig, míg a „Musztáng" csapat hídjánál ez valamivel kevesebb, 8-9 *mm* körüli érték volt. Kolozsvárra visszatérve újravizsgáltuk a két szerkezet modelljét, hogy értékelni tudjuk a kivitelezések pontosságát és a megépített tésztahidak viselkedését a RECCS-en elért eredmények tükrében.

A „Kamikaze" csapat hídja 455,3 *kg-erő* terhelésre 9,09 *mm* lehajlást eredményezett (a maximális erők értéke 1119,7 *N* nyomás volt az ívekben és 54,04 *N* húzás a bekötőkben). A „Musztáng" csapat hídja 403,9 *kg-erő* terhelésre 8,69 *mm* lehajlást eredményezett (a maximális erők értéke 1059,6 *N* nyomás volt az ívekben és 47,92 *N* húzás a bekötőkben). Ezek az értékek igazolták, hogy a szerkezeti modellek statikai vizsgálatánál a lineáris rugalmas számítás megfelel, nem érdemes másodfokú geometriai vagy fizikai modellekkel komplikálódni. Másrészt azt is igazolták (amit egyébként a szerkezetek építésekor is tapasztaltam és kifogásoltam), hogy a hallgatóink nem ügyeltek kellőképpen a kivitelezés pontosságára, ugyanis az íveket alkotó részek a „Kamikaze" csapat esetében 65% körüli kihasználtságnál, a „Musztáng" csapat esetében pedig 60% alatti kihasználtságnál roppantak szét.

A RECCS 2016-on tapasztalt és mért értékek, majd az itthon újraszámított szerkezeti modellek vizsgálata azt is alátámasztotta, hogy a tésztahidak tervezésénél érdemesebb az alakváltozásra figyelni, mint az alkotóelemek végfeszültségeire. A szerkezeti geometria függvényében változik a terhelési pont útjának a hossza, ezért érdemes olyan alaki változatokat keresni, amelyeknél ugyanakkora teherre minimális lesz ez az elmozdulás.

A legfontosabb dolog talán nem is a számítási eljárás vagy az elért eredmény, hanem az, hogy különböző országok felsőfokú intézményeinek a hallgatói megismerhetik egymást, összemérhetik az alkalmazott tudásuk szintjét, ügyességüket, és önbizalmat meg nemzetközi elismerést nyernek hála az Óbudai Egyetem által szervezett világbajnokságnak.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] RECCS 2017 – Tésztahíd építő világbajnokság, http://reccs.uni-obuda.hu/hu/ (hozzáférés ideje: 2016.11.03), Óbudai Egyetem, Budapest, Magyarország.

[2] A wikipédia szerzői: *Spaghetti bridge*, https://en.wikipedia.org/wiki/Spaghetti_bridge (hozzáférés ideje: 2016.11.03).

[3] Bíró Cs., Hadi Sz., Kádár Gy., Kis A., Péntek M.: *Szerkezet-modellezés száraztésztából*. 13. E-MTDK (Temesvár, 2011. április 8–10.), Orizonturi Universitare kiadó, Temesvár, Románia, 2011.

[4] Bartalis Sz., Bárdi Z., Geréb A.: *Száraztésztából épült híd modellezése*. 16. E-MTDK (Temesvár, 2015. május 15–17.), U.P.T., Temesvár, Románia, 2015.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 91–102. 10
http://hdl.handle.net/10598/30073

ÖSSZEHASONLÍTÓ TANULMÁNY POLIETILÉN HULLADÉKANYAGGAL, ILLETVE CEMENTTEL MEGVALÓSÍTOTT TALAJSTABILIZÁCIÓRÓL

COMPARATIVE STUDY ON SOIL STABILIZATION WITH POLYETHYLENE WASTE MATERIALS AND CEMENT

Ilieş Nicoleta[1], Cîrcu Alexandru-Petru[2], Nagy Andor-Csongor[3], Ciubotaru Vlad-Costel[4], Kisfaludi-Bak Zsombor[5]

[1]*Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Szerkezetek Tanszék, nicoleta.ilies@dst.utcluj.ro*

[2]*Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezet-mechanikai Tanszék, alexandru.circu@mecon.utcluj.ro*

[3]*Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Szerkezetek Tanszék, andor.nagy@yahoo.com*

[4]*Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Szerkezetek Tanszék, ciubotaru.vladcostel@yahoo.com*

[5]*Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezet-mechanikai Tanszék, zsombor.kisfaludi@mecon.utcluj.ro*

Abstract
In some cases, the production of solid waste is experiencing an uncontrolled and continuous increase, especially wastes from plastic products. Given that the process of transforming plastic waste into raw material involves high energy consumption, plastic can be used in geotechnics. This paper is based on comparing two solutions to improve the soil. The first solution is to improve the soil with plastic waste and the second solution is to improve the soil with cement. An instability phenomenon in slopes occurs in periods with heavy rainfall. For this reason the samples are immersed in water during the direct shear test. Ongoing tests, performed as a part of the research program have shown the effect of the polyethylene waste material and cement on soil cohesion and internal friction angle.

Keywords: *waste material; soil stabilization; direct shear test; polyethylene*

Összefoglalás
Esetenként a szilárd hulladék termelése folyamatos és megállíthatatlan folyamatnak tűnik, különösen a műanyagszármazékok kapcsán. A műanyag hulladékok nyersanyaggá alakítási folyamatában, habár nagy mennyiségű energiát használ fel, a keletkezett termék felhasználható a geotechnika területén. Ezen dolgozat két talajjavító megoldás eredményeinek összehasonlításán alapszik. Az első megoldásnál a talaj-polietilén, míg a másodiknál talaj-cement együttest vizsgáltuk. Erős esőzésekkor felléphet a lejtők stabilizációjának problémája, ezért a közvetlen nyírási kísérleteket vízzel telített talajpróbákon végeztük. A kutatás során végzett kísérletek kimutatják a polietilén hulladékanyag és a cement hatását a talaj kohéziójára és belső súrlódási szögére.

Kulcsszavak: *talajstabilizáció, közvetlen nyírási kísérlet, hulladékanyag, polietilén*

1. Bevezető

A talaj-cement nem más, mint talaj, víz és cement jól tömörített keveréke. Nagymértékben alkalmazzák utak, parkolóövezetek, gátak és töltések talajalapzatának javításánál. Első alkalommal a *United States Bureau of Reclamation* (USBR) alkalmazta a keveréket a *Bonny* gát lejtőcsuszamlás elleni védelmében egy kísérleti sávban. Tízévi megfigyelés után a megoldás eredményei jónak bizonyultak [4]. A kelet-coloradói *Bonny* gyűjtő 33 évi fagyási-olvadási ciklust, illetve számtalan szárazsági vagy nedvességi periódust szenvedett el. Az eredmények elég figyelemre méltóak, annak ellenére, hogy a keverési folyamat helyben, a terepen zajlott. Eróziós üregek jöttek létre a réteg alján, az alacsonyabb cementkoncentrátum és a kisebb mértékű tömörítés miatt [4]. Az oklahomai *Optima* gátnál a Mérnöki Testület mintákat vett a stabilizáló talaj-cement keverékéből egy év elteltével, és jó eredményeket közöltek a rétegek kapcsolódásáról. *Brown* és *Root* jó rétegkapcsolódásról jelentettek egy hűtő tónál a dél-texasi atomerőműnél, ahol a száraz cement kötőanyag tulajdonságait használták fel [1]. A *Cheney* gát viselkedése megtalálható *Holtz* és *Hansen*, *Gray Davis* és *Jones* cikkeiben [2, 3]. Romániában árvíz elleni védőgátaknál alkalmaztak talajcement keveréket. Az *Olt* megyei *Icoana* település *Vedea* folyóján található ilyen árvízvédelmi munkálat. Itt alkalmazták először a technológiát Romániában töltések építésénél, mivel a helyi földbirtokosok idegenkedtek a nagyobb területeket elfoglaló megoldásoktól. Ily módon a töltésépítés által elfoglalt föld területe feleződött, mivel a töltéskeresztmetszet dőlési szöge nagymértékben emelkedhetett.

A műanyag hulladékok felhasználását talajstabilizációk esetén szintén számos kutatási programban vizsgálták világszerte. Egy *W.R. Azzram* [5] által vezetett elemzés egy olyan alkalmazását mutatja be a polimer stabilizációnak, amellyel új nanokompozit anyagot valósítanak meg, agyagos földdel. A polipropilén stabilizáló hatását a mikrostrukturákra és agyagtulajdonságokra különböző kísérletek során vizsgálták, ahol változó polimermennyiségeket alkalmaztak. A vizsgálatok kimutatták, hogy a keletkezett nanokompozitok töltőanyagként viselkedtek, melyek csökkentették a kezelt agyag képlékenységi és tömöríthetőségi paramétereit. Az épített beékelődés betöltötte a pórusokat, így csökkentette a térfogati zsugorodást, és egy izotróp tömöríthető anyagot hozott létre kisebb kiterjedésű kiszáradási repedésekkel. A nanokompozit méretének növelésével szintén növekedett a húzó-, illetve nyírószilárdság. *Botero* egyik munkájában [6] ismertetett egy alternatív újrahasznosítási módot, műanyag hulladékokat (műanyagpalackok szálanyagként alkalmazva) felhasználva geotechnikai építkezéseknél. A kutatás során a PET szálakkal erősített iszapos talaj mechanikai viselkedését vizsgálták. Ehhez triaxiális laboratóriumi kísérleteket végeztek (UU) 0,0 – 1,0% között szálanyaggal a talaj száraz tömegéhez viszonyítva. Az eredmények azt mutatták, hogy a kezelt talaj nyírószilárdsága a felhasznált szálanyag arányával növekedett. Továbbá az eredmények kimutatták, hogy a kezelt talaj deformációs kapacitása is növekedett, számos geotechnikai probléma esetben pozitív tulajdonságnak számíthat. Összefoglalva: a kezelt talaj érdekes mechanikai tulajdonságokkal bír, így felhasználható olyan szerkezeteknél, ahol magas deformációs kapacitás szükséges, mint például szemétlerakók, szennyvíztisztítók és gátak esetében ahol megakadályozhatja a különféle szivárgásokat.

Más kutatások összekötötték a cementstabilizációt a műanyag származékokkal. *Correia* egyik cikkében [7] vizsgálta a kötőanyagok és szálelemek mennyiségének hatását a kötőanyaggal stabilizált rövid

szálelemekkel erősített vagy erősítetlen lágy talaj mechanikai tulajdonságaira. Az eredmények kimutatták, hogy a kötőanyag koncentrációjának emelése növeli a merevséget, a nyomó- és húzószilárdságot, de kisebb hatása van szálelemekkel erősített talajon. Általában kis mennyiségű szálelem hozzáadása a stabilizált lágy talajhoz csökkenti a merevséget, nyomószilárdságot és nyírószilárdságot, és képlékenyebbé változtatja a törékeny viselkedést. A [8] dolgozatban *Chen* polipropilén szálakkal erősített cement-agyag-keverék szilárdsági vizsgálatát mutatja be. Az újrahasznosított polimer textil szövet tömörített útburkolatoknál volt felhasználva. A szálerősítések hatékonysági vizsgálatának érdekében laboratóriumi kísérleteket végeztek szálakkal erősített cementel vegyített *Shanghai* agyagon. A kíséreletek során kétféle szálelemet alkalmaztak. Az első egyszálas polipropilén szál, második pedig polimer textilanyagból származó szálköteg volt. A kísérleteket korlátlan nyomószilárdsági kísérleti berendezéssel végezték. Az eredmények kimutatták, hogy a száladalék lényegesen növelheti a cementel kezelt *Shanghai* agyag szilárdságát és képlékenységét. Mindkét szálelem esetén a szilárdsági csúcsot 0,5%-os menynyiségnél érték el. Habár a polipropilén szálak esetén az eredmények jobbak, a különbségek 5% alattiak. Ezek alapján a polimer textilanyagból származó szálelem is felhasználható, s ez egy nagy lépést jelenthet a hasonló anyagok újrahasznosításában.

Jelen dolgozat a korábbi, *Ilieş* által vezetett kutatások [11, 12, 13] folytatása, melyek a mechanikai paraméterek változását vizsgálták talajstabilizációk esetén, edometrikus és közvetlen nyírási berendezésekkel. Az eredmények alapján az agyagos talaj polietilénnel való keverése hasznosnak bizonyult a kompaktállási tulajdonságok tekintetében, mivel csökkentek a talajdeformációk, továbbá a keverék merevsége is növekedett. Meglepő módon kisebb százalékú polietilén hulladékanyag használata jobb eredményekkel járt, mint magasabb értékek esetén.

Jelen dolgozatban az alábbi jelöléseket alkalmaztuk:

- c kohézió,
- c_{rez} maradó kohézió,
- φ legnagyobb belső súrlódási szög,
- φ_{rez} maradó belső súrlódási szög.

2. Anyagok és módszerek

Az elvégzett kísérletek fő célja a nyírási paraméterek változásának vizsgálata cement- vagy polietilén adalék esetén 2, 4, 6 és 8%-os mennyiségekben. A kezdeti paraméterek meghatározása érdekében szűrővizsgálatokat végeztünk. Az eredmények kimutatták, hogy a talaj iszapos agyag. A minták származási helye egy Kolozsvár melléki telep, 1 méter mélységből.

1. táblázat. Talajszemcse-méretek

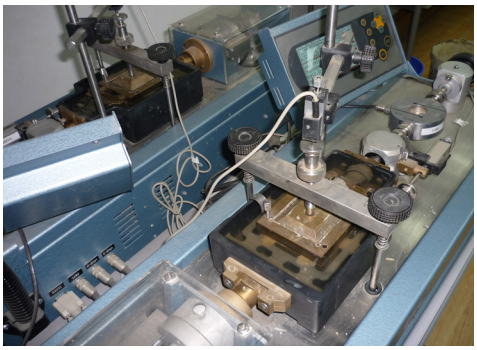
Talajtípus	Átmérő [mm]	Százalék
Agyag	Cl: d<0.002	24.35
Iszap	FSi: 0.002<d<0.0063	14.87
	MSi: 0.0063<d<0.02	34.16
	CSi: 0.02<d<0.063	14.23
Homok	FSa: 0.063<d<0.2	12.39

A minta fizikai tulajdonságai a **2. táblázat**ban találhatók. A duzzadási-zsugorodási potenciált figyelembe véve a talaj egy aktív agyag.

Az optimális víztartalom meghatározása érdekében végeztünk egy Proctor vizsgálatot. Az eredményezett görbe alapján az optimális víztartalom 19%.

A talajminta kohéziója és belső súrlódási szöge meghatározható a közvetlen nyírási kísérlet segítségével. A kísérletsorozat három mintát igényel, egy adott nyírási felületet, de három különböző függőleges nyo-

másértéket. Az eredményeket feltüntetve a koordináta-rendszerben három pontot kapunk, amelyeket összekötve, a Coulomb-egyenesen keresztül meghatározhatjuk a kohéziót és a belső súrlódási szöget. Az első minták az eredeti vízzel telített talajminták. A kísérlet az **1. ábrán** figyelhető meg.



1. ábra. *Közvetlen nyírási kísérlet vízzel telített mintával.*

2. táblázat. *Fizikai tulajdonságok*

Tulajdonság	Átlagérték
Víztartalom, w	17,48%
Térfogatsúly, γ_s	26,68 kN/m^3
Száraz térfogatsúly, γ_d	17,17 kN/m^3
Nedves térfogatsúly, γ	20,17 kN/m^3
Porozitás, n	35,51%
Hézagtényező, e	0,55
Sodrási határ, wp	17,38%
Folyási határ, wl	42,81%
Plasztikus index, Ip	25,42%
Konzisztencia index, Ic	1,00

A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 74,48 kPa, φ = 13,35˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 21,57 kPa, φ_{rez} = 9,75˚.

A második rend kísérlet 2%-os cementtalaj keveréken zajlott. A minták az elnyírt felülettel a **2. ábrán** láthatók.

2. ábra. *Közvetlen nyírási kísérlet mintái*

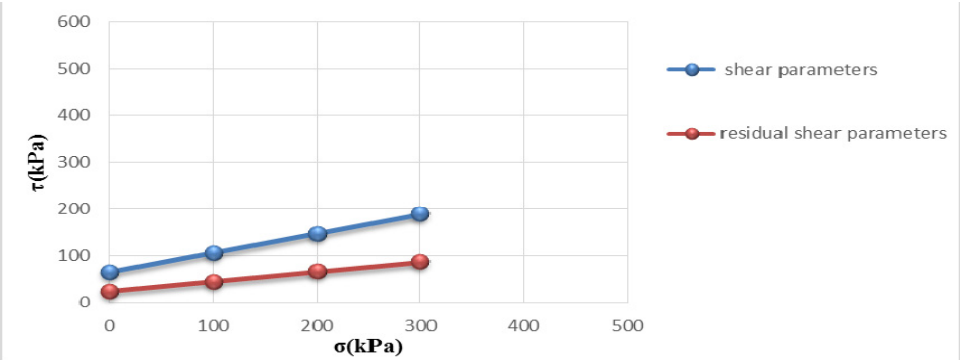
A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 66,44 kPa, φ = 22,29˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 24,97 kPa, φ_{rez} = 11,83˚, a-mint a **3. ábrán** is megfigyelhető. Kis mennyiségű cement hozzáadásával nőtt a belső súrlódási szög, és csökkent a kohézió. A kék vonal jelenti a Coulomb-egyenest az első szakaszban, míg a piros a maradó nyírási értékeket jelzi. Körök jelképezik a 100, 200, illetve 300 kPa-os függőleges nyomásokra a nyírási paramétereket.

A harmadik kísérletnél a cementtartalom 4%-os. A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 47,77 kPa, φ = 35,01˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 12,63 kPa, φ_{rez} = 34,14˚, ahogy a **4. ábrán** is megfigyelhető. A cementtartalom növelésével a kohézió továbbra is csökken, míg a belső súrlódási szög nő.

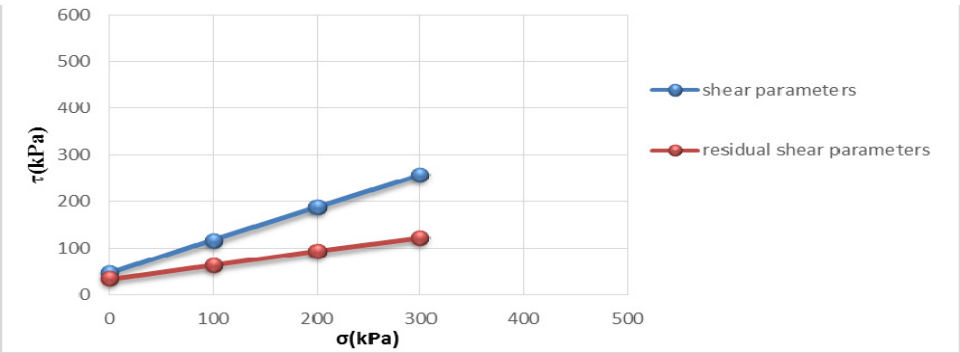
A cementtartalom további növelésével már 6%-os értéken történt a negyedik vizsgálat. A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 80,62 kPa, φ = 30,66˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 12,57 kPa, φ_{rez} = 20,48˚, ahogy az **5. ábrán** is megfigyelhető. A negyedik vizsgálat a kezdeti kohézió és a belső súrlódási szög értékéinél is nagyobbakat eredményez.

Az utolsó, 8% cementel kevert talaj vizsgálatával ellenőrizhető, hogy a nyírási paraméterek változása követi-e az eddig megfigyelteket. A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 108,76 kPa,

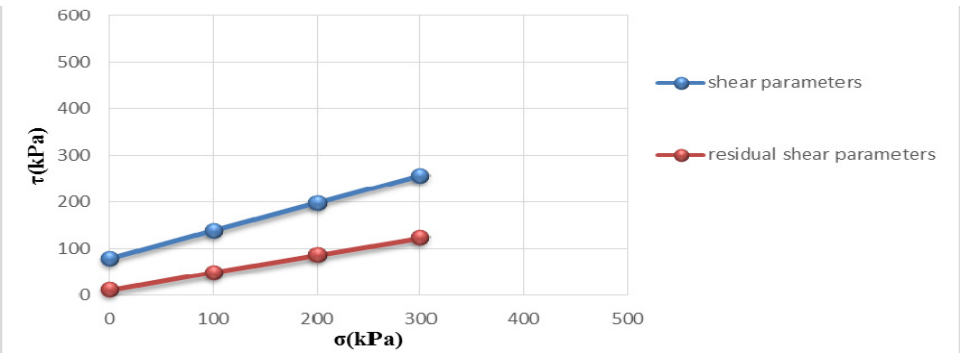
$\varphi = 27{,}90^{\circ}$, a maradó értékek pedig $c_{rez} = 9{,}28$ kPa, $\varphi_{rez} = 24{,}75^{\circ}$, ahogy a **6. ábrán** is megfigyelhető. Ezen utolsó vizsgálatnál a kohézió továbbra is nőt, míg a belső súrlódási szög csökkenni kezdett.



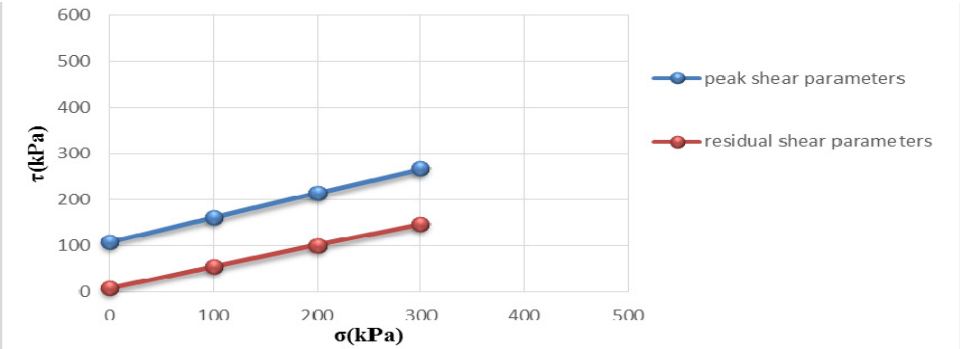
3. ábra. *Coulomb-egyenes 2%-os cement-talaj esetén.*



4. ábra. *Coulomb-egyenes 4%-os cement-talaj esetén.*



5. ábra. *Coulomb-egyenes 6%-os cement-talaj esetén.*



6. ábra. *Coulomb-egyenes 8%-os cement-talaj esetén*

A kutatás következő lépésében polietilénszármazékkal kevert talajmintákat vizsgáltunk hasonló 2, 4, 6 és 8% mennyiségekben adagolva. A talajstabilizációhoz polietilénszemcsék voltak alkalmazva egy helyi újrahasznosítóból. A polietilén-talaj keverék összeállítása optimális víztartalomnál történt (19%), és a közvetlen nyírási kísérletek a cement-talaj nyírási vizsgálatához hasonló körülmények között mentek végbe.

Az első kísérlet 2%-os polietiléntartalmú mintákon történt. A kísérlet utáni minták megfigyelhetők a **8. ábrán**.

3. táblázat. *A polietilén hulladékanyag granulometrikus elemzése*

Eredeti tömeg [g]: 500		
Rosta mérete	Fenntartott anyag tömege [g]	Tömeg százalék [%]
4 mm	215	43
2 mm	175	35
1 mm	85	17
0,5 mm	17,5	3,5
0,25 mm	7,5	1,5

A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 19,60 kPa, φ = 24,47˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 1,12 kPa, φ_{rez} = 14,19˚, ahogy a **12. ábrán** is megfigyelhető.

Tehát polietilén kismértékű adagolása esetén az eredeti értékekhez képest a belső súrlódási szög nőtt.

7. ábra. *Talaj-műanyag minta*

8. ábra. *2%-os polietilén-talaj keverék mintája és annak nyírási felülete*

A második kísérletnél a polietilénarányt megnöveltük 4%-osra. Ezen mintákat a **10. ábrá**n mutatjuk. A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 31,41 kPa, φ = 21,53˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 18,13 kPa, φ_{rez} = 9,62˚, ahogy a **13. ábrá**n is megfigyelhető. A polietilénszemek arányának növelésével egyidejűleg nőtt a belső súrlódási szög értéke is, mivel több szem került a nyírási felületre így növelve a nyírási szilárdságot.

A polietilén arányát tovább növeltük 8%-ra, amint a **10. ábrá**n is látható.

9. ábra. *4%-os polietilén-talaj keverék mintája és nyírási felülete*

10. ábra. *6%-os polietilén-talaj keverék mintája és nyírási felülete*

A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 5,97 kPa, φ = 27,79˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 0,00 kPa, φ_{rez} = 19,94˚, ahogy a **14. ábrá**n is megfigyelhető. A további polietilénarány növelése befolyásolta a belső súrlódási szög mellett a kohéziót is. Habár a kísérletek során a minták vízzel telítettek voltak, a maradó kohéziós érték 0 kPa.

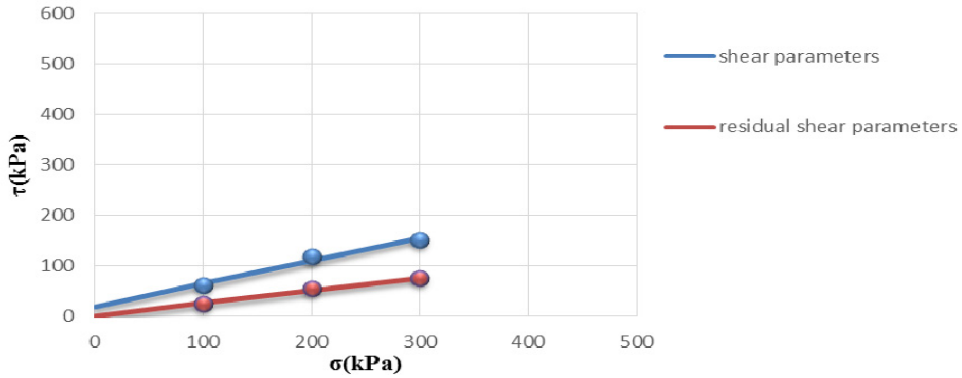
Az utolsó kísérlet során a 8%-os polietilénnel rendelkező mintákat vizsgáltuk a kirajzolódó tendencia ellenőrzésére. A 8%-os polietilén-talaj minták a **11.a.** és **b.** képeken mutatjuk.

11.a. ábra. *8%-os polietilén-talaj keverék mintája és nyírási felülete*

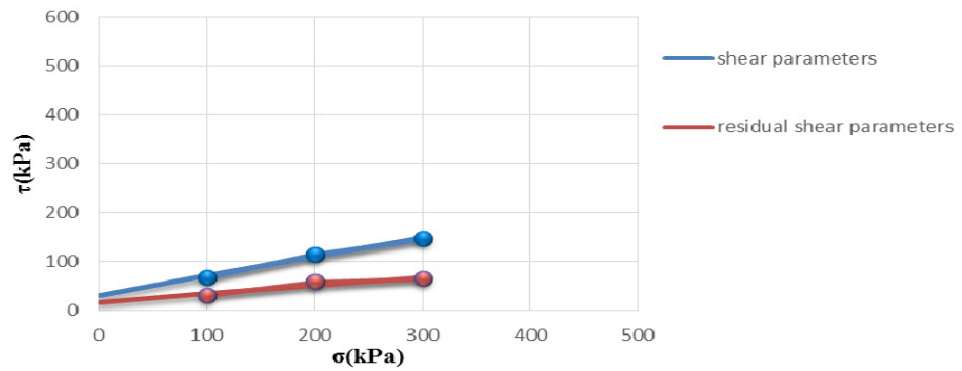
11.b. ábra. *8%-os polietilén-talaj keverék nyírási felülete*

A kohézió és a belső súrlódási szög értékei: c = 10,57 kPa, φ = 28,26˚, a maradó értékek pedig c_{rez} = 7,90 kPa, φ_{rez} = 17,64˚, ahogy a **15. ábrá**n is megfigyelhető. Habár kis növekedés észlelhető a kohéziós értékben a 6%-os mintához

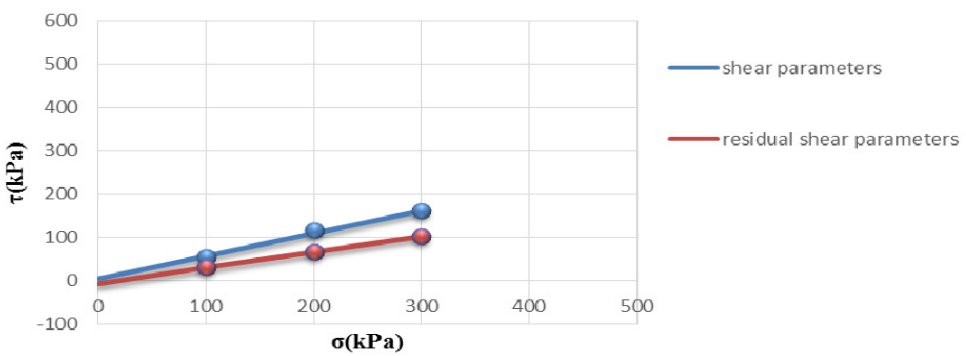
képest, az eredmények mégis alacsonyabb értékűek, mint a 4%-os mintában.



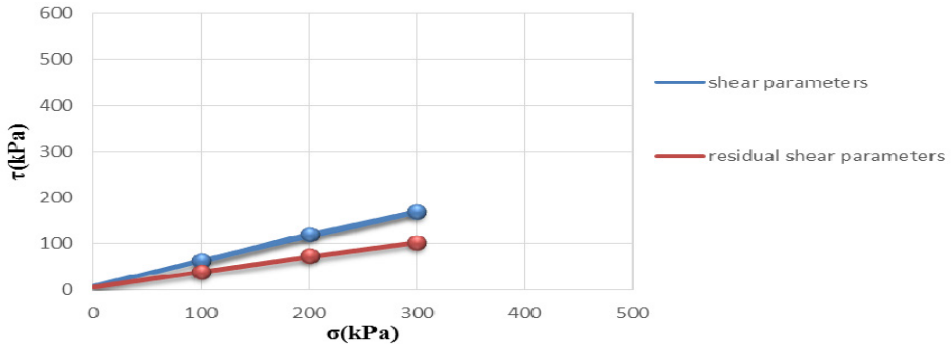
12. ábra. *Coulomb-egyenes 2%-os polietilén-talaj esetén.*



13. ábra. *Coulomb-egyenes 4%-os polietilén-talaj esetén.*



14. ábra. *Coulomb-egyenes 6%-os polietilén-talaj esetén.*

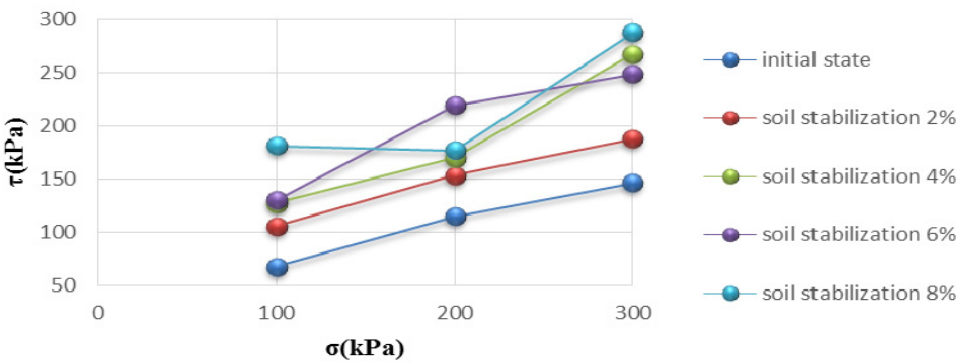


15. ábra. *Coulomb-egyenes 8%-os polietilén-talaj esetén.*

3. Eredmények és értékelések

A közvetlen nyírási kísérlet eredményeit összevetve megfigyelhetjük, hogy cement adagolásával a kohézió növekedett. A cement arányának növelésével a belső súrlódási szög értéke is növekedett már a 2%-os adagolási értéktől kezdődően. A 2 és 4%-os értékek növekedése után a 6%-os minták értékei már csökkenő tendenciát mutatnak, amit a 8%-os minták igazolnak, habár a kezdeti eredményhez képest így is kétszeresek az értékek. A legkiegyensúlyozottabb értékek 6%-os cementadagolás esetén jelentkeztek. A közvetlen nyírási kísérlet eredményei a **4. táblázat**ba vannak foglalva.

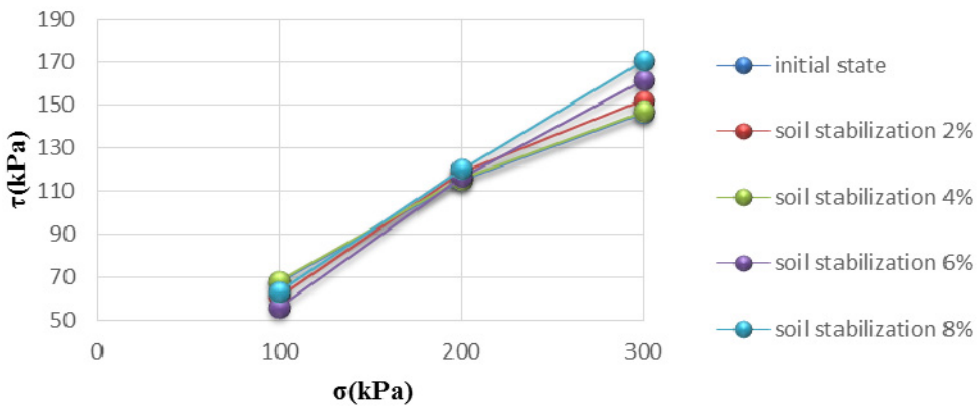
A talaj-polietilén keverékek eredményeinek összevetése a **17. ábrá**n található. Megállapítható, hogy a polietilén adagolása növelte mind a kohézió, mind pedig a belső súrlódási szög értékeit. A 4%-os keverék kohéziós értéke a legmagasabb, míg a 8%-al rendelkező minták belső súrlódási szöge bizonyult a legnagyobbnak az összes polietilén-talaj minta közül. Ezen eredményeket az **5. táblázat** tartalmazza.



16. ábra. *Coulomb-egyenesek a cement-talaj mintáknál.*

4. táblázat. *Közvetlen nyírási kísérlet eredményei (talaj-cement minták)*

σ [kPa]	τ max [kPa]				
	Természetes minta	2%-os cement	4%-os cement	6%-os cement	8%-os cement
100	67,58	105,14	126,94	129,75	180,81
200	115,22	153	169,58	219,53	176,67
300	146,33	187,11	267,03	248,33	287,06
	Maradó értékek				
100	41,19	40,33	68,94	51,08	62,58
200	53,08	78,03	83,97	84,94	87,06
300	78,67	82,22	128,67	125,78	154,78



17. ábra. *Coulomb-egyenesek a polietilén-talaj mintáknál.*

5. táblázat. *Közvetlen nyírási kísérlet eredményei (polietilén-talaj minták)*

σ [kPa]	τ max [kPa]				
	Természetes minta	2%-os polietilén	4%-os polietilén	6%-os polietilén	8%-os polietilén
100	67,58	61,17	68,14	56,08	63,25
200	115,22	118,47	115,78	116,58	120,58
300	146,33	152,17	147,06	161,50	170,78
	Maradó értékek				
100	41,19	24,56	31,69	30,36	38,72
200	53,08	55,42	58,83	67,94	73,47
300	78,67	75,14	65,61	102,92	102,33

4. Következtetések

A polietilén anyagok használata talaj-stabilizációhoz környezetbarát megoldásnak tekinthető. A polietilénszemek gyártási folyamata kisebb ökológiai lábnyommal bír, mint a cementé vagy más kötőanyagé. Figyelemre méltók a 4%-os

polietilén adagolású minták eredményei. Összehasonlítva ezen 4 %-os polietilén-minták eredményeit a megfelelő cement-adagolású minták eredményeivel megállapítható, hogy a kohézió 52%-kal kisebb, míg a belső súrlódási szög 63%-kal a polietilén-talaj esetén. Annak ellenére, hogy a cement-talaj minták eredményei magasabb értékűek, előállításuk folyamatának szénkibocsátása nagyobb, így kevésbé környezetbarátok.

Köszönetnyilvánítás

A műanyag származékokkal történő talajstabilizációs kutatási program a Kolozsvári Műszaki Egyetem által kezdeményezett *Internal Research Grant CI 7/1.2/2015: Soil stabilization with plastic waste materials in order to improve physical and mechanical characteristics* keretében valósult meg.

Külön köszönet illeti ing. *Ilieş Dorut – S.C. Diren Exim S.R.L.*, a polietilénszármazékok biztosításáért. A cement-talaj típusú stabilizációkkal részletesebben *Cîrcu, Ciubotaru* és *Crăciunescu* foglalkoztak mesteri tézisükben [14].

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Dinchak W.B., *Soil-cement: it's not just for highways anymore*. Concrete Construction January, 1984.

[2] Holtz, Hansen, *The use of compacted soil-cement in water control structures*. 12th Congress of Large Dams, Mexico City, Mexico, 1976.

[3] Davis G., Jones, *The Use of soil-cement for slope protection*. Eleventh Congress of Large Dams, Madrid 1973.

[4] U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, *Design Standards No. 13-Embankment Dams Chapter-17*: Soil-Cement Slope Protection Final: Phase 4, 2013.

[5] Azzam W.R., *Behavior of modified clay microstructure using polymer nanocomposites technique*. Alexandria Engineering Journal, Faculty of Geoengineering, 12(2013) 143-150.

[6] Botero E., Ossa A., Sherwell G., Ovando-Shelley E., *Stress-strain behavior of a silty soil reinforced with polyethylene terephthalate (PET)*. 43 (2015) 363-369.

[7] Correia A.A.S., Oliveira P.J.V., Custodio D.G., *Effect of polypropylene fibres on the compressive and tensile strength of a soft soil, artificially stabilized with binders*. Geotextiles and Geomembranes, 43(2015), pp. 97-106.

[8] Chen M., Shen S.L., Arulrajah A., Wu H.N., Hou D.W., Xu Y.S., *Laboratory evaluation on the effectiveness of polypropylene fibers on the strength of fiber-reinforced and cement-stabilized Shanghai soft clay*. Geotextiles and Geomembranes, 43 (2015), pp. 515-523.

[9] Vyas S., Phougat N., Sharma P., Ratnam M., *Stabilization of Dispersive Soil by Blending Polymers*, International Journal of Earth Sciences and Engineering, 04(2011), pp. 52-54.

[10] Cristelo N, Cunha V.M.C.F., Dias M., Gomes A.T., Miranda T., Araújo N., *Influence of discrete fibre reinforcement on the uniaxial compression response and seismic wave velocity of a cement-stabilized sandy-clay*. Geotextiles and Geomembranes, 43(2015), pp. 1-13.

[11] Ilies N.M., Farcaş V.S., Gherman M.C., Chiorean V.F., Popa D., *Soils efficient improvement solutions with waste materials and binders*. Journal of Environmental Protection and Ecology, Vol. 16, Issue: 4, 2015, pp. 1397-1406 (ISSN: 1311-5065).

[12] Ilies N.M., Farcaş V.S., Mureşan O.C., Gherman M.C., Chiorean V.F., Nagy A.Cs., *Îmbunătățirea pământurilor argiloase cu deșeuri din polietilenă*. A XIII-a Conferință Națională de Geotehnică și Fundații – Cluj-Napoca, 07-10 septembrie 2016, pag. 249-258 (ISSN–L 1844 – 850X, Print: ISSN 1844-850X, CD-Rom: ISSN 2285 – 5831).

[13] Ilieş N.M., Farcaş V.S., Mureşan O.C., Gherman M.C., Chiorean V.F., *Soil improvement with polyethylene waste materials in order to improve mechanical parameters*. 16th International Multidiscipli-

nary Scientific Geoconference & Expo SGEM, 2016, Albena, Bulgaria.

[14] Cîrcu Al.P., Ciubotaru V.C., Crăciunescu B., *The soil improvement with hydraulic binders experimented to the levees*. MSc Thesis in geotechnical engineering, T.U. of Cluj-Napoca, Romania, 2016.

[15] Ilieş N.M., Cîrcu Al.P., Nagy A.Cs., Ciubotaru V.C., Kisfaludi-Bak Zs., *Comparative study on soil stabilization with polyethylene waste materials and binders*. INTER-ENG 2016.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 103–114. 11
http://hdl.handle.net/10598/30072

VEKTORIÁLISAN SZABÁLYOZOTT SZINKRON GENERÁTOR VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ TERHELÉSSEL

VECTOR CONTROLLED SYNCHRONOUS GENERATOR RUNNING WITH AC-LOAD

Imecs Mária[1], Szabó Csaba[2], Incze János Jób[3], Szőke sz. Benk Enikő[4]

Kolozsvári Műszaki Egyetem (KME), Villamosmérnöki Kar, [1]Doktori Iskola, [1,2,3,4]Villamos Gépek és Hajtások Tanszék, Cím: Technical University of Cluj, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Machines and Drives, RO-400114, Romania, Cluj-Napoca, Str. Memorandumului Nr. 28; Tel: +40(0)264401242, Fax: +40(0)264592055,
[1] maria.imecs@emd.utcluj.ro, [2] csaba.szabo@emd.utcluj.ro,
[3] ioan.incze@emd.utcluj.ro, [4] eniko.szoke@emd.utcluj.ro

Abstract
The paper presents the vector control of the electrically excited synchronous generator, based on the field-orientation principle. The orientation is made according to the stator flux, which is correlated to the control of the active and reactive energy of the generator. In contrast to the conventional scalar control the voltage and frequency control is made not independently, but based on the mathematical model, by coupling the two control loops, taking into account the physical phenomena in the machine. Not only the stator current is field-orientated, but also the exciting one, because it has torque producing component too. The control system is mathematically modeled based on the Park's general equations, which are suitable for implementation. The simulation and measurement results obtained on the experimental equipment are presented comparatively. It is confirmed that the vector control structure can ensure more stability and better dynamic behavior in comparison to the scalar control system.

Keywords: *electrically excited synchronous generator, vector control, field-orientation, Park-equations, phase- and coordinate transformation*

Összefoglalás
A dolgozat bemutatja az egyenárammal gerjesztett szinkron generátorok vektoriális szabályozását a mezőorientációs elv alapján. A mezőorientáció a sztátorfluxus szerint történik, mely összhangban van a meddő és hatásos energiák irányításával. A klasszikus skaláris rendszerekkel ellentétben a feszültség és a frekvencia szabályozása nem egymástól függetlenül történik, hanem a matematikai modell alapján a két szabályozási hurok összekapcsolásával, figyelembe véve a villamos gépben létrejövő fizikai jelenségeket. A mezőorientációt nemcsak az armatúra áramra alkalmazzuk, hanem a gerjesztő áramra is, ugyanis annak is van nyomatékképző hatása. A szabályozási rendszer matematikai modellezését a Park-féle általános egyenletek alapján végezzük, amelyek az implementáció alapjául szolgálnak. A szimulációs és az implementált szabályozás próbapadon végzett kísérleteinek a mérési eredményeit összehasonlítva mutatjuk be. Bizonyított a vektoriális szabályozás dinamikusabb és stabilabb viselkedése.

Kulcsszavak: *egyenárammal gerjesztett szinkron gép, vektoriális szabályozás, mezőorientáció, Park-egyenletek, fázis- és koordináta-transzformáció*

1. Bevezető

A szinkron gép a legfontosabb villamos energiaforrás, mely a mechanikai energiát alakítja át elektromos energiává. Az árammal gerjesztett (ÁG) nagy teljesítményű szinkron generátorok (SzG) klasszikusnak tekinthető szabályozása jól ismert:

– a *frekvenciát* a hatásos teljesítmény változtatásával állítják be a hajtó turbina sebességszabályozásával;
– a *feszültséget* a meddő teljesítmény által szabályozzák, amit a gerjesztő áram módosításával érnek el.

A két szabályozási hurok egymástól függetlenül dolgozik, figyelmen kívül hagyva a gépben végbemenő alapvető fizikai jelenségeket. Ezért a jelenleg alkalmazott szabályozási eljárás *skaláris* jellegűnek tekinthető. Stabilabb és dinamikusabb rendszert a mezőorientáció (MO) eljáráson alapuló *vektoriális* szabályozással (VSz) érhetünk el, melynek az ÁG-SzG-kre alkalmazott elvét 1989-ben Romániában szabadalmaztattuk [2], 1990-ben bemutattuk és közöltük angol nyelven az MIT-n megtartott ICEM nemzetközi villamosgép konferencián [3], majd 1993-ban részletesen leírva is megjelent egy kötet fejezeteként [4].

Számos szimulálási eredményt közöltünk [5], [9], [10], [11], [18], mígnem a *Kolozsvári Műszaki Egyetem* Villamos Hajtások laboratóriumában sikerült felépíteni egy próbapadot, ahol a váltakozó áramú (VÁ) motorok szabályozási struktúráival kísérletezhettük [6]–[8]. Az egyik legfontosabb feltétel a VSz struktúrák implementálására a mezőorientáláshoz szükséges fluxus vektoriális becslése (identifikálása), melynek a mérhető mennyiségekből való számítása nem mentes a villamos gép paramétereinek (ellenállások és induktivitások) a hatásától. Ezek működés közben változnak, és általában nem mérhetők [12].

A fluxus becslését a kalickás indukciós motorokra (KIM) kísérleteztük ki, majd alkalmaztuk szinkron gépekre is [13], [15]. Ezek után került sor 2013-ban a szinkron generátor VSz-nak az implementációjára [19] – [21], [23].

A VSz rendszerekben, a visszacsatolás mennyiségeinek számítása/becslése, valamint a beavatkozó változók meghatározása, a térfázor (Park-vektor) elméletén alapuló dinamikus matematikai modell (MaMo) segítségével történik, mellyel figyelembe lehet venni a gép természetes viselkedését. Ennek tulajdonítható, hogy a tranziens folyamatok alatt is biztosítható a rendszer nagyon jó dinamikus viselkedése és stabilitása, mely megközelíti az egyenáramú hajtások minőségét [1], [4], [16], [17].

2. A mágneses mezőorientáció elve

Az MO elve abban áll, hogy a VÁ gép 2 fázisú (d-q) MaMo-ját egy eredő fluxusvektor irányába orientált komplex síkba áttranszformáljuk (a komplex sík valós tengelye az orientációs mágneses mező vektorának az irányába mutat). A mérhető sztátoráram vektorát a mezőorientált koordináta-rendszerben (KooR) – a valós ($\mathcal{R}_e$) és az imaginárius ($\mathcal{I}_m$) tengelyre vetítve – az úgynevezett reaktív (d – angolul „*direct*”), illetve aktív (q – „*quadrature*”) összetevőkre bontjuk. melyek a gép elektromágneses nyomatékát határozzák meg. A MO áramösszetevőkkel, melyeket alapjelként írunk elő, két szétcsatolt szabályozási hurkot lehet kialakítani [4], [16], [17].

Az ÁG szinkron gépek VSz struktúrájában a gerjesztés egy harmadik szabályozási hurkot alkot. A gerjesztőtekercset (GT) tápláló beavatkozó áramirányító (egyenirányító vagy egyenáramú szaggató) vezérléséhez a gerjesztőáram alapjelét VSz esetén aktív és reaktív mezőorientált összetevőikkel határozzuk meg, hasonlóképpen mezőorientálva, mint az armatúra áram esetén.

A három szabályozási hurok összecsatolása a VÁ gép térfázoros MaMo-ján alapszik, és a rendszer beavatkozó vezérlési

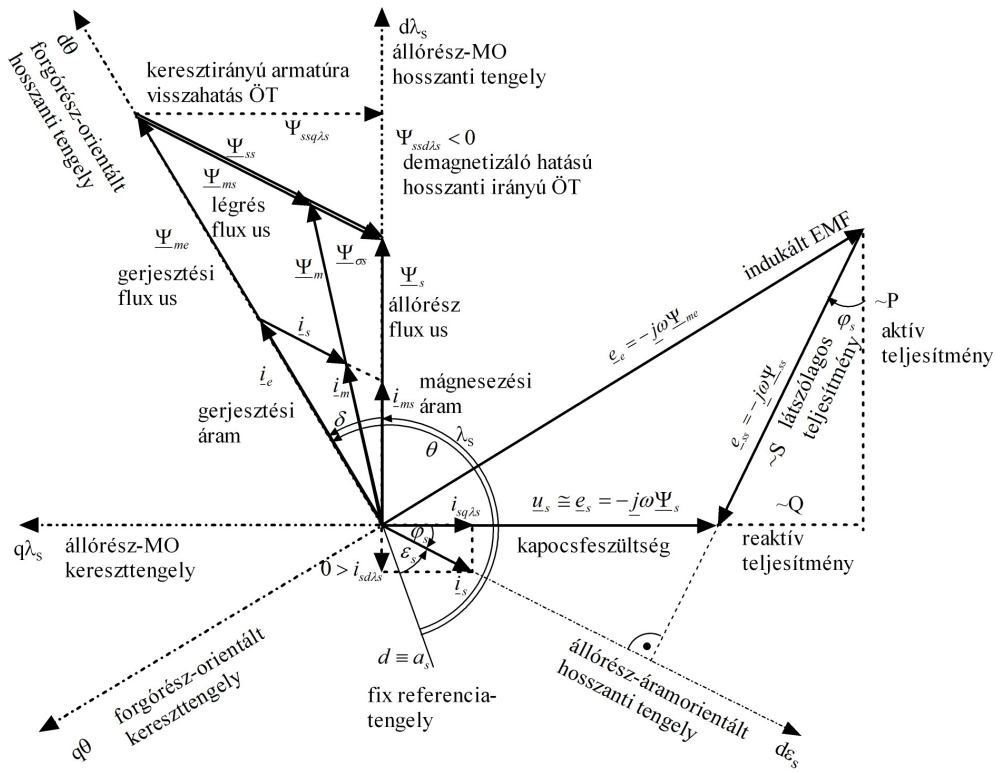
mennyiségeinek a vektoriális generálására szolgál [1] – [4], [16].

3. Sztátormező-orientáció

A KIM-ek mezőorientációja konvencionálisan a rotorfluxus szerint történik. Az ÁG szinkron gépeket előnyösebb a sztátorfluxus irányába orientálni, ez ugyanis a teljesítménytényezővel (TT) közvetlenül összefüggő áramösszetevőket eredményez, amivel a meddő energia termelését szabályozzuk [1] – [5], [9] – [11], [16] – [23].

Az **1. ábrá**n a sztátormező-orientációs (SzMO) tengelyek ($d\lambda_s$–$q\lambda_s$) jelölésében a λ_s a sztátorfluxus vektorának a pozíciószöge a fix *d* referenciatengelytől mérve, mely megegyezik a sztátor „a_s" fázistekercsének a mágnesezési irányával. Feltüntettük a Park-féle egyenletekben alkalmazott dθ–qθ KooR-t, melyet a forgórész hosszanti és keresztirányú szimmetriatengelyei alkotnak, valamint az eredő armatúra-/sztátor- fluxus irányába orientált ($d\lambda_s$–$q\lambda_s$) KooR-t. Mivel szinuszos állandósult állapotról (ÁÁ) van szó, az ábrázolt vektordiagram érvényes mind a klasszikus időfázorokra, mind a tranziens jelenségeket figyelembe vevő térfázorra (Park-féle térvektorra).

A feszültségdiagramban elhanyagoltuk az állórész R_s ellenállását, mely a névleges frekvencia környékén megengedhető.



1. ábra. *Meddő teljesítményt szolgáltató ÁG-SzG vektordiagramja állandósult állapotban*

Ebben az esetben a hatásos (*P* – aktív), a meddő (*Q* – reaktív) és a látszólagos (*S*) teljesítményeknek megfelelő *P*-*Q*-*S* háromszög, mind az armatúra visszahatás (AV)

$\underline{\Psi}_{ss} - \Psi_{ssd\lambda s} - \Psi_{ssq\lambda s}$, mind az állórészáram $\underline{i}_s - i_{sd\lambda s} - i_{sq\lambda s}$ háromszögével hasonló, ahol a „$d\lambda s$" és „$q\lambda s$" indexek a SzMO összetevőket (ÖT) jelölik.

Az állórészáram ($i_{sq\lambda s}$) és az AV-nek az orientációs fluxusra merőleges keresztirányú összetevője (KAV – $\Psi_{ssq\lambda s}$) generátor üzemmódban előjelet vált (negatív lesz) a motorüzemmódhoz képest, ugyanis arányos a P hatásos teljesítménnyel, melynek az átviteli iránya megfordul.

A mezőorientált állórészáram ($i_{sd\lambda s}$) és az AV hosszanti összetevője (HAV – $\Psi_{ssd\lambda s}$), mely a Q meddő teljesítménnyel arányos, kapacitív áram esetén negatív lesz, ugyanis a generátor a hálózatnak mágnesezési energiát is szolgáltat; egységnyi (maximális) teljesítménytényezőnél ez az összetevő nulla.

Következésképpen a hatásos (aktív) és a meddő (reaktív) teljesítmények irányítását mezőorientált armatúraáram $i_{sq\lambda s}$ merőleges aktív ÖT-vel, illetve az $i_{sd\lambda s}$, hosszanti reaktív ÖT-vel valósítjuk meg.

Tehát VSz struktúrával az állórészáram SzMO kétfázisú összetevői segítségével szabályozhatjuk a hatásos és a meddő energiák termelését [2] – [4], [10], [16], [21].

4. Árammal gerjesztett szinkron generátor vektoriális szabályozása

Az ÁG szinkron gépeknek három szabályozási hurka van. A szinkron motoros hajtások esetén három alapjelet lehet előírni (sebesség/nyomaték, eredő sztátorfluxus (Ψ_s)/ mágnesezési áram (i_{ms}) és a TT/ HAV), ugyanis három beavatkozási lehetőség van:

- a frekvenciaváltóval az armatúra kapocsfeszültsége (U_s) és a frekvenciája (f_s);
- a GT áramirányítójával a gerjesztés árama (i_e).

A szabályozásra szolgáló visszacsatolt mennyiségek száma is alapvetően három: az armatúra és gerjesztőáramok, valamint a sebesség [4].

A hálózatra kapcsolt SzG-nál is ugyanaz a három visszacsatolás megvan, viszont csak két lehetőség van, amivel beavatkozhatunk, mint ahogyan a **2. ábrán** is látható. Az egyik a GT egyenirányítója, a másik a turbina automata sebességszabályozója (ASSz) [16], [21].

Ezért a hálózatra kapcsolt ÁG-SzG szabályozására csak két alapjel adható meg:

- a frekvencia f_s^{Ref} névleges értéke;
- a feszültség u_s^{Ref} névleges amplitúdója.

A turbina vezérléséhez a nyomaték m_e^{Ref} alapjelét a frekvenciaszabályozási hurokban generáljuk a kaszkádban csatolt armatúra áramhuroknak az aktív MO-ÖT-jének ($i_{sq\lambda s}$) a szabályozója által. Következésképpen ez lesz az aktív szabályozási hurok.

Az i_{ms}^{Ref} mágnesezési áram értékét a reaktív szabályozási hurokban határozza meg az orientációs armatúra fluxus amplitúdójának a szabályozója, melynek a Ψ_s^{Ref} alapjelét a feszültségszabályozó generálja.

A második reaktív hurkot az armatúra áram $i_{sd\lambda s}$ reaktív MO-ÖT-jének a visszacsatolása alkotja szabályozás nélkül.

A gerjesztőáram i_e^{Ref} alapjelét az i_eC tömbbel számítjuk ki három bemeneti áramból.

Az i_e gerjesztőáram által a légrésben létrehozott Ψ_{me} fluxus az e_e pólusfeszültséget indukálja, mely az **1. ábra** alapján:

$$\underline{\Psi}_{me} = L_{md}\,\underline{i}_e = \underline{\Psi}_s - \underline{\Psi}_{ss}\,, \qquad (1)$$

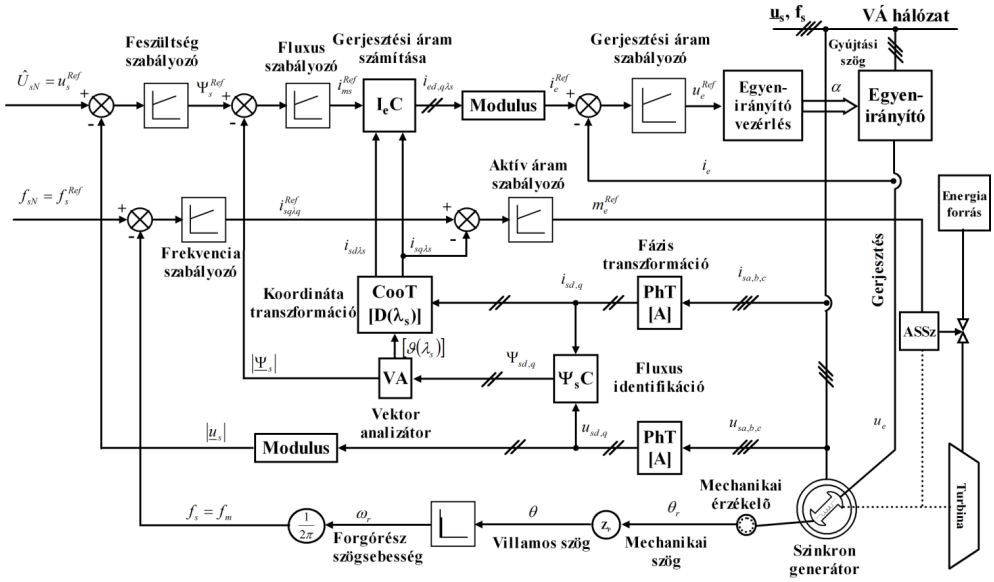
ahol az orientációs eredő armatúra-fluxus

$$\underline{\Psi}_s = \underline{i}_{ms}\,L_{md} \qquad (2)$$

a vele arányos $\underline{i}_{ms}$ mágnesezési árammal is meghatározató, és az armatúra-visszahatás

$$\underline{\Psi}_{ss} = L_{md}\,i_{sd\lambda s} + \mathrm{j}\,L_{mq}\,i_{sq\lambda s} \qquad (3)$$

az állórészáram MO-ÖT-ivel számítható ki.



2. ábra. *Váltakozó áramú hálózatra kapcsolt árammal gerjesztett szinkron generátor sztátorfluxus szerint mezőorientált vektoriális szabályozási tömbvázlata*

Ezek alapján, ha a gépet hengeres forgórészűnek tekintjük ($L_{md} = L_{mq}$) (mint az **1. ábra** diagramjában is), akkor a fluxusok és áramok háromszögei hasonlóak.

Mint már említettük VSz esetén az ÁG szinkron gépeknél nemcsak az armatúra áramot, hanem a gerjesztő egyenáramot is vektoriálisan kezeljük, és MO-ÖT-re bontjuk

$$\underline{i}_e = (i_{ed\lambda s} + \mathrm{j}\, i_{eq\lambda s}). \qquad (4)$$

A gerjesztőáram MO-ÖT-k az (1) – (4) alapján a következőképpen fejezhetők ki:

$$i_{ed\lambda s} = i_{ms} - (1+\sigma_s)\, i_{sd\lambda s}; \qquad (5.1)$$

$$i_{eq\lambda s} = -\,(1+\sigma_s)\, i_{sq\lambda s}\,. \qquad (5.2)$$

Ezek alapján számol az i_eC tömb, melynek a három bemeneti áramát – mint már láttuk – egyrészt szabályozók generálják, másrészt pedig a visszacsatolásokból identifikáció útján nyerjük. Ez a tömb egyesíti a két reaktív hurkot és a mezőorientált MaMo alapján összekapcsolja az aktív szabályozási hurokkal, biztosítva a vektoriális jelleget [2] – [4], [16], [21].

A visszacsatolásban a mért 3 fázisú áramokat és feszültségeket 2 fázisúvá alakítjuk a PhT fázistranszformációs tömbökkel, melyeket az [A] mátrix jelöl. A VA vektoranalizátor a modulusszámításon kívül meghatározza az orientációs λ_s szög trigonometriai függvényeit, melyeket az $[\sigma(\lambda_s)]=[\cos\lambda_s, \sin\lambda_s]^t$ mátrix jelöl. Ezekre szükség van a sztátoráram mezőorientálásában, melyet a CooT $[D(\lambda_s)]$ mátrixszal megjelölt számítási tömbbel végzünk el.

A két egymást követő transzformációt (PhT és CooT) együttesen Park-féle transzformációnak nevezik, mely gyakorlatilag dupla transzformációnak felel meg, és egy lépésben is elvégezhető [4], [17]. Ebben az esetben azért nem lehet ilyen formában alkalmazni, mert a fluxus identifikációjánál szükség van az áram és a feszültség természetes 2 fázisú ÖT-ire. A SzMO-hoz szükséges fluxus vektoriális identifikációja a Ψ_sC tömbben a kapocsfeszültség egyenleté-

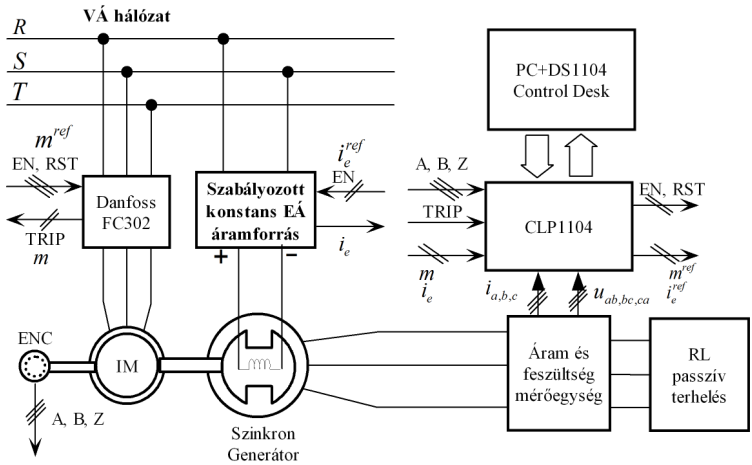
ből történik az indukált elektromotoros feszültségének az integrálása által természetes kétfázisú d-q KooR-ben. Mivel ez az eljárás érvényes minden VÁ gépre, ezzel a módszerrel implementáltuk a kísérleti laboratóriumunkban, előzőleg a KIM és szinkron motoros hajtásokat [6], majd alkalmaztuk a VSz ÁG-SzG próbapadján [19] – [21], [23].

5. A rendszer implementációja

Az implementációt a VSz rendszer szimulációja előzte meg, melyet a **2. ábrán** bemutatott szabályozási struktúrára végeztünk el MATLAB/Simulink® dinamikus szimulációs szoftver környezetben. A hálózatot helyettesítő fogyasztó passzív terhelés R-L típusú ellenállásos-induktív 3 fázisú áramkör, mint ahogyan a **3. ábrán** bemutatott próbapad tömbvázlatában is látszik.

A VSz struktúra szimulációját és ennek a próbapadon implementált kísérletezését hasonló körülmények között végeztük el.

Az implementáció ugyanazon a próbapadon történt, mint az előző kísérleteknél [19]–[21], [23].



3. ábra. *Passzív fogyasztóval terhelt indukciós motorral meghajtott szinkron generátor sztátormező-orientált szabályozási struktúrájának implementációjára alkalmazott próbapad tömbvázlata*

A **4. ábrán** a próbapad fényképe látható, melyen a gyakorlati implementációt és a kísérleti méréseket elvégeztük.

A szimulált VSz rendszer implementációja a Simulink® struktúra kompilálásával történt egy dSPACE® által kifejlesztett digitális berendezés segítségével.

A próbapad és a numerikus rendszerű berendezés közötti interfészt a dSpace® gyártmányú CLP1104 („*Connector Led Panel*”) kapcsolótábla valósítja meg.

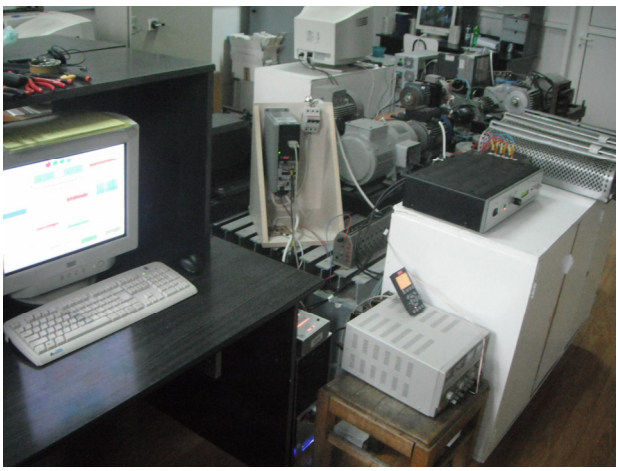
Az alkalmazott szoftver összetevők a rendszert irányító számítógépbe (PC) vannak feltöltve. A PC-be helyezett DS1104 PPC („*PowerPC*”) digitális processzoros jelfeldolgozó vezérlőkártya a számítógép PCI interfészen keresztül csatlakozik a rendszerhez.

A próbapadon a turbinát helyettesítő kalickás indukciós motort (IM) egy DANFOSS gyártmányú VLT FC302-es típusú 2,2 kW-os ipari frekvenciaváltó táplálja, mely automatikus motoradaptációs (AMA) funkcióval rendelkezik. A meghajtó rendszert egy úgynevezett Voltage Vector Control® (VVC$^{+®}$) szabályozza.

A kiálló pólusú szinkron gép (GtM típusú UMEB gyártmányú) névleges adatai: P_{sN} = 800 W, f_{sN} = 50 Hz, U_{sN}^{eff}= 380 V, I_{sN}^{eff}= 1,52 A, $\cos\varphi_{sN}$ = 0,8 (kapacitív),

n_N = 1500 ford./perc, U_{eN} = 110 V$^{=}$ gerjesztéssel [18] – [23].

A próbapadon a generátort meghajtó, a turbinát helyettesítő kalickás indukciós motor névleges adatai: P_{sN} = 1,5 kW, f_{sN} = 50 Hz, U_{sN}^{eff}= 230 V, I_{sN}^{eff}= 3,8 A, n_N = 1415 ford./perc, cosφ_{sN} = 0,76 [20].



4. ábra. *A próbapad fényképe*

6. Szimulációs és gyakorlati kísérletek és eredmények

A gyakorlati kísérletek alatt a rendszer viselkedését vizsgáltuk, indítás során, állandósult állapotban (ÁÁ), valamint átmenti tranziens üzemmódokban. Az indítás pillanatában az armatúra-feszültség amplitúdó U_s^{Ref} és a frekvencia f_s^{Ref} alapjelei megfeleltek az ÁG-SzG névleges értékeinek [19] – [21], [23].

Az ÁÁ beállta után, újabb tranziens állapot alatt vizsgáltuk a rendszer viselkedését: egy bizonyos idő elteltével módosítottuk a két előírt referenciát egyazon pillanatban, miközben a 3 fázisú R-L passzív terhelés változatlan maradt [19] – [21].

Eben a dolgozatban az eredmények arra a megzavart esetre vonatkoznak, amikor a már ÁÁ-ban működő generátor R-L passzív terhelésében az ellenállás értéke hirtelen megváltozik.

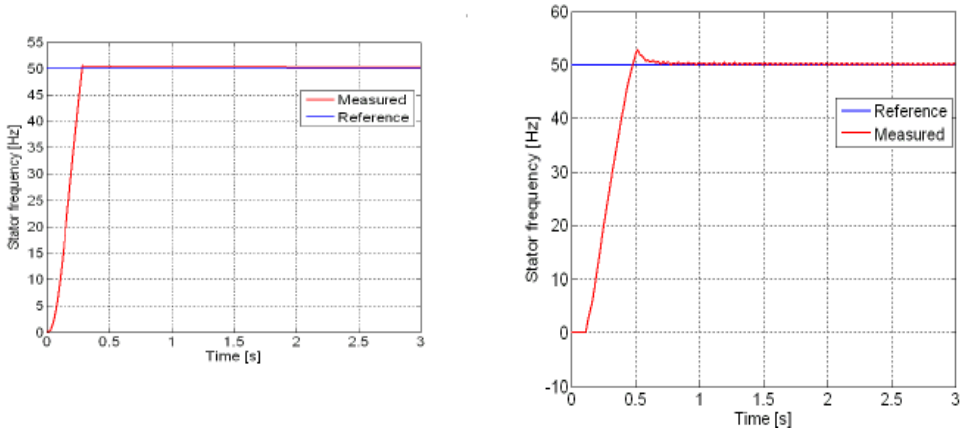
7. Szimulációs és mérési eredmények

Az implementációs mérési eredményeket és a szimulálási eredményeket az **5–9. ábrák**ban mutatjuk be.

A **6–9. ábrák**on a rendszer megzavarása a szimuláció esetén az 1,25s, illetve a próbapadon az 1s pillanatában történt az R-L terelés ellenállásának hirtelen a felére (lépcsőugrásszerű) csökkentésével [19] – [21], [23].

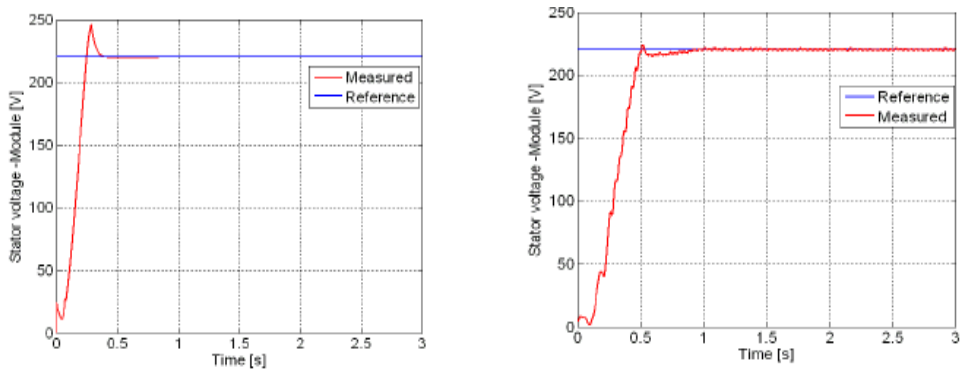
8. Következtetések

Ha az ÁG-SzG egyenáramú hálózatot táplál, akkor a termelt VÁ villamos energiát egyenirányítjuk, amit diódás egyenirányítóval gyakorlatilag meddő energiatermelés nélkül is meg lehet oldani, ezért a mezőorientált armatúra-visszahatás hosszanti ÖT-je ($\Psi_{ssd\lambda s}$), illetve a sztátoráram direkt komponense ($i_{sd\lambda s}$) közel nulla lesz [5], [9], [11], [16], [22].



Szimulációs eredmény *Implementációs mérés*

a) *A frekvencia alapjele és a generátor sebessége egy póluspárra átszámítva ford./s-ben mérve*



Szimulációs eredmény *Implementációs mérés*

b) *A generátor armatúra kapocsfeszültségének effektív értéke*

5. ábra. *Indításkor a szabályozási hurkok válasza egységugrásszerű alapjelváltozására*

A szimulálásra alkalmazhatunk generátor MaMo-t, illetve motor MaMo-t. Mint ismeretes, mindkét matematikai modellel szimulálni lehet mindkét üzemmódot. A kétféle MaMo-ban a bemenő és a kimenő armatúra villamos mennyiségek felcserélődnek. A motor MaMo-nál a sztátorfeszültségek bemenő és a sztátoráramok a kimenő jelek, melyeket integrálással számítunk ki. A generátor MaMo-nál viszont a sztátor A VSz struktúrában a csillapítórudak MaMo-jának figyelembevételével csökkenthetők a tranziens üzemmódban fellépő lengések azokhoz képest, amikor a vezérlő mennyiségek és alapjelek kiszámításánál ezt elhanyagoljuk [23].

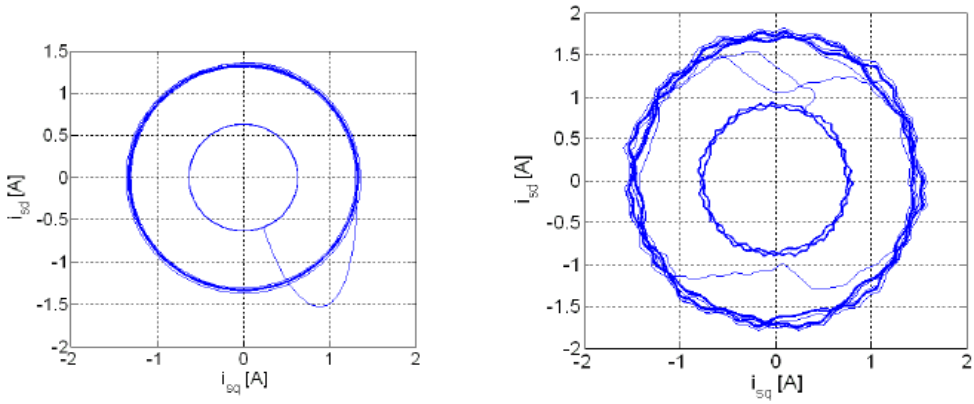
Sztatorfeszültségek a kimenő, míg a sztátoráramok a bemenő jelek, melyeket deriválni kell [10], [18].

A motor MaMo-t azért választottuk a szabályozás szimulálására, mert ez a modell felel meg a fizikai jelenségeknek, azaz gyakorlatilag a feszültség generálja az áramot. Ezért az implementációra, mely a szimulá-

ciós struktúra kompilálása alapján történik, a motor MaMo-t lehet alkalmazni, melyre a feszültségbemeneti változók a jellemzők.

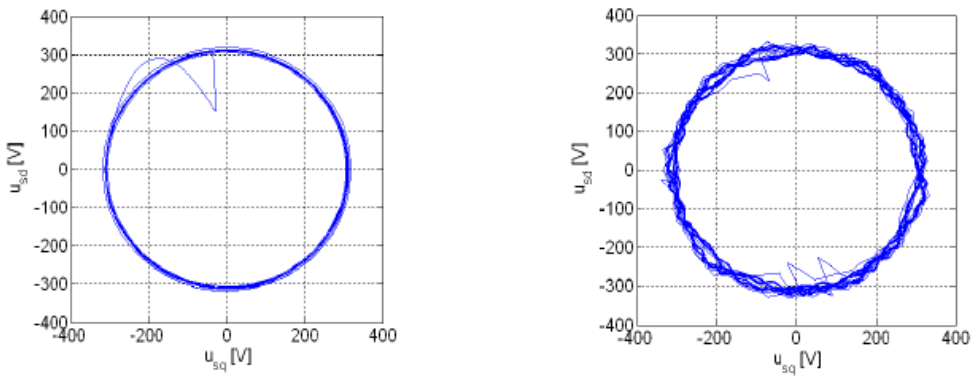
A gerjesztőáram mérésével, illetve az alapjelének a kiszámított értékével lehetőség adódik az orientációs fluxusnak az árammodell alapján való identifikációjára a feszültségmodell integrálása helyett.

Ennek az eljárásnak a legfőbb előnyei abban állnak, hogy kis számításigényű, mentes az integrátorok okozta nehézségektől, és alacsony sebességtartományban megbízhatóbb a feszültségmodellnél [13] – [15].



Szimulációs eredmény *Implementációs mérés*

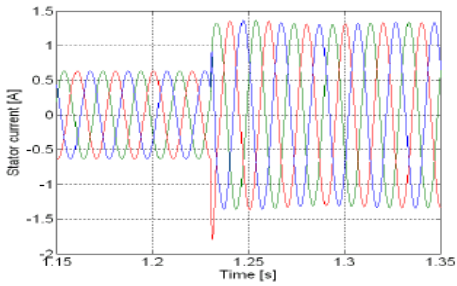
a) *Az állórészáram térfázor diagramjai*

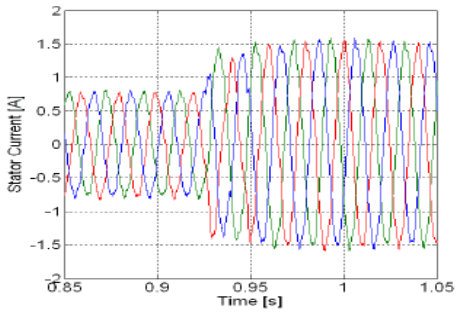


Szimulációs eredmény *Implementációs mérés*

b) *Az állórészfeszültség térfázor diagramjai*

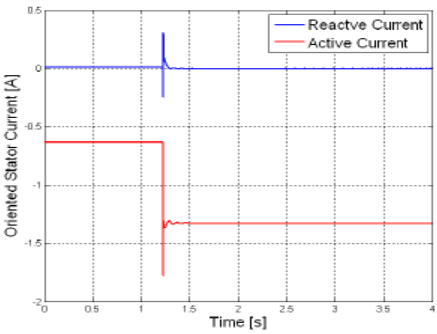
6. ábra. *Térfázor diagramok a terhelés ellenállásának lépcsőugrásszerű változtatására.*

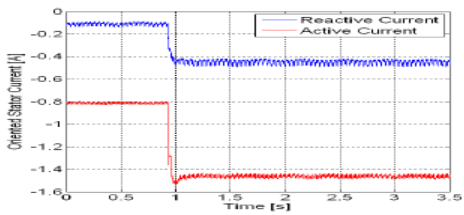




Szimulációs eredmény *Implementációs mérés*

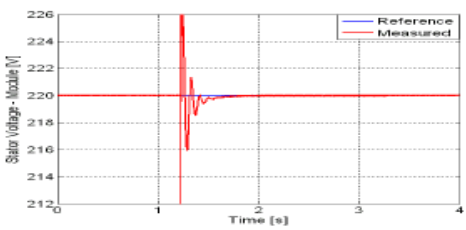
7. ábra. *Az állórész 3 fázisú feszültségeinek időbeli lefolyása a terhelés ellenállásának lépcsőugrásszerű változtatására*

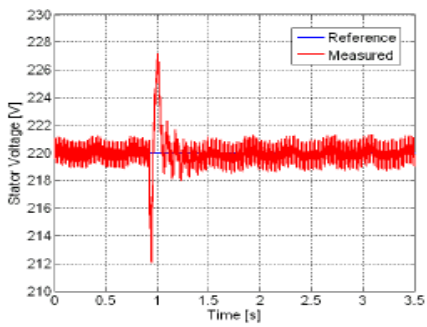




Szimulációs eredmény *Implementációs mérés*

8. ábra. *Az armatúra-áramvektor szabályozott aktív és reaktív összetevőinek az időbeli lefolyása a terhelés ellenállásának lépcsőugrásszerű változtatása esetében*

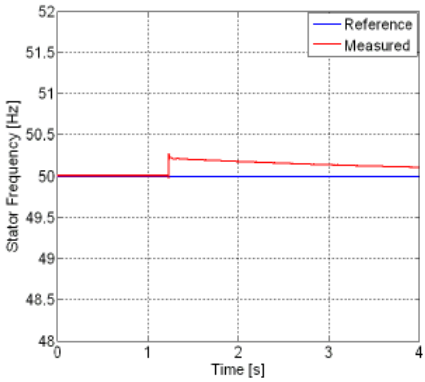




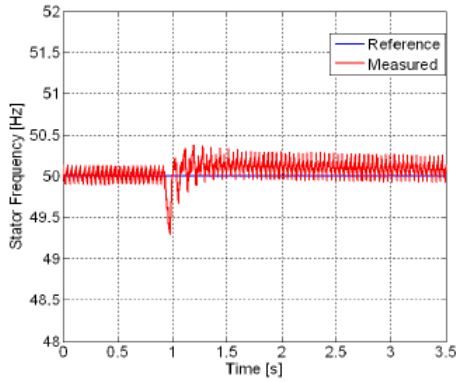
Szimulációs eredmény *Implementációs mérés*

a) *Az állórészfeszültség amplitúdójának az időbeli változása*

9a. ábra. *Eredmények a terhelés ellenállásának lépcsőugrásszerű változtatása esetében*



Szimulációs eredmény



Implementációs mérés

b) *Az állórészfeszültség frekvenciájának az időbeli változása*

9b. ábra. *Eredmények a terhelés ellenállásának lépcsőugrásszerű változtatása esetében*

9. Jövőbeli kutatási célok

A passzív terhelés helyett a vektoriálisan szabályozott ÁG-SzG EÁ hálózatra való kapcsolását tűztük ki, egy egyenirányító segítségével, mely impulzusszélességmodulációval (ISzM) vezérelt aktív szűrővel van ellátva. Ennek a rendszernek a szimulációs eredményeit már előzőleg bemutattuk [5], [9], [11], [22].

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Á. Kelemen, Maria Imecs: *Analogy between DC- and synchronous machine for field-oriented control*, Beijing Internat. Conference on Electrical Machines BICEM ’87, China Academic Publishers, 1987.

[2] Kelemen Arpad, Imecs Maria: Metodă şi sistem de reglare automată vectorială a puterii active şi reactive a generatoarelor sincrone, Brevet de invenţie, Romania, Nr. 104278, 30.10.1989.

[3] Kelemen Arpad, Imecs Maria: *Vector control system for frequency and voltage of synchronous generators*, 9th Internat. Conference on Electrical Machines ICEM‘90, Cambridge, Massachusetts, USA, 1990, 416–421 old.

[4] Kelemen Árpád, Imecs Mária: *Vetor Control of AC Drives*. Vol. 1, OMIKK Publisher, Budapest, 1991, Vol. 2, Ecriture Publisher, Budapest, 1993, ISBN 963 593 140 9.

[5] Imecs Maria, Incze I. I., Szabo Cs.: *Ecological power system with local distribution DC-line for AC-drive consumers*, IFAC Workshop ICPS‘07, Cluj-Napoca, 2007, ISBN: 978-973-713-180-5, 71-76 old.

[6] Incze J. J., Imecs Mária, Mátis I. Szabó Cs.: *Korszerű kísérleti próbapad szabályozott váltakozó áramú villamos hajtások fejlesztésére,* VI. ENELKO*,* Kolozsvár 2005*,* Kiadó: EMT, 2005, ISSN 973-7840-06-2, 62-68 old.

[7] Incze J. J., Szabó Cs. Mátis I., Imecs Mária, Zoltán E.: *Váltakozóáramú villamos hajtások vezérlésének kísérleti implementációja,* VI. ENELKO*,* Kolozsvár, 2005, Kiadó: EMT, 2005*,* ISSN 973-7840-06-2, 69–75 old.

[8] Incze I. I., Szabó Cs., Imecs Mária, Mátis St., Szőke Enikő: „*Computer controlled up-to-date experimental equipment for ac drive development”,* 6th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence, *HUCI 2005*, 2005, Budapest, ISBN .963 7154 43 4, 355–365 old.

[9] Imecs Maria, Incze I. I., Szabo Cs.: *Control of the energy flow in a DC distribution line, autonomous synchronous generator and AC grid by means of power electronic converters: modeling and simulation*, 9th International Carpathian Control

Conference ICCC 2008, Sinaia, 2008, ISBN 978-973-746-897-0, 255–258 old.

[10] Imecs Mária, Incze J. J., Szabó Cs.: *Stator-field oriented control of the synchronous generator: numerical simulation*, 12th IEEE INES 2008, Miami, Florida, USA, ISBN: 978-1-4244-2083-4, IEEE Catalog Number: CFP08IES-CDR, Library of Congress: 2008900450, 93–98 old.

[11] Imecs Maria, Szabó Cs., Incze I. I.: *Modelling and simulation of a vector controlled synchronous generator supplying a DC energy distribution line coupled to the AC grid*, 19th SPEEDAM 2008**,** Ischia, IEEE ISBN: 978-1-4244-1664-6, Library of Congress: 2007936381, 538–543 old. Cat. Nr. CFP 0848 A-CDR,

[12] Szabó Cs., Incze J. J., Imecs Mária: *Szinkronmotor fluxusának áram-modellen alapuló identifikációja,* IX. ENELKO*,* Csíksomlyó 2008*,* EMT kiadó Kolozsvár, ISSN 1842-4546, 64–69 old,

[13] Incze I. I., Szabó Cs., Imecs Maria: *Flux identification for vector control of the synchronous motor drives*, AQTR 2008 (THETA 16), Cluj, Volume II, pp. 105–110, CD-ROM, IEEE Catalog Nr: CFP08AQT.

[14] Szabó Cs., Incze J. J., Imecs Mária: Szinkronmotor fluxusának áram-modellen alapuló identifikációja, ENELKO 2008, Csíksomlyó, Kiadó: EMT, ISSN 1842-4546, pp. 64–69.

[15] Incze I. I., Szabo Cs., Imecs Maria: *Voltage-model-based flux identification in synchronous machine drives*, 10th International Carpathian Control Conference ICCC 2009, Zakopane, 2009, 253–256 old.

[16] Imecs Mária: *Vector control of the current-excited synchronous generators*, 2nd MACRo 2010, Tg. Mures SAPIENTIA Univ., Scientia Publishing House, Cluj-Napoca, 2010, ISBN 978-973-1`970-39-4, 143–154 old.

[17] Imecs Mária: *A villamos gépek modern szabályozási módszerei a térfázor elmélet alapján*, XVI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, FMTÜ 2011, Kolozsvár*,* Műszaki Tudományos Füzetek*,* EME, Kolozsvár, ISSN 2067-6 808, XIX–XLIV (26) old., http://eda.eme.ro/handle/10598/13994

[18] Imecs Mária, Rus D. C., Szabó Cs., Incze J. J.: *Skalárisan szabályozott szinkron generátor matematikai modelljeinek vizsgálata numerikus szimuláció útján*, XIII. ENELKO 2012, Gyulafehérvár, EMT kiadó Kolozsvár, ISSN: 1842-4546, 90–95 old.

[19] Rus D. C., Incze I. I., Imecs Maria, Szabo Cs.: *Vector control implementation for a wound-excited synchronous generator neglecting the damping effect*, ELECTROMOTION Journal, Vol. 20, Nr. 1–4, 2013, Cluj-Napoca, ISSN 1223-057X, 178–182 old.

[20] Rus D. C.: *Practical Implementation of Vector Control Strategy for an Electrically Excited Synchronous Generator* (román ny.), PhD Disszertáció, témavezető Imecs Mária, Kolozsvári Műszaki Egyetem, 2013.

[21] Imecs Mária, Rus D. C., Szabó Cs.: Incze J. J., Szőke sz. Benk Enikő: *Vektoriálisan szabályozott szinkron generátor numerikus szimulációja és implementációja*, XVI. ENELKO, Arad 2015, EMT kiadó, Kolozsvár, ISSN 1842-4546, 63–68 old.

[22] Imecs Mária, Szabó Cs., Incze J. J., Szőke (sz. Benk) Enikő: *Egyenáramú hálózatra kapcsolt vektoriálisan szabályozott szinkron generátor szimulációja*, XVI. Műszaki Tudományok Ülésszaka MTÜ 2015, Erdélyi Múzeum Egyesület Műszaki Tudományos Szakosztálya, Kolozsvár, 2015,

[23] Imecs Mária, Szabó Cs.: Szőke sz. Benk Enikő, Incze J. J., Rus D. C.: *Kiálló pólusú csillapító-rudas szinkrongenerátor vektoriális szabályozása*, XVII. ENELKO, Kolozsvár 2016, EMT kiadó, Kolozsvár, ISSN 1842-4546, 65–71 old.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 115–124. 12
http://hdl.handle.net/10598/30074

A KŐZETJÖVESZTŐ BONTÓFOGAK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE

DIGGING TOOLS OPTIMAL DIMENSIONING

Kovács József[1], András József[2], András Endre[3]

Petrozsényi Egyetem, 332006, Románia, Petrozsény, str.Universității,20

[1] *kovacsi@mail.com*

[2] *iosif.andras@gmail.com*

[3] *andrei.andras@gmail.com.*

Abstract

The paper deals with the digging tools mounted on the buckets of bucket wheel excavators, so called teeth, namely with their shape and strength optimization, taking into account different operating situations, including extreme ones. The excavation process has a complex character, which requires a multi-criterion optimization approach. The experience gained by the authors and the literature findings have demonstrated that this requirement is possible to be fulfilled only when in theoretical mathematical assumptions we use data gathered from rig and in-situ measurements. In this respect, we determined the constructive, shape and strength parameters of teeth in order to obtain maximal excavation productivity and increased reliability.

Keywords: *Bucket wheel excavator, tooth, optimization, dimensioning*

Összefoglalás

A dolgozat a bányászatban alkalmazott kotrógépek bontófogainak mértani paramétereivel, ezek optimalizálásával foglalkozik, figyelembe véve az üzemelés közben létrejövő helyzeteket, beleértve a szélsőségeseket is. A jövesztési folyamat egy komplex jelenség, amely egy többcél-függvényű optimalizálási megközelítést igényel. A szerzők által nyert tapasztalat, valamint a szakirodalom jelzései azt bizonyítják, hogy csak akkor lehet ezt az igényt kielégíteni, ha a kifejlesztett elméletben található matematikai összefüggésekbe a gyakorlatból vett, labor és in situ mérések alapján meghatározott adatokat használunk fel. Ezt az irányt követve sikerült meghatározni a bontófog paramétereinek értékeit úgy, hogy az maximális hatékonysággal működjön, és a megbízhatósága is magas legyen.

Kulcsszavak: *kotrógép, bontófog, optimalizálás, jövesztés*

1. Bevezető

Mind az elméleti, mind a gyakorlatban végzett kutatások azt bizonyítják, hogy a marótárcsás kotrógépek esetében a bontófogak mértani paraméterei lényegesen befolyásolják a jövesztést és a gép működését, főleg ami a marótárcsát, a merítékeket és a bontófogakat illeti, úgy technológiai, mint energetikai szempontból.

A mértani paraméterek elsősorban magára a bontófogra vonatkoznak, mint az egész konstrukció elemei, utána a merítékre szerelt bontófog geometriai paraméterei és végül azok a mértani paraméterek, amelyek a bontófogak eloszlásából származnak.

A jelen dolgozatban elvégzett optimalizálás egyelőre a bontófogakra mint önálló elemekre vonatkozik, figyelembe véve a bontófogak racionális vágóélre ültetését különböző merítékek esetében.

A feladat megoldását az nehezíti, hogy a jövesztéssel kapcsolatos, véletlenszerű és ellentétes értelmű jelenségeket nagyon sok paraméter határozza meg, ezért, gyakorlatilag nem lehet olyan pontos matematikai összefüggéseket felírni, amelyek precízen fedjék a valóságot.

A valóság jobban megközelíthető, ha a jövesztési labor- és in situ kísérletek során mért adatokat használjuk fel, mind az össze-függések, mind a paraméterek értékeinek viszonylatában.

Amint ismert, a bontófogak formája és mértani paraméterei lényegesen befolyásolják a fajlagos energiafogyasztást, de a bontófogak élettartamát is, figyelembe véve a bontófog alapanyagának fizikai és mechanikai tulajdonságait.

Ezenkívül figyelembe kell venni a bontófogak kopását is, e tekintetben lényeges olyan bontófogformából kiindulni, amely minél hosszabb ideig megőrzi eredeti mértani paramétereit.

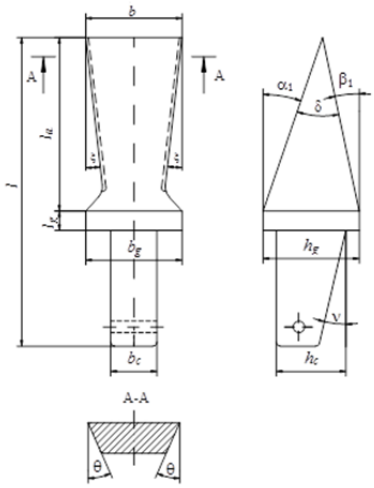
A bontófogak megfelelő minősége nemcsak a kotrógép alacsony energiafogyasztású üzemeléséhez vezet, hanem a fogfogyasztás is csökken, ami a hatékonyság növelését és a költségek csökkenését vonja maga után.

2. A bontófog mértani paraméterei

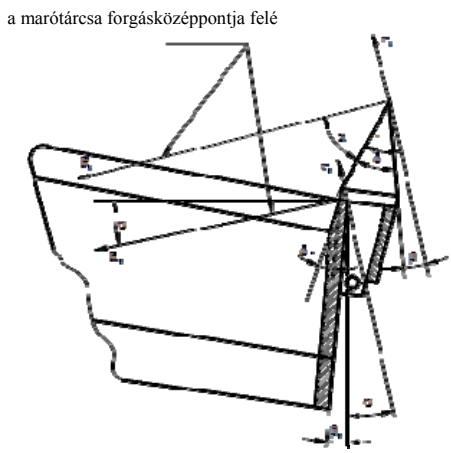
A bontófogak mértani paramétereit ezek formája és típusa határozza meg.

Ezek függnek a jövesztett anyag minőségétől és a forgácsolhatósági jellemzőitől, a meríték és a marótárcsa konstrukciós paramétereitől, a kotrógép működési adataitól, a bontófog szilárdságtani tulajdonságaitól és a kopás intenzitásától.

A gyakorlatban két alaptípusú bontófogat használnak, éspedig a hasáb alakú és a körkúp alakú bontófogat. A körkúp alakú típust inkább a rakodógépeknél és az egymerítékes kotróknál használják, míg a hasáb alakút többek között a marótárcsás kotrógépeknél talált alkalmazásra az előnyösebb jövesztési jellemzői matt.



1. ábra. *Az önálló bontófog mértani paraméterei*



2. ábra. *A meríték vágóélére szerelt bontófog mértani paraméterei*

Az **1. ábrá**n az önálló bontófog mértani paraméterei, a **2. ábrá**n pedig a meríték

vágóélére szerelt bontófog megfelelő paraméterei vannak feltüntetve.

Amint e két ábrából következik, a főbb paraméterek a következők:

l – a bontófog hossza,
l_a – a bontófog aktív hossza,
b – a vágóél szélessége,
R_t – a marótárcsa sugara a bontófog éléig,
R_c – a marótárcsa sugara a meríték éléig,
α – homlokszög,
β – hátszög,
γ – vágószög,
δ – ékszög,
θ – keresztirányú oldalszög,
ξ – hosszanti oldalszög,
φ – a fogélpálya érintőjének a függőlegessel bezárt szöge,
α_1 – az önálló bontófog homlokszöge,
β_1 – az önálló bontófog hátszöge,
v_t – vágósebesség,
v_c – a merítékél sebessége.

A bontófogat jellemző szögek közötti kapcsolatok a következők:

$$\alpha + \gamma = 90°$$
$$\gamma = \beta + \delta$$
$$\delta = 90° - (\alpha + \beta)$$
$$\alpha_1 + \beta_1 = \delta$$

A gyakorlatban az α homlokszög 40...60°, a β hátszög 5...15°, a γ vágószög 30...50°, a δ ékszög 25...45°, a bontófog hossza 300...500 mm, míg a vágóél szélessége 80...180 mm. Természetes, hogy az önálló bontófog geometriai paraméterei és a merítékre szerelt bontófog geometriája között pontos összefüggések vannak.

Ezeket szigorúan be kell tartani a rögzítési rendszertől függetlenül, mert ellenkező esetben megváltozik a jövesztett kőzet és a marótárcsa között létrejövő kölcsönhatás, és a kotrógép működése nem lesz megfelelő.

3. A bontófogak geometriájának hatása a jövesztésre

A heterogén anyagok, mint a kőzetek vagy a hasznos ásványi anyagok jövesztése, egyrészt a jövesztett anyag jellemzőitől, másrészt pedig a jövesztőszerszám alakjától és mértani paramétereitől függ.

A természetben előforduló anyagok közül nagyon sok forgácsolható. Ezeket többek között, kotrógépekkel lehet kitermelni.

A jövesztheto anyag sokféle, nemcsak ami a szerkezetét és fizikai jellemzőit illeti, hanem a jövesztési folyamatban a forgácsképződést és a forgácskitörést is figyelembe véve.

A **3. ábra** négyféle anyagtípus jövesztése következtében létrejövő forgácskitörést szemlélteti.

A **3a. ábrá**n látható a kompakt, de törékeny anyag jövesztése. Itt a forgácsok méretei megközelítőleg egyformák. Ezek, a jövesztés folyamatában elugranak a foghomlokról, s ebből kifolyólag a kopás kisebb, a rányomó erő pozitív, tehát a kőzet ellenáll a bontófog behatolásának a haladási sebesség irányában.

A **3b. ábrá**n látható a természetesen létrejött repedésekkel rendelkező törékeny anyag jövesztése, ahol a forgácsok különböző méretűek, és sok apró szemcsét tartalmaznak. Ebben az esetben nagy menynyiségű por keletkezik. A jövesztés dinamikus, a kopás nem nagy, és az erők pozitív irányban hatnak.

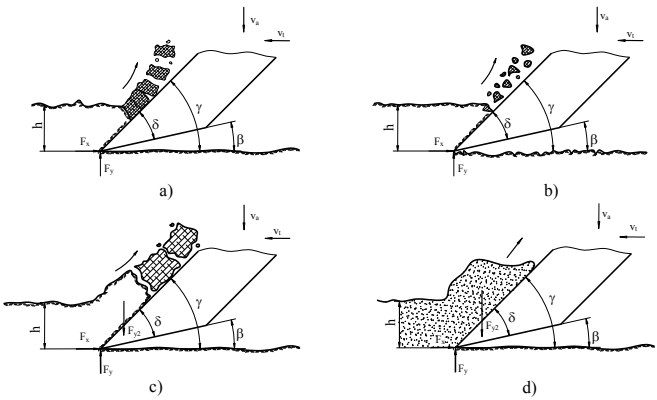
A **3c. ábrá**n a rugalmas, jól hajlítható anyagok jövesztése van feltüntetve, amelyek átveszik és elnyelik a befektetett energia egy részét. A forgács, mielőtt repedne, ránehezedik a bontófog homlokára, és emiatt a rányomó erő eredője nagyobb homlokszög esetében, negatív lesz. A homlokfelületen a kopás jelentős, mert ezen csúsznak a forgácsdarabok. Ilyen például a xiloid (fás) lignit jövesztése.

A **3d. ábra** a gyenge kohéziós és természetesen szemcsés anyagok (kavics, homok, lösz) jövesztési modelljét szemlélteti, ahol azt lehet kiemelni, hogy a hatóerők nem nagyok, a forgács tulajdonképpen a bontófoghomlokon felcsúszó csomóvá lett anyagmennyiség, amely miatt a rányomó erők eredője szintén negatív, akárcsak az

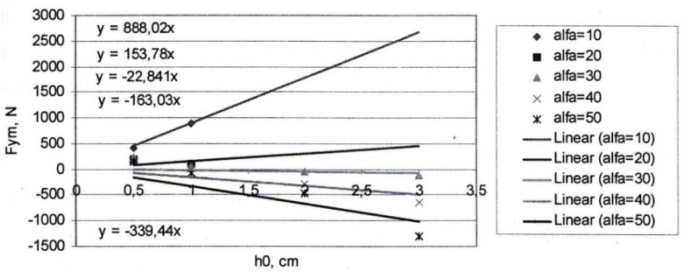
előző esetben. Az ilyen kőzetek általában nagy szilíciumtartalommal rendelkeznek, és így a homlokfelület kopása igen intenzív.

A harmadik és negyedik esetben mondottakat két példával támasztjuk alá, éspedig figyelembe véve a dél-romániai lignittelepekről származó mintákon végzett laboratóriumi jövesztési kísérletek során rögzített és matematikailag feldolgozott adatokat, amelyek a rányomó erő változására vonatkoznak a fogásmélység függvényében, különböző homlokszög értékekre.

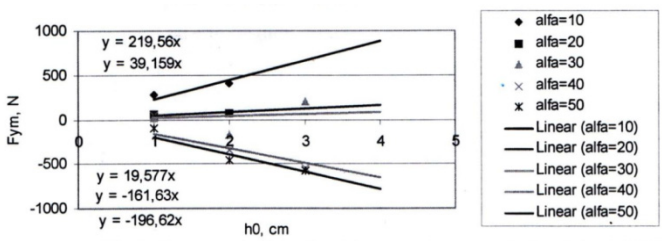
A **4. ábrán** az I. telepre vonatkozó adatok, az **5. ábrán** a X. telepre vonatkozó eredmények vannak feltüntetve.



3. ábra. *A nem homogén anyagok jövesztési módja*



4. ábra *A rányomó erő változása a fogásmélység függvényében az I. telep esetében*



5. ábra. *A rányomó erő változása a fogásmélység függvényében az X. telep esetében*

Mindkettőn látható az, hogy a 10, 20 és 30°-os homlokszögű bontófogak esetében az F_y rányomó erő konvencionálisan pozitív, tehát a lignit ellenáll a behatolásnak, míg 40 és az 50°-os homlokszög esetében az F_y rányomó erő konvencionálisan negatív, mintha a lignittelep vonzaná a bontófogat.

Ezek az adatok bizonyítják azt, hogy a jövesztés tanulmányozásában milyen nagy szerepet játszik a bontófogak geometriája.

4. A homlokszög hatása a fogak terhelésére és a jövesztés energetikájára

Mind a hazai, mind a külföldi irodalomból és saját tapasztalatból is ismert, hogy a kőzetek vagy a hasznos ásványok jövesztését lényegesen befolyásolják a bontófogak geometriai paraméterei, főleg ami a vágó- és rányomó erőket, a kitörési szöget, valamint a fajlagos energiafogyasztást illeti, amelyek továbbá befolyásolják a fogak, a merítékek és a marótárcsa terhelését, a fogkopást, valamint a jövesztés hatékonyságát általában.

A bontófog geometriai paraméterei közül az egyik legnagyobb szerepet a bontófog α homlokszöge, illetve ennek a kiegészítőszöge, a γ vágószög játssza.

A többi élszög, mint a β hátszög, a θ és ξ oldalszögek értéke egy szűk intervallumban mozog, és a fölösleges súrlódások elkerülése függvényében állapítható meg. Ha a β adott, akkor a δ ékszög is az α-tól függ.

A lignit, a kőszén, a kősó és a különböző meddőkőzet jövesztésére vonatkozó laboratóriumi vagy üzemi körülmények között végzett vizsgálatok rámutattak arra, hogy az F_x vágóerő és az F_y rányomó erő csökken, ha nő az α szög értéke. A szögek közötti összefüggések viszont azt mutatják, hogy ha nő az α homlokszög, akkor megfelelő β hátszög esetében ez a δ ékszög rovására megy, ami a bontófog teherbírásának csökkenését vonja maga után.

Észrevehető, hogy a két megállapítás igaz, de ellentmond egymásnak. Hogy melyik a fontosabb, azt nem lehet első látásra megállapítani. Éppen ezért van szükség egy elmélet felállítására, amelynek alapjaként a többcél-függvényű optimalizálás törvényeit lehet alkalmazni.

5. Az elméleti alap kidolgozása

A bontófogat egyszerűsítve egy rúddal modellezhetjük. A rúd egyik vége befogott, a másik vége két koncentrált erővel terhelt.

Az egyik koncentrált erő (T) a rúd hossztengelyére merőlegesen, a másik (N) annak irányába hat.

Az *N* erő a rúd minden keresztmetszetében hajlító nyomatékot, a *T* erő pedig húzást-nyomást gyakorol. Tehát minden keresztmetszetben összetett igénybevétel keletkezik, ennek maximális értékét a következő egyenlettel lehet kifejezni:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_T = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \qquad (1)$$

ahol

N – normál irányba ható erő;
T – merőleges irányba ható erő;
M – a T erő hajlítónyomatéka;
x – a keresztmetszet távolsága a bontófog éléig;
A – a keresztmetszet területe;
W– a keresztmetszeti tényező.

Az **1.** és a **2. ábrá**kra alapozva, az N és T erőket a bontófogra ható *Fx* és *F*y erők, illetve a mértani paraméterek függvényében a következő módon lehet meghatározni:

$$N = Fx \sin(\alpha+\delta/2) \pm Fy \cos(\alpha+\delta/2) \qquad (2)$$

$$T = Fy \sin(\alpha+\delta/2) \pm Fx \cos(\alpha+\delta/2) \qquad (3)$$

Mivel az F_x vágóerő és az F_y rányomó erő között létezik a következő összefüggés:

$$F_y = k_y . F_x , \qquad (4)$$

a (2) és (3) egyenleteket a következő alakban lehet átírni:

$$N=Fx\ (\sin(\alpha+\delta/2) \pm ky\ \cos(\alpha+\delta/2)) \qquad (5)$$

$$T= Fx\ (\cos(\alpha+\delta/2) \pm ky\ \sin(\alpha+\delta/2)) \qquad (6)$$

Mind az Fx és Fy erők, mind a ky együttható szintén az α szög és a h fogásmélység függvényében változnak.

Az (1) egyenlet tehát a következőképen alakul:

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_T = \frac{N(\alpha,h)}{A(x)} \pm \frac{T(\alpha,h)\cdot x}{W(x)} \qquad (7)$$

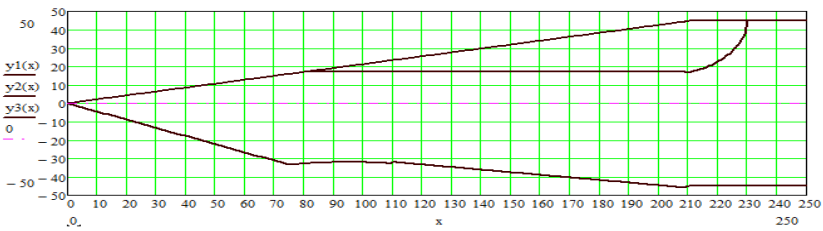
Az optimalizálás feladata egyrészt az, hogy a keresztmetszet alakváltozása az egyenszilárdságú rúdhoz minél közelebb legyen, másrészt pedig, hogy a maximális feszültség ne haladja meg az anyag megengedett feszültségét.

Tehát:

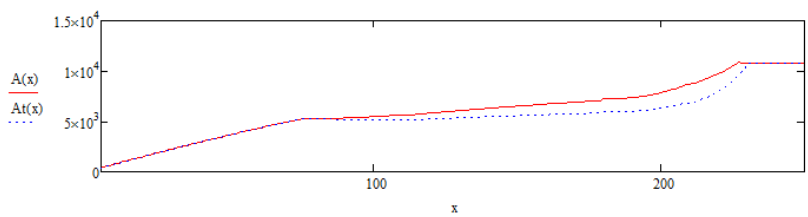
$$\sigma(x) = const.\ ,\ 0 < x < l_o,$$

$$\sigma(x) < \sigma_a$$

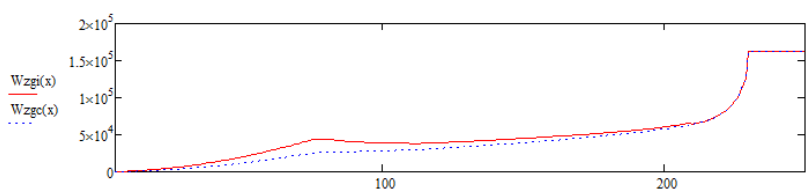
Mivelhogy a bontófog hosszirányában a keresztmetszet alakja változik, az A(x) és W(x) függvények leírásához a MATHCAD programot használtuk. A **6. ábrá**n, az analitikusan szerkesztett hosszmetszet, a **7.** és **8. ábrá**kon pedig a keresztmetszet területe és a keresztmetszeti tényező változásának a görbéi láthatók.



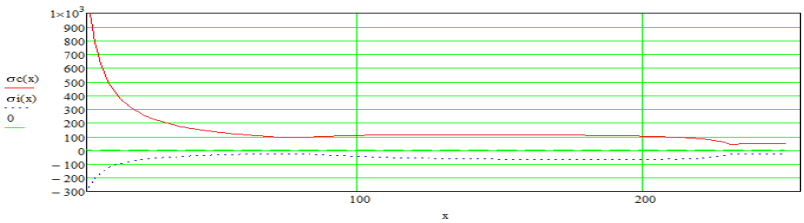
6. ábra. *A bontófog analitikusan szerkesztett hosszmetszete*



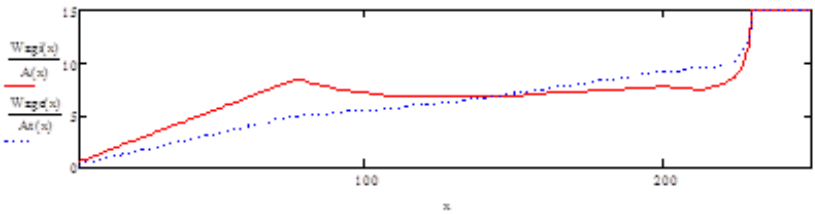
7. ábra. *A bontófog keresztmetszete területének változása*



8. ábra. *A bontófog keresztmetszeti tényezőinek változása*



9. ábra. *A bontófog keresztmetszetén keletkező húzás nyomás feszültségek diagramjai*



10. ábra. *A bontófog keresztmetszetét jellemző W(x)/A(x) változása*

A húzás-, illetve nyomásfeszültségek diagramjai a **9. ábrán** láthatók. Az ábrákból kitűnik, hogy a bontófog élétől mérve egy 40 milliméteres szakasz kivételével a feszültség majdnem állandó értékű, ami bizonyítja az optimalizálási kritérium helyességét.

A **10. ábrán**, a W(x)/A(x) hányadosát ábrázoltuk.

Bonyolultabb számításokkal, amelyeket most nem részletezünk, bebizonyítható hogy egy, a keresztmetszet alakjában és méreteiben változó, egyik végén befogott rúd akkor egyenszilárdságú, ha a W(x)/A(x) hányados lineárisan növekszik a hossz függvényében.

Ebből az ábrából az is következik, hogy ez a megállapítás igaz.

6. Gyakorlati alkalmazások

A külszíni bányákban jövesztett lignitféleségek és a különböző meddő kőzetek különböző fogparamétereket igényelnek ahhoz, hogy a jövesztés minimális energiafogyasztással történjen.

A bontófoggyártás szempontjából, az lenne előnyös, ha minden esetben ugyanazt, tehát egy univerzális bontófogat alkalmaznánk. Ebből az következik, hogy az egyik szempontot sem lehet kivételesen követni, hanem megegyeztető megoldást kell alkalmazni.

Ez azt jelenti, hogy az adott helyzetben a különböző körülményeket úgy kell csoportosítani, hogy ezek a jövesztés szempontjából közel álljanak egymáshoz, s az így kapott csoporthoz a megfelelő paraméterekkel rendelkező bontófogat kell kifejleszteni.

Lényegében a bontófog formája ugyanaz, de a fontos paraméterek csoportonként mások, s így születik meg a bontófog több racionálisan választott változatban. Ezek megfelelő alkalmazása minden esetben jó eredményhez vezet, mind az energiafogyasztást, mind a bontófogak gyártását illetően.

A kidolgozott és bemutatott elméletet alkalmazva a dél-romániai lignitmedence 7. vizsgált telepét és az itt jövesztendő meddőkőzeteket három csoportba osztottuk a fajlagos vágóerő szerint, s így nem három bontófog szükséges, hanem csak egy, ugya-

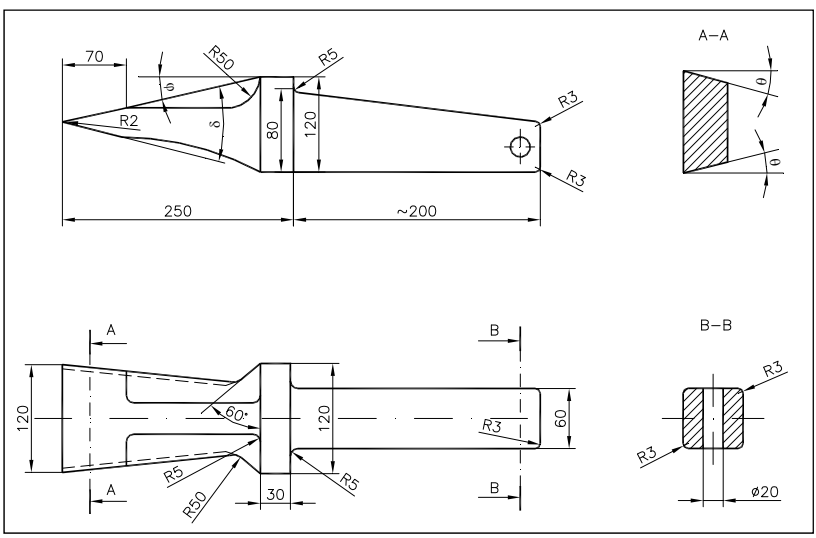
nazon formájú három változatban, amint az **1. táblázat**ban látható.

A geometriai paraméterek meghatározásánál figyelembe vettük a meríték élére ültetett bontófogat és annak alapformáját, ami a három változatnál nem módosul.

Ugyanakkor figyelembe vettük a leghasználtabb merítékek adatait, és így jött létre a javasolt bontófog alapformája és annak főbb méretei, amelyek a **11. ábrá**n láthatók.

1. táblázat. A fajlagos vágóerő és az ajánlott bontófog változatai

Jövesztett anyag / Fajlagos vágóerő N/cm	Meddő kőzet	Lignittelepek	Külszíni bánya	*Bontófog-változat*
A = 200...450	Homokos agyag	-	Roşia de Jiu	I
	Zöldes agyag	-	Roşia de Jiu Husnicioara	
A = 450...800	Homokos márga	-	Berbeşti (Panga) Olteţu	II
	Márgás agyag	V, VI, VII, VIII	Lupoaia	
	Szűrke agyag	VII, VIII	Roşiuţa	
	-	V, VIII	Roşia de Jiu	
	-	I, IV	Husnicioara	
A = 800...1200	-	I, II	Olteţu	III
	-	V, VII	Peşteana Nord	



11. ábra *A javasolt bontófog alapformája és adatai*

2. táblázat. *A javasolt bontófog három változatának geometriai paraméterei*

Sor sz.	Geometriai paraméterek	Jelölés	Bontófogváltozat		
			I-Meddő	II-Meddő +lignit	III-Lignit
1.	Homlokszög	α	55°	52°	47°
2.	Hátszög	β	7°	7°	7°
3.	Ékszög	δ	28°	31°	36°
4.	Vágószög	γ	35°	38°	43°
5.	Hosszanti oldalszög	ξ	5°	5°	5°
6.	Keresztirányú oldalszög	θ	3°	3°	3°
7.	A hátfelület dőlésszögének átlagértéke	φ	13°	13°	13°
8.	A vágóél szélessége	b	120 mm	120 mm	120 mm

A **2. táblázat**ban a három változat bontófog geometriai paraméterei figyelhetők meg, ahonnan kitűnik, hogy mi marad állandó, és mi változik a fog homlokszöge értékéből kiindúlva. Látható, hogy ezek értéke sorban 55°, 52° és 47°, a megfelelő ékszögek értékei pedig rend 28°, 31° és 36°. Tehát az I.-es bontófog kisebb, a III.-as nagyobb szilárdsággal rendelkezik, a II.-es közepes.

Gyakorlatilag az alapformát és a meghatározott paramétereket figyelembe véve megterveztük a három fogváltozatot, amelyek a **12., 13. és 14. ábrá**kon láthatók. Itt a előállításhoz szükséges összes mértani adat fel van tüntetve.

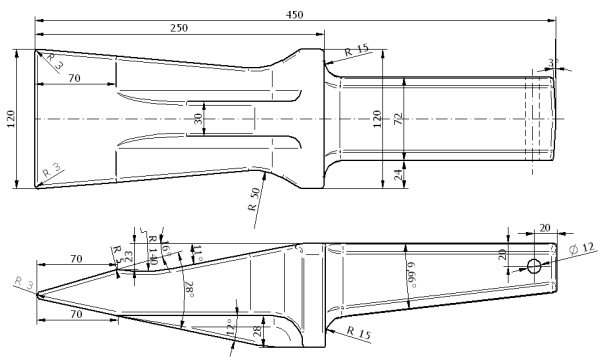
Amint látható, felülnézetben a bontófog szimmetrikus, míg oldalnézetben kissé aszimmetrikus.

A homlokfelület sík és folytonos a megengedett kopáshatárig, a másik oldal nem folytonos, és a 7°-os hátszög biztosítja a fölösleges és energianyelő súrlódás kiküszöbölését, akárcsak az oldallapok esetében.

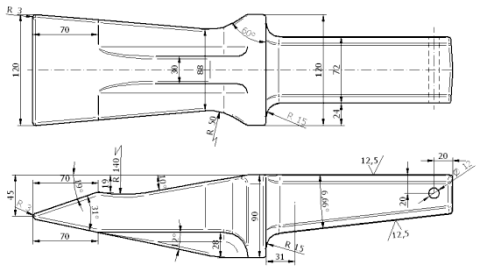
Ami a nyél adatait illeti, azok viszonylagosak, mert a merítéken található fogtartók formájától és a geometriai méreteitől függnek

A három javasolt bontófogváltozat fő méretei ugyanazok, az élszögek viszont különböznek, kivéve a hátszöget és az oldalszögeket.

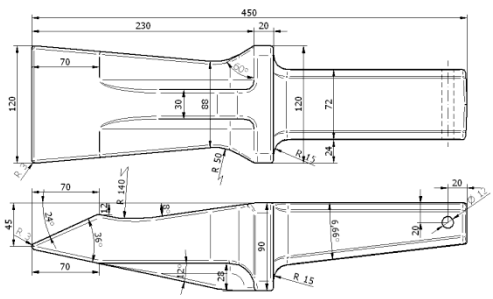
Ami a konstrukció alapanyagát illeti, azt úgy kell megválasztani, hogy minél nagyobb fajlagos teherbírása és jó kopásellenes tulajdonságai legyenek.



12. ábra *A javasolt bontófog I. változata*



13. ábra. *A javasolt bontófog II. változata*



14. ábra. *A javasolt bontófog III. változata*

7. Következtetések

Az előbbiekben bemutatott eredmények alapján a következő következéseket vonhatjuk le:

- a marótárcsás kotrógépek esetében a bontófogak mértani paraméterei lényegesen befolyásolják a jövesztést és a gép működését, főleg ami a marótárcsát, a merítékeket és a bontófogakat illeti, mind technológiai, mind energetikai szempontból;
- az optimalizálás legfontosabb lépése a bontófogakra mint önálló elemekre vonatkozik;
- az önálló bontófog geometriai paraméterei és a merítékre szerelt bontófog geometriája között pontos összefüggések vannak, amelyek szigorú betartása kötelező a jövesztett kőzet és a marótárcsa között létrejövő kölcsönhatás és a kotrógép megfelelő működése szempontjából;
- a jövesztési folyamat egy komplex jelenség, amely egy többcél-függvényű optimalizálási megközelítést igényel;
- a valóság megközelítésének céljából, a kifejlesztett elméletben található matematikai összefüggésekbe a gyakorlatból vett mérések alapján meghatározott adatokat használunk fel;
- a bontófog alapformáját és az elemzés alapján meghatározott paramétereket figyelembe véve három bontófog-változatot terveztünk meg, amelyek a gyakorlatban felhasználhatók.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Kovács I., Ilias N., Nan M.S.: *Regimul de lucru al combinelor miniere*. Editura UNIVERSITAS, Petroşani, 2000.

[2] Nan M.S.: *Parametrii procesului de excavare la excavatoarele cu rotor*. Editura UNIVERSITAS Petroşani, 2007.

[3] Sümegi I.: *Külfejtési marótárcsás kotrógépek jövesztő szerkezetének elméleti vizsgálata és fejlesztése*. Doktori értekezés PhD elnyeréséhez, Miskolci Egyetem.

XVII. Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2016. Kolozsvár, 125–130. 13
http://hdl.handle.net/10598/30076

MEGFORDÍTHATÓ ÜZEMÜ, SZABADDUGATTYÚS STIRLING-HŐERŐGÉPRE TERVEZETT LINEÁRIS ALTERNÁTOR FEJLESZTÉSE ÉS MEGVALÓSÍTÁSA

DESIGN AND DEVELOPEMENT OF A RECIPROCATING LINEAR ALTERNATOR FOR FREE PISTON STIRLING ENGINE

Máriás Nimród[1]

[1]*SC ARIADNE IMPEX SRL, 520077 Sfântu Gheorghe, jud. Covasna, str. Lt. Păiş David, nr. 12A, tel: 0754-686883, e-mail: mariasnimrod@yahoo.com*

Abstract

The linear alternator is the energy transformer system of the free piston Stirling engine. The linear motion is generating electricity. However, the alternator has an electric motor operating mode, which is required to start the Stirling engine. The linear alternator is within the Stirling engine pressure wessel, therefore the helium as working gas is well sealed.

Keywords: *linear alternator, free piston Stirling engine, environmental friendly energy source.*

Összefoglalás

A lineáris alternátor a szabaddugattyús Stirling-motorok energiaátalakító rendszere, mely vonal menti mozgásból villamos energiát állít elő. Ugyanakkor az alternátor motoros üzemmódban is működik, mely a Stirling-motor indításához szükséges. A lineáris alternátor a Stirling-motor nyomásköpenyén belül helyezkedik el, így elérhető a motor hélium munkagázának jó szigetelése.

Kulcsszavak: *lineáris alternátor, szabaddugattyús Stirling-motor, környezetbarát energiaforrás.*

1. Szabaddugattyús Stirling-motorra épített lineáris alternátor

Napjainkban egyre nagyobb hangsúly kerül a megújuló energiaforrásokat hasznosító berendezések fejlesztésére. A Naprendszer energiaforrása a Nap, melynek sugárzása széles spektrumban érkezik a Föld felületére. Napjaink legjobb energia átalakító berendezése a Stirling-motoros generátor, mely hőenergiát képes átalakítani villamos energiává. A Stirling-generátor meleg hőcserélőjére parabolikus tükrös koncentrátoron keresztül érkezik a Nap hője, mely a Stirling-generátort működésre készteti. A Stirling-motor pedig egy generátor által villamos áramot szolgáltat. Egy ilyen naperőmű megépítését 2015-ben a XX. FMTÜ alkalmával mutattam be. A lineáris alternátorral ellátott Stirling-motor erre a naperőműre épül, ugyanakkor a megalkotott Stirling-energiaátalakító a rakéta típusú kályhákban is fel lesz használva. A lineáris alternátor tervet a sepsiszentgyörgyi SC ARIADNE IMPEX műhelyében belül valósítottam meg id. Pózna Dávid igazgató úr támogatásával.

2. A lineáris alternátor

A lineáris alternátor a szabaddugattyús Stirling-motorok energiaátalakító rendszere. A Stirling-motor nyomásköpenyén belül helyezkedik el, hogy biztosítva legyen a motor nagy nyomású hélium munkagázának a szivárgásmentessége.

A felépítés miatt a beindításhoz szükséges mechanikus beavatkozást csak elektromos árammal tudjuk gyakorolni a motorra, mely az alternátoron keresztül kell megtörténjen.

Ezért az alternátor két üzemmódja szükséges: generátoros és motoros üzemmód.

1.2. A lineáris alternátor tervezési követelményei

A lineáris alternátor tervezésénél több szempontot is figyelembe kellett vennem:

- olyan berendezés tervezése és megépítése, mely egyszerű felépítése következtében könnyen és olcsón legyártható, és hosszú távú beavatkozásmentes működést biztosít;
- az alternátort úgy kell megtervezni, hogy az optimális mozgórész amplitúdó akkora legyen, mint a munkadugattyú amplitúdója. Ez azért szükséges, mert a szabaddugattyús Stirling-motorok munkadugattyújáról közvetlenül kerül át a vonal menti mozgás a lineáris alternátor mozgórészére. Így csökkenthető a súrlódási veszteség;
- 50Hz üzemfrekvenciára optimizált alternátor. A szabaddugattyús Stirling-motorok üzemfrekvenciája 40 és 60 Hz között helyezkedik el;
- az alternátor motoros üzemmódban be kell tudjon indítani egy 40 bar héliummal feltöltött 500W-os Stirling-motort.

2.2. A lineáris alternátor felépítése

A villamos gépek működése a mágneses terek kölcsönhatásain alapszik. A gép két részből tevődik össze: mozgórész és állórész.

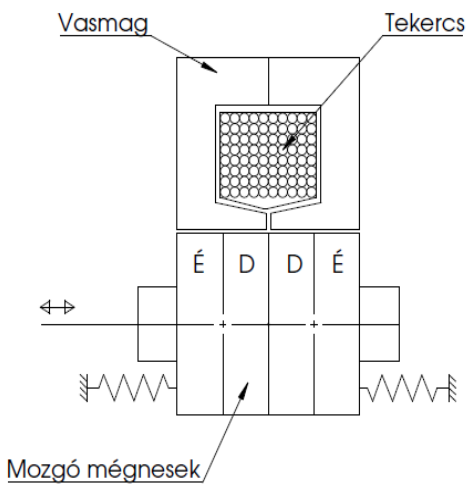
A lineáris alternátor permanens mágnesekből, és tekercsből épül fel. Az egyszerűbb felépítés végett mozgó mágneses alternátort terveztem. A mozgó mágnesek hatására az állórész vasmagjában fluxusváltozás lép fel, mely a tekercsben áramot indukál. Célszerű az állórészt tekercselni, mert így nem szükséges hajlékony kivezetéseket beépíteni a rendszerbe. A hajlékony kivezetések idővel elfáradnának, csökkentve az alternátor élettartamát.

Az alternátor egyszerűsége végett egyetlen tekercset terveztem a rendszerbe, melyet körülölel a lemezelt vasmag.

Az elképzelt alternátor egyszerűsített rajza az **1. ábrán** vizsgálható meg.

A mozgórészt a tengelyre erősített két darab Neodímium-mágnes alkotja, melyek tengely menti mozgást végeznek. A mágnesek gyűrű alakúak.

A mozgórész körül a tengelyirányban lemezelt állórész vasmagja és tekercse helyezkedik el.



1. ábra. *A lineáris alternátor egyszerűsített metszete*

Az alternátor főbb méreteit az alábbi (1) képlet segítségével határoztam meg:

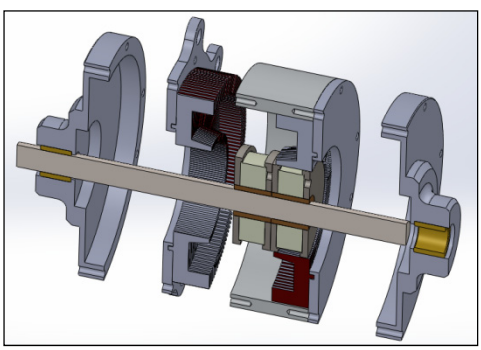
$$P = (4.8 \cdot 10^3) \cdot (\tau \cdot D \cdot f \cdot lm) \cdot B_r^2 \cdot \frac{V}{E} \cdot \left\{1 - \frac{1}{\frac{V}{E}}\right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{lm}{lm+g} \cdot \frac{f_1}{\frac{1-S_0}{2} \cdot C_f} \quad (1)$$

ahol

P	légrésteljesítmény,
D	vasmag belső átmérője,
l	löket legnagyobb amplitúdója,
lm	mágnesvastagság,
g	légrés sugárirányú mérete,
Br	a mágnesindukció,
$\frac{V}{E}$	a megengedett és a gerjesztett feszültség aránya,
E	az indukált feszültség effektív értéke
E_0	légrés nélkül indukált feszültség effektív értéke.

3. A lineáris alternátor megvalósítása

A V1 alternátor megvalósítása 2016. február 9-én kezdődött. A tervek elkészítése két hét alatt történt. Az alternátor tervezésekor két szabadalmaztatott forrást használtam, melyek szabaddugattyús Stirling-generátorok [1] és lineáris alternátor tervezését és megépítését közlik [2], de ezek felépítése jelentősen eltér a tervezett berendezéstől.



2. ábra. *A lineáris alternátor testmodellje*

A tervezést követően elindult az alkatrészek legyártása. A vasmag lemezeit egy AMADA LCG3015AJ lézervágón gyártottam le. A vasmag 1 mm vastagságú acéllemezből készült. Darabszámuk 364. Az állórész tekercseit 1,4 mm átmérőjű lakkozott rézhuzalból készítettem el, melynek menetszáma 92. A tekercset poliészter gyantával itattam át a jó villamos szigetelés és a mechanikai szilárdságnövelés érdekében.

Egy ilyen alternátor megépítésében a legigényesebb szerelés a vasmag lemezeinek a beszerelése a vasmagtartóba. Ezeket a darabokat egyenként be kell helyezni a tartóba, ügyelve arra, hogy a két fedőlaptól galvanikusan el legyenek szigetelve. Az állórész vasmagjait csillag alakban szereltem össze, melyek két oldalról burkolják a tekercset. A kialakított vasmagfeleket (mint a tekercset is) poliészter gyantával töltöttem fel, mely megnövelte a vasmag szilárdságát. A megszilárdulás után a vasmagok belső átmérőjét belső palástköszörüléssel munkáltam meg.

A mágneses légrés mérete köszörüléssel állítható be. A légrés mérete jelentősen befolyásolja az alternátor hatásfokát.

A mozgórész kialakítására olyan mágneseket kellet választanom, melyek a kereskedelemben könnyen beszerezhetők, és sorozatgyártás esetén gond nélkül pótolhatók.

Az első alternátor változat esetében – melyet a XXI FMTÜ alkalmával közöltem [3] – a mozgórész rögzítését planár rugók segítségével valósítottam meg. Végül az 1. számú kísérlet után rájöttem, hogy a mozgórész rögzítését előnyösebb bronzperselyek segítségével kivitelezni. A bronzperselyek segítségével lecsökkent az egytengelységi eltérés, pontosabb lett a légrés. A jó mágneses hatásfok érdekében a mozgórész és az állórész közti légrést minimálisra terveztem. A megépített változatban a légrés 0,5 mm.

Továbbá a mágneses pólusirányító tárcsák méreteit is megváltoztattam a V1 alternátor felépítésében. Erre azért volt szükség, mert a túl mély tárcsák miatt a

gyűrűmágnesek erővonalai inkább a tárcsák között, mint a mozgórész és az állórész vasmagjai között záródtak. A beavatkozás jelentős teljesítménynövekedést eredményezett.

1. táblázat. *Felhasználható mágnestípusok*

Típus	Fluxus-sűrűség Br [mT]	Koercitív erő Hcj [kOe]	Energia kJ/m^3	T ℃
N42	1280	≥11,5	318	80
N45	1320	≥11,6	342	80
N48	1380	≥11,6	366	80
SmCo YX24	960	9,7	175	200

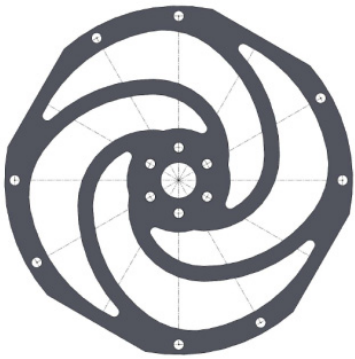
A választás egy 50 mm külső és 20 mm belső átmérőjű és 13,3 mm vastagságú neodímium mágnesgyűrűre esett. A mágnes anyaga N48, amely 80 °C fokon még megtartja az előírt mágneses tulajdonságait. A remanens fluxussűrűség N48 esetén 1400 mT.

A mágnesezési irány tengely menti, ezért szükséges volt a pólusirányítók használata, ami visszafordítja a pólusokat a mágnesek palástfelületére. A mágnesek egy 14 mm átmérőjű krómozott acéltengelyen helyezkednek el azonos pólussal szembefordítva. Két oldalról egy-egy szorítógyűrű tartja össze a két gyűrű mágnest, melyek összeszorított állapotban egymást 820N-al taszítják. A szorítógyűrűkre két planár rugó illeszkedett csavarkötéssel.

A planár rugók feladata volt, hogy a mozgórészt nyugalmi helyzetben tengelyirányban középállásban tartsák.

A planár rugókat 2 mm vastag rugóacélból gyártottam le a lézervágón galaxis spirál alakúra.

A mozgórész kialakításának köszönhetően a lineáris alternátor amplitúdója 20 mm lett. Így felhasználható egy szabaddugattyús Stirling-motor alternátoraként.



3. ábra. *Planár rugó testmodellje*

4. Kísérleti elemzés

A lineáris alternátor jelleggörbéinek a meghatározására egy forgattyús tengellyel ellátott villamos motort használok. A forgattyús tengely úgy készült, hogy az excentricitás mértékét szabadon lehessen változtatni. A változtatás mértéke 0-20 mm-ig végezhető.

A forgattyús tengelyről a mozgást egy karral továbbítottam a lineáris alternátor tengelyére.

A kísérlet során az alternátor két különböző típusú válaszának a meghatározása volt a cél:

- az optimális kimeneti villamos terhelés meghatározása;
- a kimeneti teljesítmény változása a löket-hossz függvényében.

Mivel a kísérlet során a meghajtó motor fordulatszáma 2815 1/min, a ciklusidő 21ms. A frekvencia a hajtómotor fordulatszámából adódott, ami 46,91 Hz. Ez elég jól megközelíti a hálózati 50 Hz frekvenciát.

Az alternátor löketének a növelésével két tényező változik a rendszer működtetésében:

- megváltozik a mágneses erővonalak alakja és indukciója a mágneses légrésben;
- megnő a mozgórész sebessége.

2. táblázat. *Lineáris alternátor válasza különböző lökethosszra.*

Amplitúdó [mm]	I_{ki} [A]	U_{ki} [V]	P_{ki} [W]	R_t [Ω]
9,2	5,57	7,4	41,2	1,32
13	7,7	14	107,8	1,81
14	8,35	17	141,9	2,03
16	8,63	18,1	156,2	2,09
18,6	**8,8**	**19,7**	**173,3**	**2,23**

A kísérlet további szakaszában a kedvező kimeneti $\mathbf{R_t}$ villamos terhelés értékének a meghatározása volt a cél. A terhelés rezisztív jellegű, így a reaktív teljesítmény elenyésző. A kísérleti eredményeket az alábbi táblázatban közlöm:

3. táblázat. *Lineáris alternátor válasza különböző lökethosszra és villamos terhelésre*

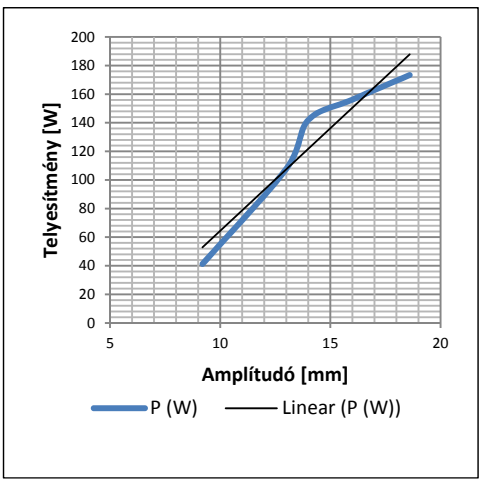
Amplitúdó [mm]	I_{ki} [A]	U_{ki} [V]	R_t [Ω]	P_{ki} [W]
23	8,6	20,7	2,4	178,2
23	**6,67**	**28**	**4,19**	**186,7**
22,1	4	34,5	8,62	138
16	8,6	18	2,09	154,8
16	9,1	11,6	1,27	105,5
16	6	25,7	4,28	154,2
16	5,62	26,9	4,78	151,1
19	**5,9**	**28,4**	**4,74**	**170,1**
19	**6,3**	**26,9**	**4,2**	**170,3**
19	9,66	12,5	1,29	120,7

A táblázatban megjelöltem a kiemelten jó üzemi értékeket. Megfigyelhető, hogy a lineáris alternátor 23 mm-es lökethossznál 4 Ω-os $\mathbf{R_t}$ terhelés esetén adja a legnagyobb $\mathbf{P_{ki}}$ villamos kimenő teljesítményt, ami 186,7W. 2 Ω-os terhelésnél megnő az alternátor tekercsellenállásának a hatása a terhelő áramkörben.

A lineáris alternátor tömege 7 kg, amiből meghatározható a teljesítmény-tömeg arány. A V1.1 alternátor tömeg-teljesítmény aránya 37,4g/W, ami elég jó eredmény egy lineáris villamos gép esetében.

A löketteljesítmény jelleggörbén 9,2-13 mm-es löket közötti szakasz mentén meredeken nő a kimenő villamos teljesítmény. Ezen a szakaszon kezd a váltakozó indukció és a mozgórész sebességnövekedése jelentős hatással bírni a kimenő teljesítményre.

A jelleggörbén megfigyelhető a 13 és 14 mm közötti szakaszon egy teljesítményugrás. Ezen a szakaszon az indukció a legnagyobb. 14 mm-nél nagyobb löket esetén a mozgórész vasmagja annyira kileng, hogy az indukció a jelleggörbének az inflexiós pontján túl helyezkedik el. 15 mm-nél nagyobb lökethossznál a mozgórész sebességnövekedése még pozitív hatással bír a teljesítményre, de ennek növekedése kisebb meredekséget okoz a teljesítmény-jelleggörbén. Tehát kisebb mértékű a teljesítménynövekedés a löket növekedésének függvényében.

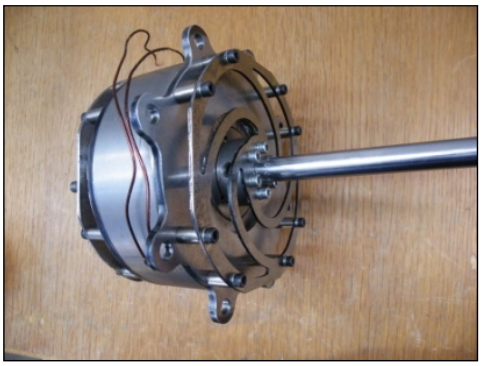


4. ábra. *Az alternátor amplitúdó-teljesítmény jelleggörbéje*

5. Következtetések

A V1.1 alternátor felépítésében teljesen elhanyagolható a planár rugók használata, mert a mozgó- és állórész közötti mágneses kölcsönhatás bizonyos korlátok között úgy viselkedik, mint egy mágneses rugó. Ezáltal lecsökken a gyártási költség.

Az egyszerű felépítés lehetővé teszi a nagyobb teljesítményű alternátorok építését, mert egy közös tengelyre több V1.1 típusú alternátor is elhelyezhető. Így akár többfázisú is lehet a megépített villamos gép, ami szintén növeli a rendszer hatásfokát.



5. ábra. *A megvalósított lineáris alternátor*

Az alternátor hosszú ideig is képes motoros üzemmódban működni, ami lehetővé teszi a Stirling típusú hőszivattyúk működtetését cryo-hűtőberendezésekben.

6. ábra. *Sunpower által gyártott cryosztatikai Stirling hőszivattyú [5]*

6. Fejlesztések a jövőben

A lineáris alternátorral elért jó eredmények következtében folyamatban van egy 500W-os változat építése, melynek motoros teljesítménye 860W. A felépítés abban különbözik, hogy három darab alternátor helyezkedik el egy közös alternátorházban közös tengelyre szerelve.

Ez a változat egy szabaddugattyús Stirling-motor beindítását fogja biztosítani, és a motor által termelt mechanikai energiát villamos energiává fogja alakítani.

Tervben van egy hőszivattyú gyártása, ahol a lineáris alternátor a Stirling-hőerőgép működését biztosítja.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] George R. Dochat: *Design Study of a 15 kW Free-piston Stirling Engine-linear Alternator for Dispersed Solar Electric Power*, DOE/NASA/0056-79/1 NASA CR-1 59587 MTI 79TR47

[2] *Preliminary Design of Linear Alternator Dynamometer for Free Piston Stirling Engines,* U.S. Department of energy, ORNL/Sub/84-05907/1

[3] Máriás Nimród: *Szabaddugattyús Stirling motorral üzemelő lineáris alternátor fejlesztése és megvalósítása*, XXI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2016. Kolozsvár, 261–264

[4] http://sunpowerinc.com/cryocoolers/

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 131–136. 14
http://hdl.handle.net/10598/30077

RÉGI TORONYÓRA ÚJ RENDELTETÉSE

A NEW DESIGNATION OF AN OLD TOWER CLOCK

Márton László[1], Talpas János[2]

[1]*Erdélyi Múzeum-Egyesület, Műszaki Tudományok Szakosztálya, Kolozsvár, 400009 Cluj-Napoca, str. Napoca nr. 2–4, martonlb@yahoo.com*

[2]*Babeş−Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, 400006 Cluj-Napoca, str. Clinicilor nr. 5–7. talpasjanos@gmail.com*

Abstract

The seeking out of new touristic attractions, targets and including these in the classical itineraries constitutes a permanent task for tourism professionals. The discovery of technical relics may be a new note of color of their professional ambition. The renewal, reconditioning and putting in function of the Magyargyerőmonostor tower clock was one of the main goals of the Technical history research group within the Transylvanian Museum Society. The complex activity that was done in this direction leads to valorous research activity in the field of multidisciplinary.

Keywords: *tower clock, history of technics, Magyargyerőmonostor, touristical attraction.*

Összefoglalás

A turisztikai szakemberek állandó feladata új turisztikai vonzáskörök, célpontok felkutatása, ezek bevonása a hagyományos útvonalakba. A technikatörténeti relikviák új színfoltjai lehetnek ennek a törekvésnek. A magyargyerőmonostori toronyóra felújítása, javítása, üzemképessé tétele az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya Technikatörténeti kutatócsoportjának ez irányú törekvéseit is igazolja, ami interdiszciplináris kutatásokban is megnyilvánul.

Kulcsszavak: *toronyóra, technikatörténet, Magyargyerőmonostor, turisztikai vonzerő*

1. Bevezető

A turizmus egy igen összetett gazdasági és szabadidős tevékenység, amelynek szociális, politikai, kulturális ráhatásai vannak napjaink tevékenységére [1, 2]. Fejlesztésének alapfeltétele a kereslet ismerete.

A természeti adottságok észszerű hasznosítása a turizmus egyik alapgondolata. A turizmus egy dinamikusan fejlődő nemzetgazdasági ágazat, amelynek fő feladata pihentető, szórakoztató kikapcsolódást nyújtani jellegzetes szolgáltatásokkal. A turizmusban dolgozó szakemberek feladata, hogy magas szintű szakmai tudásukkal szolgálják a turizmusban részt vevő, pihenni, kikapcsolódni, élményeket szerezni óhajtó személyeket, csoportokat, hogy egyre több, új turisztikai értéket is képviselő lehetőség feltárásával, értékesítésével bővítsék a már létező, hagyományos turisztikai térségeket.

Ehhez a feltáró, interdiszciplináris munkához kell együttműködniük turisztikai szakemberekkel, néprajzos, régész, történész, művészettörténész és nem utolsósorban műszaki képzettségű személyeknek.

A Kolozs megyei Kalotaszeg, az Alszeg, Felszeg, Nádas-mente három tájegységével, hagyományos, sűrűn látogatott turisztikai régió. Jellegzetes építészete, népviselete, tánckultúrája egyedi színfoltja Erdély kultúrtörténetének. Kevésbé ismert e tájegység technikatörténeti múltja, amely csupán a közelmúltban vált a kutatások témájává. Az Erdélyi Múzeum-Egyesület Műszaki Tudományok Szakosztálya évente megrendezett ez irányú, terepen végzett kutatásai számos, addig ismeretlen értéket azonosított, mért fel és tett ismertté technikatörténeti kiadványokban. Ezen kutatások következtében ismerhette meg az érdeklődő jó néhány kalotaszegi település templomának építészettörténetét, harangjait, toronyóráit: olyan értékek váltak közérdeklődés tárgyává, amelyek elhagyatva lassú, de biztos pusztulásra vannak ítélve. Ilyenek pl. a mechanikus toronyórák, egykor a település igényességét, gazdasági lehetőségeit is igazoló, műszaki csúcsteljesítményei annak az időszaknak, amelyben fénykorukat élték.

2. A toronyóra mint turisztikai látványosság

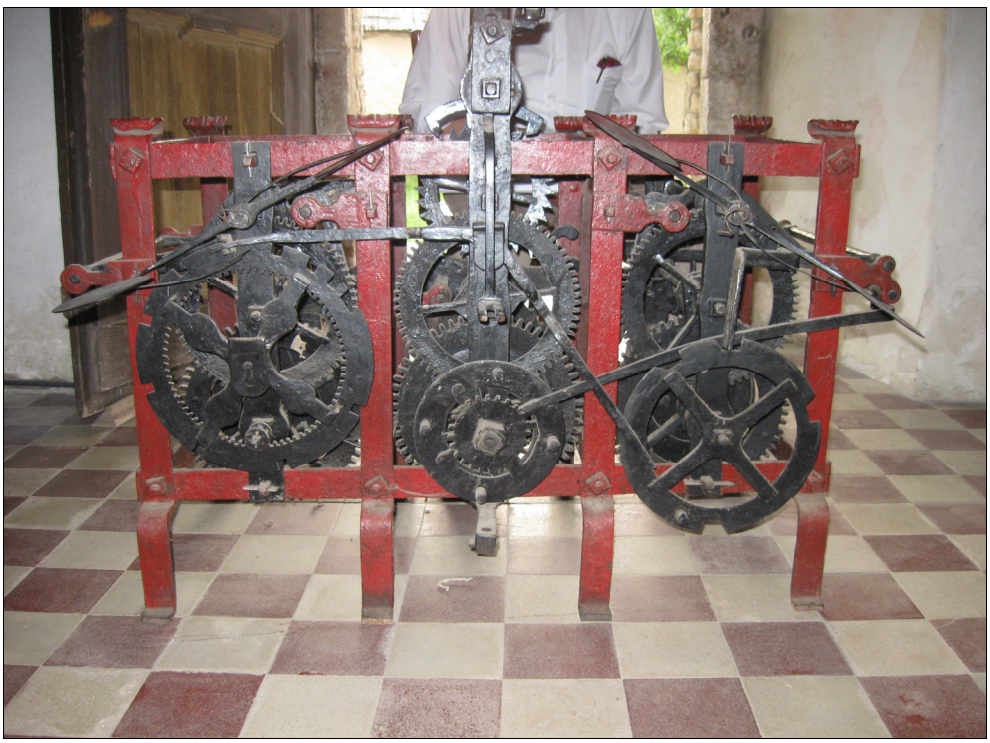
Egy keresztény templomnak számos szakrális és nem szakrális kelléke van. A templomi harang pl. a templomi liturgiában felhasznált szakrális kellék, míg a toronyóra nem részesül ebben a minősítésben.

Ez lehet egyik oka annak, hogy működésének fenntartására nem fordítottak kellő figyelmet. Így a több száz éves toronyórák minden újabb nap elteltével a hosszú, de biztos végük felé tartanak. Az **1. ábra** egy toronyóra elhanyagolt állapotát mutatja be. A mechanikus toronyóra az első automata gép, amely kora műszaki csodájának számított. Még ma is, számítógépes világunkban, rácsodálkozunk egy-egy működőképes toronyórára.

1. ábra. *Elfelejtett, halálra ítélt toronyóra (Gyergyótekerőpatak, 2016)*

A magyargyerőmonostori református templom, amely XV. században épült, egyike a késő gótika erdélyi képviselőinek, igazi gyöngyszeme a kalotaszegi templomépítészetnek [3,4]. Építészeti egyediségén kívül, a déli falán látható domborműegyüttes és napóra megkülönböztető látványa jelentős élménnyel gazdagítja a nagyszámú látogatót, emiatt igazi turisztikai érdekességként vonult be a köztudatba.

Toronyórája (**2. ábra**), amely 1834-ben készült, egy nagyváradi toronyóra-készítő lakatos remekműve, 170 éves működése után kegyvesztetté vált. Így állt működésképtelenül évtizedeken át, amíg 2008-ban az Erdélyi Múzeum-Egyesület Műszaki Tudományok Szakosztályának technikatörténeti kutatócsoportja felmérte, azonosította és az egyház presbitériumának ajánlatot tett a toronyóra megjavítására, működőképessé tételére. A javaslatot a presbitérium elfogadta, és döntés született a toronyóra új elhelyezéséről a torony alatti nyugati templomkapu bejáratot követő előcsarnokba. A javítási munkálatokat a gyergyószentmiklósi Mecatex Kft. szakembereire bízta. A toronyóra állványra helyezve, működőképes állapotban, az előre kialakított térben egy újabb turisztikai látványossága lett a templomnak, a településnek, egyedülállóként a maga nemében.



2. ábra. *A leszerelt toronyóra*

3. A felújítási-javítási munkálatok folyamata

A javítási munkálatokat tüzetes vizsgálat előzte meg, amely a hiányzó és kicserélésre szoruló alkatrészek meghatározását eredményezte. Kopott síkcsapágyak, tengelyvégek, fogaskerekek fogainak hegesztése, majd névleges méretre hozása jelentette az alkatrészek javítását [5].

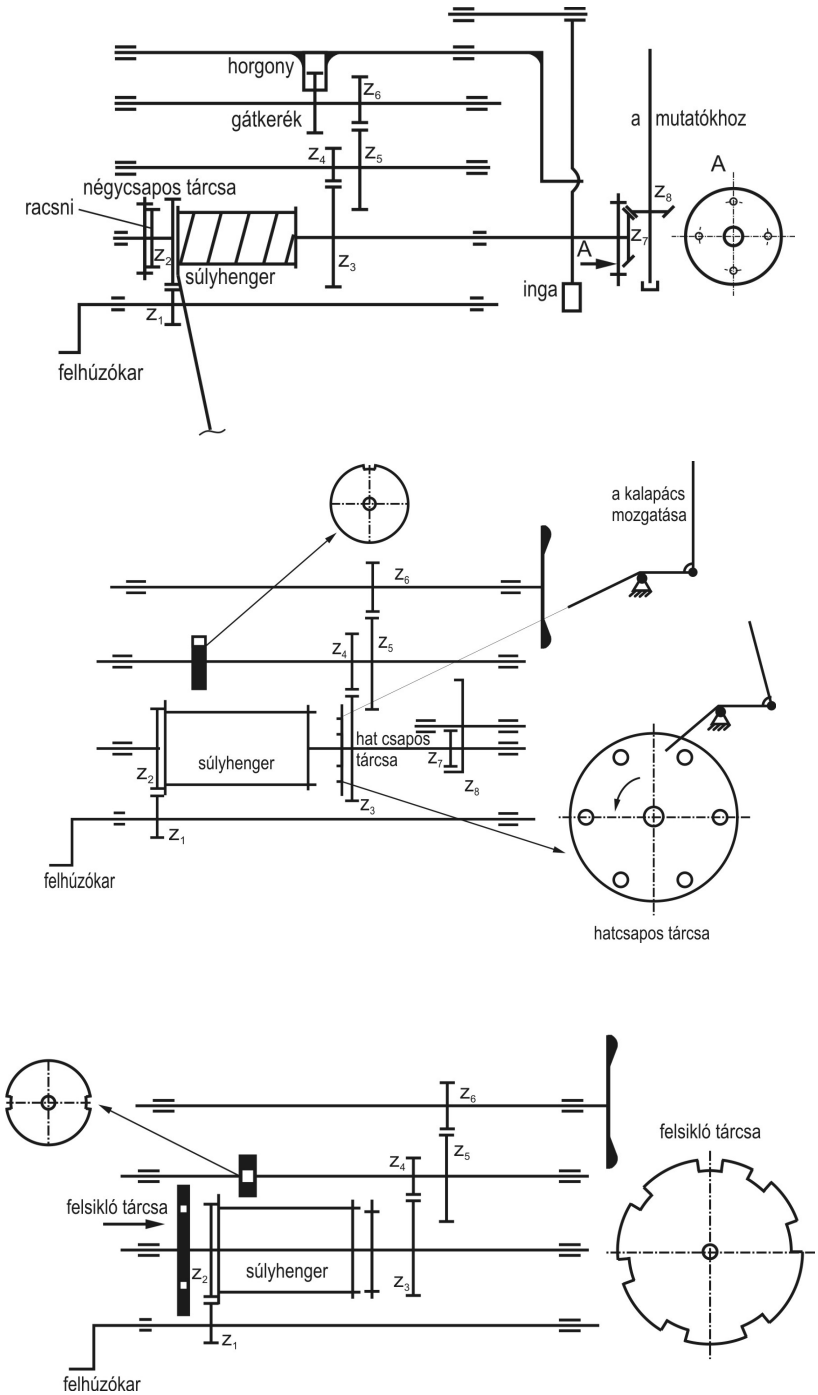
Hiányzott az inga, ennek tartószerkezet-csapágyazása, a kardáncsuklók az óra mutatóinak meghajtásához, a számlap, a mutatók, az ütőmodul kalapácsai és harangjai, valamint a szerkezet három modulját működtető órasúlyok és kötelek.

Ezeket pótolva, a szerkezetet egy zárt szekrényből összeállított állványra helyezték. Az óra vázra való tételét a **3. ábra** mutatja be.

A felújított, üzemképes toronyóra működése [6] a **4. ábrá**n látható kinematikai rajzokon követhető.

Az állvány az inga szárainak hosszától függően, ennek lengési idejét figyelembe véve készült el (**5. ábra**). A számlap és a mutatók az eredeti számlap és mutatók kicsinyített másaiként készültek.

3. ábra. *Az új állványra helyezés művelete*



4. ábra. *Az új turisztikai látványosság működését bemutató kinematikai rajz [3]*

5. ábra. *A felújított, új életű toronyóra*

4. Következtetések

A magyargyerőmonostori toronyóra felújítása iskolapéldaként kezelhető bármely másik toronyóra felújításánál. A több száz 2-300 éves mechanikus toronyóra felkutatása, felmérése, történetének kutatása, az eredmények közzé helyezése minden közösségnek mulaszthatatlan feladata. Minden felújított toronyóra új turisztikai célpont is lehet, ezáltal gazdagítva a hagyományos turisztikai látványosságok sorát.

Szakirodalmi hivatkozások

1. Hutiray Judit: *Turisztikai alapismeretek*. Képzőművészeti Kiadó, Budapest, 2000, 3. utánnyomás 2009.
2. Michalkó Gábor: *Turizmológia. Elméleti alapok*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2012.
3. Bitay Enikő, Márton László, Talpas János: *Technikatörténeti örökség Magyargyerőmonostoron*. EME, Kolozsvár, 2010.
4. Márton László: T*oronyórák, napórák Erdélyben*. Pallas-Akadémia Könyvkiadó, Csíkszereda, 2005.
5. Magyar László: *Óraipari zsebkönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 137–146. 15
http://hdl.handle.net/10598/30078

A HENGERES FOGASKERÉK-LEFEJTŐ CSIGAMARÓ MŰKÖDŐ ÉLGEOMETRIÁJÁNAK VIZSGÁLATA

THE ACTIVE GEOEMTRY OF THE HOBBING CUTTERS USED FOR CYLINDRICAL GEAR MANUFACTURING

Máté Márton[1], Hollanda Dénes[2]

[1]*Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 540485 Marosvásárhely, O.p.9, C.P 4, Telefon / Fax: +40-265-206210 / +40-265-206211, mmate@ms.sapientia.ro*

[2]*Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 540485 Marosvásárhely, O.p.9, C.P 4, Telefon / Fax: +40-265-206210 / +40-265-206211, hollanda@ms.sapientia.ro*

Abstract
During the cutting the gear hob executes a complex relative motion related to the machined gear. Thus the study of the cutting geometry cannot be done using the classic methods of the synthetic geometry. This paper shows the computing model of the functional cutting geometry without approximations. The model admits that the cutting edge results as the intersection of a perfect involute worm and a helical rake face whose generatrix is perpendicular and intersects the axis of the worm. The relief face is meshed by the cutting edge while it moves along a conical helix leading curve respecting the motion law of the relieving operation. Using the analytical expressions of the cutting edge and its delimiting surfaces the normal vectors and the relative velocity vector will be computed in the considered edgepoint. Using these, the functional rake and relief angle values are computed. It is also proved that the repartitions of the rake and relief angles depend on the position of the edgepoint related to the machined gear and the geometrical peculiarities of this.

Keywords: *gear-hob, rake angle, relief angle, functional cutting geometry*

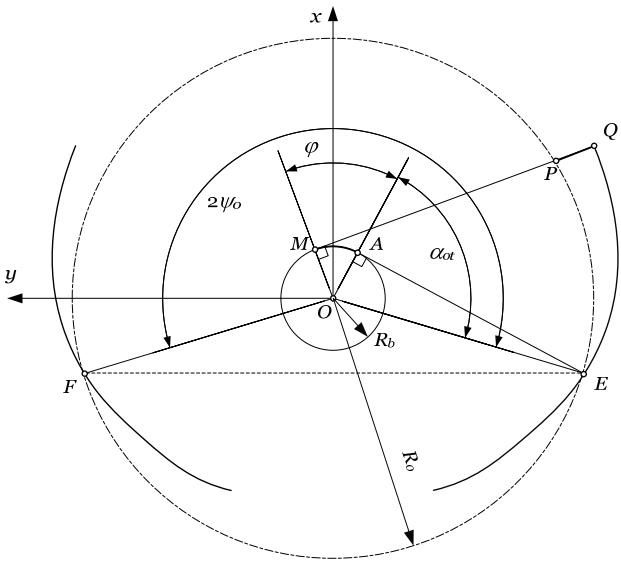
Összefoglalás
A csigamaró a megmunkált fogaskerékhez képest összetett, bonyolult relatív mozgást ír le. A működő élgeometria tanulmányozása emiatt klasszikus geometriai módszerekkel nem lehetséges. Jelen dolgozat a közelítés nélküli működő élgeometria számítási modelljét ismerteti részleteiben. A számítás az elméletileg tökéletes evolvens csigából származtatott csigamaró élére és fogfelületeire alapoz. Kiinduló feltételként elfogadjuk, hogy a homlokfelület a csiga tengelyét metsző, erre merőleges egyenes által leírt csavarvonal-felület. A hátfelületet a tökéletes él-alkotógörbe generálja azáltal, hogy a csavarvonal szerinti hátraesztergálás kúpos csavarvonal-vezérgörbéjén, a hátramunkálás kinematikai törvényei szerint elmozdul. A homlok- és a hátfelületek, valamint az él analitikus alakját felhasználva felírjuk a tetszőleges élpontban definiált érintő-, felületi normális- és relatív sebességvektorokat, majd ezek segítségével kiszámítjuk a működő homlok- és hátszögértékeket. Kimutatjuk, hogy a működő élszögek eloszlása az élpontnak a megmunkált fogaskerékhez viszonyított helyzetétől, valamint ennek geometriai jellemzőitől függ.

Kulcsszavak: *csigamaró, homlokszög, hátszög, működő élgeometria*

1. A csigamaró fogának analitikus modellje

A csigamarót elméletileg úgy hozzuk létre, hogy az elméletileg pontos (virtuális burkoló) evolvens csiga felületeit elmetszszük z_m számú, egyenletes kiosztású homlok-csavarfelülettel, majd pedig az ily módon kapott élgörbéket a hátramunkálásnak megfelelő kúpos csavarvonalakon mozdítjuk el [1, 3, 4]. A geometriai modell előállításában, ennek megfelelően, a következő lépéseket hajtjuk végre:

- az evolvensgörbe egyenleteinek felírása a homlokszelvényben;
- az evolvens csavarfelületek felírása;
- a homlokfelület implicit egyenletének felírása;
- az élgörbék egyenleteinek előállítása;
- az élgörbék elmozdítása a csavarirányú hátramunkálás mozgástörvénye szerint.



1. ábra. *A csiga fogának generáló evolvens ívei*

Az evolvensgörbe egyenleteit nem a hagyományos módon [1, 6, 7] írjuk fel, mivel az alapkör sugara sokkal kisebb, mint a működési határkörök (fejkör, lábkör) sugarai, így a paraméter értéke nehezen értelmezhető; ehelyett az osztókörre irányítjuk a paraméter nulla értékét. Az E ponton áthaladó, a jobb oldali fogfelületet generáló evolvens egyenletei az **1. ábra** alapján a következők [4]:

$$\begin{cases} x(\varphi) = R_b\left(\cos E_1(\varphi) + \left(\operatorname{tg}\alpha_{0t} + \varphi\right)\sin E_1(\varphi)\right) \\ y(\varphi) = R_b\left(\sin E_1(\varphi) - \left(\operatorname{tg}\alpha_{0t} + \varphi\right)\cos E_1(\varphi)\right) \end{cases} \tag{1}$$

Az E, illetve az F osztóköri pontok a $2\psi_0$ központi szögértékkel jellemzett osztóköri íven mért fogvastagságot határozzák meg. Figyelembe véve, hogy a csigamarót származtató evolvens csiga $\frac{\pi}{2} - \lambda_0$ fogferdeségű fogaskerék, az osztóköri ívhosszt az ismert

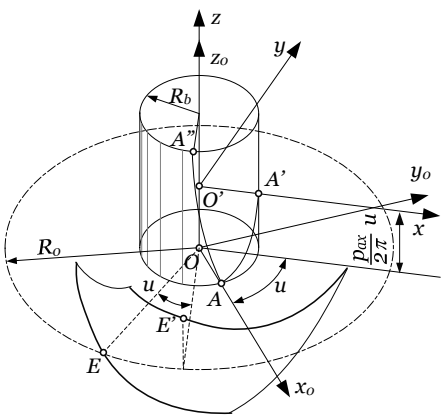
$$s_{0t} = \tfrac{\pi}{2} m_t + 2 m_t \xi_t \operatorname{tg} \alpha_{0t} \qquad (2)$$

képlettel számítjuk ki. Nulla profileltolás esetében $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$. Az (1) egyenletekben szereplő szögargumetum értéke az **1. ábra** alapján

$$E_1(\varphi) = -\psi_0 + \alpha_{0t} + \varphi \qquad (3)$$

Az F ponton áthaladó, a bal oldali fogfelületet generáló evolvens egyenleteit, az Oy tengelyre való szimmetria alapján, az (1) képletből generáljuk, úgy, hogy az y koordináta-függvényt –1-gyel szorozzuk.

Az evolvens csiga fogfelületeit az E és F pontokon áthaladó evolvenseknek a megfelelő alaphengeri csavarvonalakon való elcsavarásával képezzük (**2. ábra**).



2. ábra. *A csiga felületeinek és a homlokfelület generálása*

A csavarmozgás transzformációs mátrixa

$$M_0 = \begin{pmatrix} \cos u & -\sin u & 0 & 0 \\ \sin u & \cos u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{p_{ax}}{2\pi} u \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (4)$$

ezzel pedig a felületegyenletek mátrixos alakja a következő lesz:

$$\underline{\mathbf{r}}_0(u,\varphi) = \mathbf{M}_0 \, \underline{\mathbf{r}}(\varphi) \qquad (5)$$

A jobb és bal fogfelületek egyenleteit általánosított formában írjuk fel. Ehhez az $\underline{\mathbf{r}}(\varphi)$ oszlopban az y koordinátafüggvényt a j kapcsolóparaméterrel szorozzuk, ahol $j = -1$-re a bal oldal, míg +1-re a jobb oldal egyenleteit kapjuk. Bevezetjük az alábbi változócseréket:

$$E_1(\varphi) = \varphi_1 - \zeta = (\varphi + \operatorname{tg} \alpha_{0t}) - (\psi_0 + \operatorname{inv} \alpha_{0t})$$
$$v_1 = \varphi_1 + ju \qquad (5)$$

Az (1), (3), (5) képletekkel végzett elemi számítások eredményeképpen a következő, általános fogoldalegyenleteket kapjuk:

$$\begin{cases} x_0(\varphi_1, v_1) = R_b(\cos(v_1 - \zeta) + \varphi_1 \sin(v_1 - \zeta)) \\ y_0(\varphi_1, v_1) = jR_b(\sin(v_1 - \zeta) - \varphi_1 \cos(v_1 - \zeta)) \\ z_0(\varphi_1, v_1) = jR_b tg\, \lambda_b (v_1 - \varphi_1) \end{cases} \qquad (6)$$

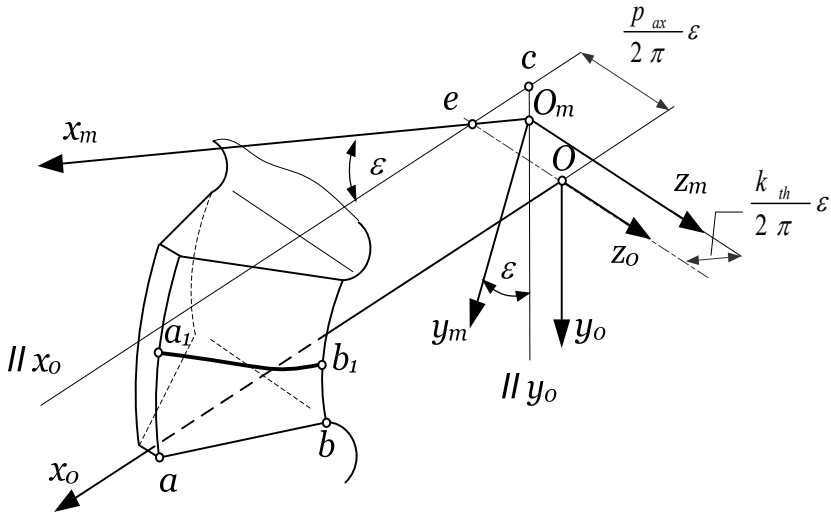
A homlokfelület egyenleteit hasonló módon írjuk fel, figyelve arra, hogy ez bal sodrású, és osztóhengeri csavarvonala merőleges a fogoldalak osztóköri csavarvonalaira. A parametrikus formából a következő implicit egyenletet állítjuk elő:

$$\frac{p_C}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y_0}{x_0} + z_0 = 0 \,, \; p_C = \frac{p_{ax}}{\operatorname{tg}^2 \lambda_0} \qquad (7)$$

Az oldalélek általános parametrikus egyenleteit a (6) és (7) egyenletekből kapjuk.

$$\begin{cases} x_0(\varphi_1) = R_b(\cos B(\varphi_1) + \varphi_1 \sin B(\varphi_1)) \\ y_0(\varphi_1) = jR_b(\sin B(\varphi_1) - \varphi_1 \cos B(\varphi_1)) \\ z_0(\varphi_1) = j \dfrac{p_C p_{ax}}{2\pi(p_C + p_{ax})} (\zeta + \operatorname{arctg} \varphi_1 - \varphi_1) \\ B(\varphi_1) = \dfrac{p_{ax}(\varphi_1 - \zeta) + p_C \operatorname{arctg} \varphi_1}{(p_C + p_{ax})} \end{cases} \qquad (8)$$

A hátfelületek egyenleteit a **3. ábra** alapján levezetett koordináta-transzformáció segítségével írjuk fel. A hátfelületet ebben az esetben a (8) parametrikus egyenletekkel előállított élek kúpos csavarvonalon való elmozdításával kapjuk. Meg kell jegyezni, hogy a köszörüléssel előállított hátfelületek az elméletitől elhanyagolható módon eltérnek, ez azonban nem befolyásolja a geometria számításának pontosságát.



3. ábra. *A csigamaró oldal-hátfelületeinek generálása csavarvonal szerinti hátramunkálással*

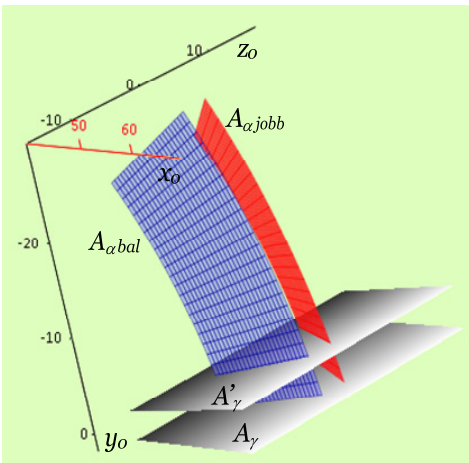
Az éleket szállító $(x_m y_m z_m)$ koordinátarendszernek a szerszám $(x_0 y_0 z_0)$ rendszeréhez viszonyított elmozdulását az alábbi transzformációs mátrixszal írjuk le, ahol *a*-val az Arkhimédész-féle spirális paraméterét jelöltük:

$$\mathbf{M}_{0m} = \begin{pmatrix} \cos\varepsilon & \sin\varepsilon & 0 & -a\varepsilon\cos\varepsilon \\ -\sin\varepsilon & \cos\varepsilon & 0 & a\varepsilon\sin\varepsilon \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{p_{ax}}{2\pi}\varepsilon \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (9)$$

Az élegyenleteket a

$$\underline{\mathbf{r}_0} = \mathbf{M}_{0m}\,\underline{\mathbf{r}_m} \qquad (10)$$

mátrixegyenletből kapjuk, ahol az $\underline{\mathbf{r}_m}$ homogén koordinátaoszlop elemei a (8) függvények. A $\lambda_0 = 2°30'$ dőlésszögű egyetlen bekezdésű csigamaróra elvégzett számítások alapján előállított fogfelületeket a **4. ábrán** szemléltettük.



4. ábra. *A csigamaró fogának felületei*

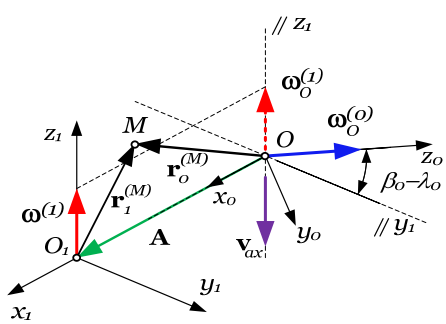
2. A működő élgeometria matematikai modellje

A működő élgeometriát az általános vektoriális számítási modell [4] csigamaróra való sajátosításából kapjuk. A működő homlok- és hátszögek számításához meg kell határoznunk a vizsgált élpontban a valós forgácsolósebesség, az él-érintő, a homlokfelület-normális és hátfelület-normális vektorokat.

2.1. A forgácsolósebesség-vektor számítása

A forgácsolósebességet a vizsgált élpontnak a munkadarab ezzel pillanatnyilag egybeeső pontjához viszonyított relatív sebességeként definiáljuk, és a szerszámhoz kötött koordináta-rendszerben írjuk fel.

A számításhoz a **4. ábrán** feltüntetett vektorokat használjuk fel. Megfigyelhető, hogy a munkadarab és a szerszám koordinátarendszerei alaphelyzetben vannak, azaz az x tengelyek egymás meghosszabbításában. Ez a sajátosítás nagymértékben megkönnyíti a számítást. Az általánosságot azzal állítjuk vissza, hogy az élpont helyzetét változtatjuk a szerszámhoz kötött koordináta-rendszerben úgy, hogy a munkadarab-szerszám áthatást jellemző ponthalmazon belül a vizsgált élponthoz az (r_y, θ_y, q) hengerkoordinátákat csatoljuk.



5. ábra. *A forgácsolósebesség mint relatív sebességvektor számítása*

A forgácsolósebesség-vektor, a [2,5]-ben is ismertetett módszer alapján a következő vektoregyenlettel fejezhető ki:

$$\mathbf{v}_0^{(1,0)} = \left(\boldsymbol{\omega}_O^{(0)} - \boldsymbol{\omega}_O^{(1)}\right) \times \mathbf{r}_0 - \mathbf{A} \times \boldsymbol{\omega}_O^{(1)} + \mathbf{v}_{ax} \qquad (11)$$

Az előtolásisebesség-vektor a z_1 tengely irányával megegyező irányú; értékét az s_{ax} tengelyirányú előtolás-paraméter értékéből számítjuk, a $j_{10} = \frac{\omega^{(1)}}{\omega^{(0)}}$ áttételi arány figyelembevételével, amelyet ferde fogazat esetén a fogferdeségi szögnek megfelelően korrigálni kell [4,7]:

$$v_{ax} = \frac{s_{ax}}{2\pi} j_{10} \omega^{(0)} \qquad (12)$$

A **4. ábra** figyelembevételével és a számítások elvégzése után a relatív forgácsolósebesség-vektor iránya a következő lesz:

$$\underline{\mathbf{v}}_0^{(1,0)} = \begin{pmatrix} -j_{10}\left(y_0 \sin\Sigma + z_0 \cos\Sigma\right) \\ j_{10}\left(x_0 + A\right)\sin\Sigma + v_{ax}\cos\Sigma - z_0 \\ j_{10}\left(x_0 + A\right)\cos\Sigma - v_{ax}\sin\Sigma + y_0 \end{pmatrix},$$
$$\Sigma = \beta_0 - \lambda_0 \qquad (13)$$

A számítások egyszerűsítése céljából a csigamaró szögsebességét 1 s^{-1} értékűre vettük. A (13) képletekben szereplő élpontkoordinátákat a hengerkoordináták bevezetésével fejezzük ki. A hengerkoordinátákra azért van szükség, mert könnyebben meg lehet segítségükkel határozni a munkadarab-csigamaró áthatási felületét, mert csak azon belül van értelme a geometria vizsgálatának.

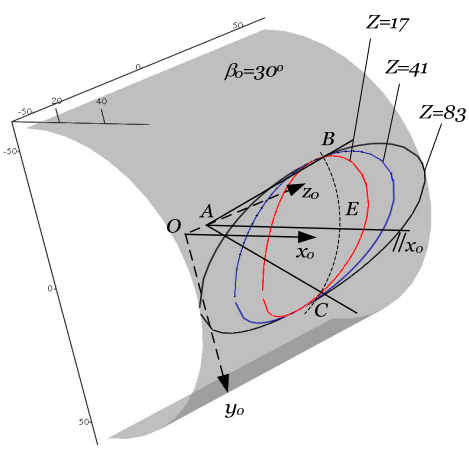
2.2. Az áthatás vizsgálata

Áthatásként definiáljuk azt a csigamaróhoz kötött ponthalmazt, amelyben az élpont valós forgácsvételre képes. Mértani szempontból az áthatás egy olyan, a csigamaró tengelyéhez kötött egyenes körhenger-felületdarab, amelynek sugara a vizsgált

élpontnak a csigamaró tengelyétől mért távolságával egyenlő, határvonala pedig a munkadarab fejhengerével való áthatásgörbe. Az áthatásnak a következőkben felhasznált matematikai értelmezése a hengerkoordináták közötti kapcsolat, amely adott r_y sugárra, a $\theta = \theta(q)$ alakban írható fel. Az áthatás határgörbéjét, adott r_y-ra, az összes lehetséges q értékre számított $\theta^{(\min)}$, $\theta^{(\max)}$ értékek segítségével írjuk le numerikusan. A számítás elvégzése érdekében a fogaskerék fejhengerének egyenletét átírjuk a szerszám koordináta-rendszerébe, majd a kapott egyenletbe behelyettesítjük az (r_y, θ, q) hengerkoordinátákat. Eredményként a következő, θ, q ismeretlenekben és r_y paraméterben definiált egyenletet kapjuk:

$$\left(A - r_y \cos\theta\right)^2 + \left(q - r_y \sin\Sigma \sin\theta\right)^2 - r_{a1}^2 = 0 \qquad (14)$$

Az áthatás fogdőlésszög-, fogszám- és élpontsugár-függő. Grafikus képét, $\beta_0 = \frac{\pi}{6}$-ra, a **6. ábrá**n szemléltetjük.



6. ábra. *Az áthatás alakjának és határainak változása a megmunkált fogaskerék fogszámának függvényében*

Az élpont hengerkoordinátájának adott $q = OA$ értékére a θ legnagyobb értéke a *(CAE)*, legkisebb értéke pedig a *(BAE)* szög értékével egyenlő. Értelemszerűen utóbbi az x tengelyhez viszonyított helyzete miatt negatív. A q paraméter szélső értékeinek a határgörbe zártságából adódó számítási feltétele a θ szélsőértékek közötti elhanyagolhatóan kis különbség.

2.3. A homlok- és hátfelület-normális, illetve az él-érintővektorok számítása

Az él $\boldsymbol{\tau}$ érintővektorának koordinátáit a (8) egyenletek deriválásával álltjuk elő.

A homlokfelület normálvektorát a $\boldsymbol{\tau}$ érintővektor és a homlokfelületnek a vizsgált élponton áthaladó egyenesére illesztett vektor vektoriális szorzataként állítjuk elő. Az említett egyenes merőleges a forgástengelyre, tehát a ráillesztett vektor koordinátái értelemszerűen $\underline{\mathbf{u}}_0^T = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & 0 \end{pmatrix}$. Ennek alapján felírható, hogy

$$\underline{\mathbf{n}}_\gamma = \begin{pmatrix} 0 & -\tau_z & \tau_y \\ \tau_z & 0 & -\tau_x \\ -\tau_y & \tau_x & 0 \end{pmatrix} \underline{\mathbf{u}}_0^T \qquad (15)$$

A hátfelület $\mathbf{n}_\alpha$ normálvektorát szintén az él érintővektora és a hátfelületnek a vizsgált élponton áthaladó kúpos csavarvonal- $\mathbf{w}$ érintővektora vektoriális szorzataként állítjuk elő. A számításokat terjedelmük miatt, mellőzzük, ezek részletesen a [4]-ben találhatók.

A geometria számításához szükséges vektorokat az $x_0 y_0 z_0$ koordinátarendszerhez kötött, (8) egyenletekkel leírt él pontjához kötöttek. Ahhoz, hogy megvizsgáljuk, milyen lesz a geometria a vizsgált élpontban, ha ez a (θ, q) paraméterpár által kijelölt helyzetbe kerül, koordinátatranszformációt kell alkalmaznunk. Ennek kiszámításához a φ_1 paraméter adott értékének megfelelő M élpont $\left(x_0^{(M)}, y_0^{(M)}, z_0^{(M)}\right)$

kiszámított koordinátákhoz hozzárendeljük az $\left(r^{(M)}\theta^{(M)}, q^{(M)}\right)$ hengerkoordinátákat. A (θ, q) paraméterpár a vizsgált pontot olyan helyzetbe rendeli, az áthatáson belül, amelybe a csigamaró z tengelye mentén való elcsúsztatással és körülötte történő elforgatással hozható. Értelemszerűen a transzformáció mátrixa a következő:

$$\mathbf{M}(\theta, q) = \begin{pmatrix} \cos\Delta\theta & -\sin\Delta\theta & 0 & 0 \\ \sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q - q^{(M)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

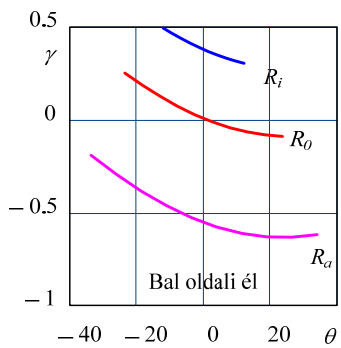
$$\Delta\theta = \theta - \theta^{(M)} \tag{16}$$

A geometria felírásához a $\mathbf{v}_0^{(1,0)}, \boldsymbol{\tau}, \mathbf{n}_\gamma, \mathbf{n}_\alpha$ vektorok koordinátáit a (16) transzformációnk megfelelően átírjuk. Ezek után alkalmazni lehet a [4]-ben részletezett geometria-számítási módszert. A vektoriális modell használatával kiszámítjuk a működő homlok- és hátszöget. A továbbiakban az egybekezdésű, $\lambda_0 = 2°30'$ csavarvonal-dőlésszögű csigamaró működő élgeometriáját vizsgáltuk $Z \in [17,101]$ fogtartományban és $\beta_0 \in [0°, 45°]$ fogferdeségi szögtartományban. A q paraméter értékei meghatározzák a vizsgált él helyzetét a legördülés szempontjából. Ha a csigamaró jobbos, és jobbra dőlt fogazatot munkál meg, akkor a fogaskerék forgásiránya szerint a q negatív értékeinek a kigördülési zóna, míg a pozitív értékeinek a begördülési zóna felel. meg. A legnagyobb áthatás zónája a q paraméter nulla közeli értékére keletkezik. A vizsgálat során megállapítottuk, hogy sem a működő homlokszög, sem a működő hátszög nem változik lényegesen az él lokációja szempontjából; természetesen a legnagyobb áthatás a központi zónában található. Ezért a továbbiakban a geometria változását itt fogjuk szemléltetni. A szögváltozás grafikonjainak abszcisszáin a csigamaró forgásából következő szöghelyzet-paraméter, az ordinátákon pedig a vizsgált szög van feltüntetve, fokokban.

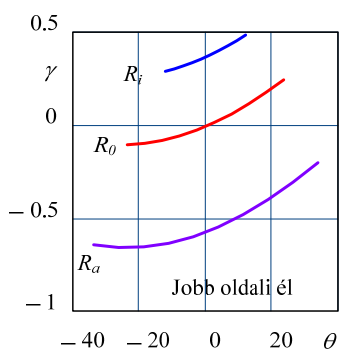
3. A működő homlokszög változása

3.1. Az élpont helyzetének befolyása

A működő homlokszög változása az élpont helyzete szerint a **7.** és **8. ábrá**kon látható. Az R_a, R_0, R_i értékek rendre a csigamaró fej-, osztó-, illetve belső hengeri élpontját jelölik ki. A változásokat a $Z = 59$ fogszámra és a $\beta_0 = 22°30'$ fogferdeségi szögre tanulmányoztuk.



7. ábra. *A működő homlokszög változása a bal oldali élen*

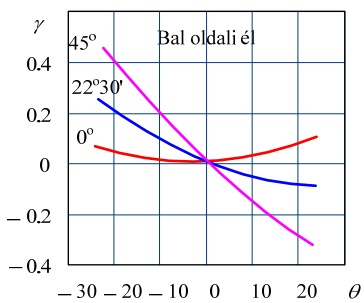


8. ábra. *A működő homlokszög változása a jobb oldali élen*

A **7.** és **8. ábra** együttes vizsgálatából megállapítható, hogy a működő homlokszög folyamatosan változik a csigamaró fogának θ helyzetparamétere szerint. A változás mértéke gyakorlatilag elfogadható. Továbbá észrevehető, hogy a bal oldali élen a tendencia csökkenő, míg a jobb oldali élen növekvő. Az élpont helyzete szerint kijelenthető, hogy minél távolabb található a csigamaró tengelyétől, annál kisebb értékek között változik. A változás intervalluma azért nagyobb, mert a nagy szerszámátmérőn nagyobb terjedelmű áthatás jön létre.

3.2. A fogferdeségi szög befolyása

A fogferdeségi szög befolyását a működő homlokszögre $\beta_0 = 0°; 22°30'; 45°$ értékekre vizsgáltuk, $Z = 59$ fogszámra és az él R_0 sugarú osztóhengeri pontjára. A változások a **9.** és **10. ábrá**kon figyelhetők meg.



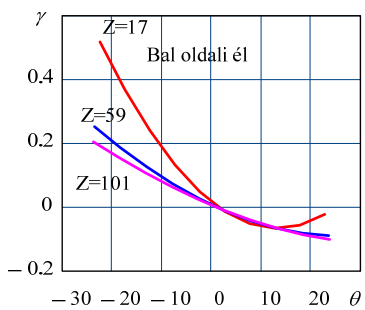
9. ábra. *A működési homlokszög változása a fogferdeségi szög függvényében a bal oldali élen*

Az ábrák vizsgálata alapján megállapíthatjuk, hogy a homlokszögváltozás előbb kimutatott tendenciája megmarad. Az egyenes fogú fogaskerekek lefejtésekor a változás elhanyagolható, különben annál nagyobb, minél nagyobb a fogferdeség.

10. ábra. *A homlokszög változása a fogferdeségi szög függvényében a jobb oldali élen*

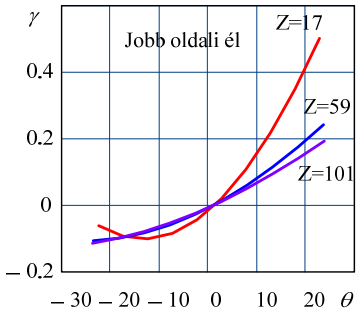
3.3. A fogszám befolyása

A fogszám befolyását a homlokszögre a $Z = 17; 59; 101$ fogszámokra vizsgáltuk az osztóhengeri élpontra és $\beta_0 = 22°30'$ fogferdeségi szögre. A változások a **11.** és **12. ábrá**kon láthatók.



11. ábra. *A homlokszög változása a fogszám függvényében, a bal oldali élen*

Az ábrák alapján kijelenthető, hogy a fogszám befolyása akkor lényeges, amikor az áthatási zóna alakját érdemben befolyásolja. Észrevehető, hogy 59 fog felett a fogszám befolyása a homlokszögváltozásra gyakorlatilag nulla.



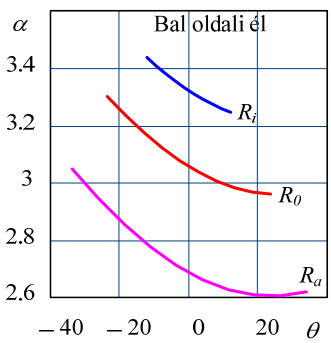
12. ábra. *A homlokszög változása a fogszám függvényében a jobb oldali élen*

4. A működő hátszög változása

A működő hátszög változását ugyanazon körülmények között vizsgáltuk, mint az előbbiekben bemutatott homlokszög-változást.

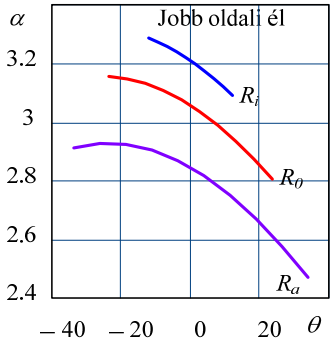
4.1. Az élpont helyzetének befolyása

Az élpont helyzetének befolyását a **13.** és **14. ábrá**kon tüntettük fel.



13. ábra. *A hátszög változása a bal oldali élen*

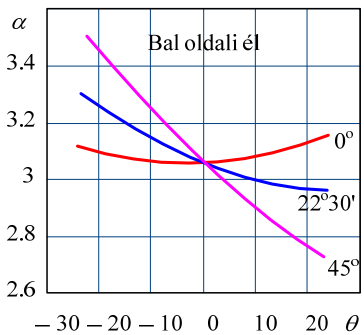
Az ábrák vizsgálatából megállapítható, hogy a működő oldalhomlokszögek változása a konstruktív értékektől [1, 4] alig egyetlen foknyi intervallumban tér el. A változás mindkét fogoldalon ugyanolyan irányú, vagyis a szerszám forgási szögének növekedésével csökken. A csökkenés annál



14. ábra. *A hátszög változása a jobb oldali élen*

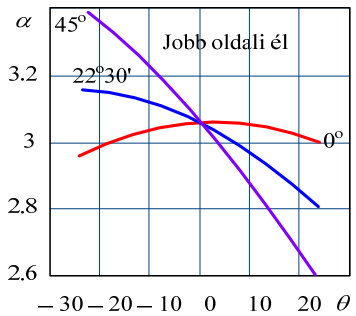
nagyobb mértékű, minél nagyobb az élpont sugara. Pusztán matematikai érdekességként említjük meg, hogy a bal oldali élen domború, a jobb oldalin pedig homorú.

4.2. A fogferdeségi szög befolyása

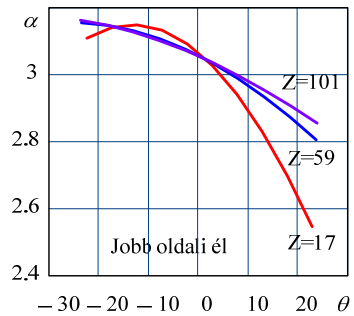


15. ábra. *A hátszög változása a fogferdeségi szög függvényében a bal oldali élen*

A lefejtett fogazat fogferdeségi szögének növekedésével a működő hátszögek variációs intervalluma megnövekedik, ahogyan azt a **15.** és **16. ábrán** szemléltetett grafikonokból leolvashatjuk. Általánosan kijelenthetjük, hogy a csökkenő tendencia megmarad. Megfigyelhető, hogy a bal oldali élen a maximális értékek nagyobbak, a jobb oldali élen pedig a minimális értékek kisebbek.

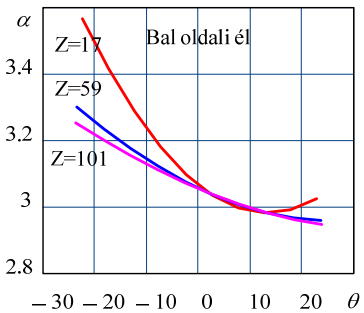


16. ábra. *A hátszög változása a fogferdeségi szög függvényében a jobb oldali élen*



18. ábra. *A hátszög változása a fogszám függvényében a jobb oldali élen*

4.3. A fogszám befolyása



17. ábra. *A hátszög változása a fogszám függvényében, a bal oldali élen*

A fogszám befolyását a működő hátszögre a **17.** és **18 ábrá**kon szemléltettük. Észre lehet venni, hogy minél nagyobb a fogazott kerék fogszáma, annál kisebb a hátszög változása. Akár a homlokszög esetében, Z = 59 fog felett a fogszám befolyása elhanyagolható.

5. Következtetések

A **7–16. ábrá**k összehasonlító együttes vizsgálata alapján kijelenthetjük, hogy a csigamaró működő élszögeinek változása a vizsgált paraméterek függvényében 1° -nál kisebb. Részletes gyakorlati kutatások igazolták [8], hogy főként a működő oldalhátszög jelentősen befolyásolja a forgácsképződés körülményeit, a szerszám kopását és a megmunkálás pontosságát.

A legnagyobb változások a fejköri élponton (tehát a lekerekítési szakaszon) alacsony fogszámú és nagy fogferdeségű kerekek megmunkálásakor lépnek fel.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Radzevich, P. S.: *Dudley's Handbook of Practical Gear Design.* CRC-Press, London, 2016, 368–379.

[2] Litvin F.L.: *A fogaskerékkapcsolás elmélete*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1972, 187–190 oldal.

[3] Hollanda D.: *Bazele aşchierii şi generării suprafeţelor,* „Petru Maior" Egyetem, Marosvásárhely, 1994.

[4] Máté M.: *Hengeres fogaskerekek gyártószerszámai*, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 2016, 187–206 oldal.

[5] Dudás, I. *The Theory and Practice of Gear Worm Drives,* Penton Press, London, 2000.

[6] Radzevich, P. S.: *Gear Cutting Tools. Fundamentals of design and computation*, CRC-Press, London, 2010.

[7] Gyenge Cs.: *Lefejtőmarók oldalhátszögének pontos meghatározása és optimálása,* Gép, 48. évf. (1996), 10 sz, 38–40 oldal.

[8] Gyenge Cs.: *Contribuţii asupra îmbunătăţirii preciziei frezelor-melc pentru executarea angrenajului melcat duplex.* Doktori értekezés, Kolozsvári Műszaki Egyetem, 1979. 69–100.

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 147–150 old. 16
http://hdl.handle.net/10598/30079

ÖTOLDALÚ TÉRMECHANIZMUS KINEMATIKAI VIZSGÁLATA

KINEMATIC ANALYSIS OF FIVE-SIDED MECHANISM

Popa-Müller Izolda[1], Papp István[2]

[1] *SAPIENTIA-Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Műszaki és Humán Tudományok Kar, Gépészmérnöki Tanszék, Románia, Koronka, Segesvári út,1/C, Fax: 0265-206211, ipmuller@ms.sapientia.ro*

[2] *SAPIENTIA-Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Műszaki és Humán Tudományok Kar, Gépészmérnöki Tanszék, pappistvan1944@yahoo.com.*

Abstract

All parts position of any spatial or planar mechanism can be clearly defined with the constraint equations. It is known that any fourth-class coupling, can be replaced with two fifth-class coupling and one plus part, being transformed in a space mechanism with one degree of freedom and is enumerated in the zero family.

This thesis contains the kinematical examination of the space mechanism and treats the position of each part. The cinematics of the coupling can be examined only with the method of Denavit-Hartenberg or with the constraint equations.

Keywords: *constraints equations, position, centre of gravity.*

Összefoglalás

A kényszeregyenletek segítségével bármely tér vagy síkban fekvő mechanizmus tagjainak pozíciója egyértelműen meghatározható. Bármely negyedosztályú csukló két ötödfokú csuklóval és egy póttaggal helyettesíthető. Ezáltal a négyoldalú térmechanizmus egy ötoldalú térmechanizmussá alakul, amely a zérós családhoz tartozik, és amelynek szabadságfoka egy. A dolgozat az így kapott mechanizmus kinematikai vizsgálatát és a tagok helyzetének meghatározását tartalmazza. A mechanizmus kinematikai vizsgálata kényszeregyenletekkel vagy a Denavit–Hartenberg-féle módszerrel tárgyalható.

Kulcsszavak: *kényszeregyenlet, pozíció, súlypont*

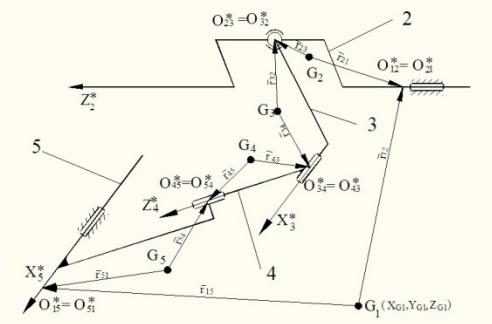
1. Az adatbevitel meghatározása

Az ötoldalú mechanizmus elemei:

1. géptörzs
2. főtengely
3. hajtókar
4. kardánkereszt
5. lengőkar

A programban a tagokat kapcsolási sorrend szerint 1-től 5-ig számoztuk.

A program egy kívülálló rögzített rendszerhez van felírva, amelyben a géptörzs koordinátái X_{G1}, Y_{G1}, Z_{G1} értékeket kaptak. A főtengely, a mechanizmust mozgató tag forgómozgást végez a Z_2^* rögzített tengely körül. A vezető paraméter az Euler-szögek szerint a



1. ábra. *Ötoldalú térmechanizmus*

ψ_2^*. A főtengely helyzetét az $\mathbf{r}_{12}$ -es helyzetvektor határozza meg, amely a géptörzs súlypontját és a főtengelyen felvett gyakorlatilag jól meghatározott O_{12}^* pontot köti össze.

Figyelembe véve, hogy az O_{12}^* és az O_{21}^* pontokat úgy választottuk meg, hogy egybeessenek, az $\mathbf{r}_{21}$ -et úgy számítottuk ki, hogy a főtengely G_2 súlypontja gyakorlatilag meghatározott helyett foglal el.

A két tag közötti kapcsolási pontok $O_{12}^* = O_{21}^*$, a főtengely szimmetriatengelyén helyezkednek el. A $\mathbf{r}_{23}$ helyzetvektor a gömbcsukló középpontjának helyzetét határozza meg a főtengely súlypontjához viszonyítva. A hajtókart a főtengellyel egy harmadosztályú gömbcsukló kapcsolja össze. A hajtókar G_3 súlypontját az $\mathbf{r}_{32}$ és az $\mathbf{r}_{34}$ helyzetvektorok határozzák meg.

A 3-as hajtókar térmozgást végez.

A 4-es kardánkereszt a 3-as hajtókarhoz egy forgócsuklóval van kapcsolva, amely a hajtókarhoz viszonyítva X_3^* tengely körül fordul el.

A két tag közös pontja az egymásra helyezett O_{34}^* és O_{43}^* pontok, amelyek meghatározzák az $\mathbf{r}_{34}$ és az $\mathbf{r}_{43}$ helyzetvektorok értékeit. A helyzetvektorok pedig meghatározzák mozgás közben a súlypontok helyzeteit.

Az $\mathbf{r}_{45}$ helyzetvektor a kardánkereszt súlypontját és a Z_4^* tengelyen felvett O_{45}^* pontot köti össze.

Az O_{45}^* egybeesik O_{54}^* -al, amely a lengőkar és a kardánkereszt elméleti mozdulatlan közös pontját képezi.

A lengőkar G_5 súlypontja egy körívet ír le az X_5^* tengely körül. Az O_{15}^* pont egybeesik az O_{51}^* -el, amely meghatározza az X_5^* tengely helyzetét a G_1 súlyponthoz viszonyítva.

A vektorkontúrt az $\mathbf{r}_{15}$ helyzetvektor zárja. Az így kapott zárt vektorkontúr segítségével a kényszeregyenletek használhatóvá válnak, ezáltal meghatározhatók minden tag súlypontjának lineáris és szög koordinátái az előre megválasztott rögzített koordinátarendszerhez viszonyítva.

2. A kényszeregyenletek meghatározása

A gép törzsét és a főtengelyt összekapcsoló forgó csukló kényszeregyenletei a következők:

$$X_{G1} + x_{12}\cdot\alpha_{11} + y_{12}\cdot\beta_{11} + z_{12}\cdot\gamma_{11} - (X_{G2} + x_{21}\cdot\alpha_{12}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2) + y_{21}\cdot\beta_{12}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2) + z_{21}\cdot\gamma_{12}(\psi_{2,}\theta_2)) = 0 \quad (1)$$

$$Y_{G1} + x_{12}\cdot\alpha_{21} + y_{12}\cdot\beta_{21} + z_{12}\cdot\gamma_{21} - (Y_{G2} + x_{21}\cdot\alpha_{22}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2) + y_{21}\cdot\beta_{22}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2) + z_{21}\cdot\gamma_{22}(\psi_{2,}\theta_2)) = 0 \quad (2)$$

$$Z_{G1} + x_{12}\cdot\alpha_{31} + y_{12}\cdot\beta_{31} + z_{12}\cdot\gamma_{31} - (Z_{G2} + x_{21}\cdot\alpha_{32}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2) + y_{21}\cdot\beta_{32}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2) + z_{21}\cdot\gamma_{32}(\psi_{2,}\theta_2)) = 0 \quad (3)$$

$$\alpha_{12}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)\cdot\gamma_{120}+\beta_{12}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)\cdot\gamma_{220}+$$
$$+\gamma_{12}(\psi_{2,}\theta_2)\cdot\gamma_{320}-b_{131}=0 \tag{4}$$

$$\alpha_{32}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)\cdot\gamma_{120}+\beta_{32}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)\cdot\gamma_{220}+$$
$$+\gamma_{32}(\psi_{2,}\theta_2)\cdot\gamma_{320}-b_{331}=0 \tag{5}$$

Hasonló módon írjuk fel a főtengelyt és hajtókart összekapcsoló gömbcsukló egyenleteit:

$$X_{G2}+x_{23}\cdot\alpha_{12}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)+y_{23}\cdot\beta_{12}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)+$$
$$+z_{23}\cdot\gamma_{12}(\psi_{2,}\theta_{2,})-(X_{G3}+x_{32}\cdot\alpha_{13}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+$$
$$+y_{32}\cdot\beta_{13}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+z_{32}\cdot\gamma_{13}(\psi_{3,}\theta_3))=0 \tag{6}$$

$$Y_{G2}+x_{23}\cdot\alpha_{22}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)+y_{23}\cdot\beta_{22}(\psi_{2,}\theta_{2,}\phi_2)+$$
$$+z_{23}\cdot\gamma_{22}(\psi_{2,}\theta_{2,})-(Y_{G3}+x_{32}\cdot\alpha_{23}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+$$
$$+y_{32}\cdot\beta_{23}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+z_{32}\cdot\gamma_{23}(\psi_{3,}\theta_3))=0 \tag{7}$$

$$Z_{G2}+x_{23}\cdot\alpha_{32}(\theta_{2,}\phi_2)+y_{23}\cdot\beta_{32}(\theta_{2,}\phi_2)+$$
$$+z_{23}\cdot\gamma_{32}(\theta_2)-(Z_{G3}+x_{32}\cdot\alpha_{33}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+$$
$$+y_{32}\cdot\beta_{33}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+z_{32}\cdot\gamma_{33}(\psi_{3,}\theta_3))=0 \tag{8}$$

Hajtókar és kardánkereszt közötti forgó csukló egyenletei:

$$X_{G3}+x_{34}\cdot\alpha_{13}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+y_{34}\cdot\beta_{13}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+$$
$$+z_{34}\cdot\gamma_{13}(\psi_{3,}\theta_3)-(X_{G4}+x_{43}\cdot\alpha_{14}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+$$
$$+y_{43}\cdot\beta_{14}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+z_{43}\cdot\gamma_{14}(\psi_{4,}\theta_4))=0 \tag{9}$$

$$Y_{G3}+x_{34}\cdot\alpha_{23}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+y_{34}\cdot\beta_{23}(\psi_{3,}\theta_{3,}\phi_3)+$$
$$+z_{34}\cdot\gamma_{23}(\psi_{3,}\theta_3)-(Y_{G4}+x_{43}\cdot\alpha_{24}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+$$
$$+y_{43}\cdot\beta_{24}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+z_{43}\cdot\gamma_{24}(\psi_{4,}\theta_4))=0 \tag{10}$$

$$Z_{G3}+x_{34}\cdot\alpha_{33}(\theta_{3,}\phi_3)+y_{34}\cdot\beta_{33}(\theta_{3,}\phi_3)+$$
$$+z_{34}\cdot\gamma_{33}(\theta_3)-(Z_{G4}+x_{43}\cdot\alpha_{34}(\theta_{4,}\phi_4)+$$
$$+y_{43}\cdot\beta_{34}(\theta_{4,}\phi_4)+z_{43}\cdot\gamma_{34}(\theta_4))=0 \tag{11}$$

$$\alpha_{130}\cdot\alpha_{13}(\psi_3,\theta_{3,}\phi_3)+\beta_{13}(\psi_3,\theta_{3,}\phi_3)\cdot\alpha_{230}+$$
$$+\gamma_{13}(\psi_3,\theta_3)\cdot\alpha_{330}-b_{114}=0 \tag{12}$$

$$\alpha_{130}\cdot\alpha_{33}(\theta_{3,}\phi_3)+\beta_{33}(\theta_{3,}\phi_3)\cdot\alpha_{230}+$$
$$+\gamma_{33}(\theta_3)\cdot\alpha_{330}-b_{314}=0 \tag{13}$$

Kardánkereszt és lengőkar közötti forgó csukló egyenletei:

$$X_{G4}+x_{45}\cdot\alpha_{14}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+y_{45}\cdot\beta_{14}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+$$
$$+z_{45}\cdot\gamma_{14}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)-(X_{G5}+x_{54}\cdot\alpha_{15}(\psi_{5,}\theta_{5,}\phi_5)+$$
$$+y_{54}\cdot\beta_{15}(\psi_{5,}\theta_{5,}\phi_5)+z_{54}\cdot\gamma_{15}(\psi_{5,}\theta_5))=0 \tag{14}$$

$$Y_{G4}+x_{45}\cdot\alpha_{24}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+y_{45}\cdot\beta_{24}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)+$$
$$+z_{45}\cdot\gamma_{24}(\psi_{4,}\theta_{4,}\phi_4)-(Y_{G5}+x_{54}\cdot\alpha_{25}(\psi_{5,}\theta_{5,}\phi_5)+$$
$$+y_{54}\cdot\beta_{25}(\psi_{5,}\theta_{5,}\phi_5)+z_{54}\cdot\gamma_{25}(\psi_{5,}\theta_5))=0 \tag{15}$$

$$Z_{G4}+x_{45}\cdot\alpha_{34}(\theta_{4,}\phi_4)+y_{45}\cdot\beta_{34}(\theta_{4,}\phi_4)+$$
$$+z_{45}\cdot\gamma_{34}(\theta_{4,}\phi_4)-(Z_{G5}+x_{54}\cdot\alpha_{35}(\theta_{5,}\phi_5)+$$
$$+y_{54}\cdot\beta_{35}(\theta_{5,}\phi_5)+z_{54}\cdot\gamma_{35}(\theta_5))=0 \tag{16}$$

$$\gamma_{140}\cdot\alpha_{14}(\psi_4,\theta_{4,}\phi_4)+\beta_{14}(\psi_4,\theta_{4,}\phi_4)\cdot\gamma_{240}+$$
$$+\gamma_{14}(\psi_4,\theta_4)\cdot\gamma_{340}-b_{135}=0 \tag{17}$$

$$\gamma_{140}\cdot\alpha_{34}(\theta_{4,}\phi_4)+\beta_{34}(\theta_{4,}\phi_4)\cdot\gamma_{240}+$$
$$+\gamma_{34}(\theta_4)\cdot\gamma_{340}-b_{335}=0 \tag{18}$$

Végül a lengőkart a géptörzshöz kapcsoló forgó csukló egyenletei a következők:

$$X_{G5} + x_{51} \cdot \alpha_{15}(\psi_5, \theta_5, \phi_5) + y_{51} \cdot \beta_{15}(\psi_5, \theta_5, \phi_5) + \\ + z_{51} \cdot \gamma_{15}(\psi_5, \theta_5) - (X_{G1} + x_{15} \cdot \alpha_{11} + \\ + y_{15} \cdot \beta_{11} + z_{15} \cdot \gamma_{11}) = 0 \tag{19}$$

$$Y_{G5} + x_{51} \cdot \alpha_{25}(\psi_5, \theta_5, \phi_5) + y_{51} \cdot \beta_{25}(\psi_5, \theta_5, \phi_5) + \\ + z_{51} \cdot \gamma_{25}(\psi_5, \theta_5) - (Y_{G1} + x_{15} \cdot \alpha_{21} + \\ + y_{15} \cdot \beta_{21} + z_{15} \cdot \gamma_{21}) = 0 \tag{20}$$

$$Z_{G5} + x_{51} \cdot \alpha_{35}(\theta_5, \phi_5) + y_{51} \cdot \beta_{35}(\theta_5, \phi_5) + \\ + z_{51} \cdot \gamma_{35}(\theta_5) - (Z_{G1} + x_{15} \cdot \alpha_{31} + \\ + y_{15} \cdot \beta_{31} + z_{15} \cdot \gamma_{31}) = 0 \tag{21}$$

$$\alpha_{150} \cdot \alpha_{25}(\psi_5, \theta_5, \phi_5) + \beta_{25}(\psi_5, \theta_5, \phi_5) \cdot \alpha_{250} + \\ + \gamma_{25}(\psi_5, \theta_5) \cdot \alpha_{350} - b_{211} = 0 \tag{22}$$

$$\alpha_{150} \cdot \alpha_{35}(\theta_5, \phi_5) + \beta_{35}(\theta_5, \phi_5) \cdot \alpha_{250} + \\ + \gamma_{35}(\theta_5) \cdot \alpha_{350} - b_{311} = 0 \tag{23}$$

A tagokat a kapcsolási sorrendet követve számoztuk meg.

A módszer előnye, amint látni is lehet, abban áll, hogy az ugyanazon típusú csuklóra felírt egyenletekben csak az indexek cserélődnek, míg az egyenletek formálisan változatlanok maradnak.

Mindenik kapcsolt két tagra felírt első három egyenlet a tagok súlypontjának helyzetét határozza meg az $OXYZ$ rögzített koordináta-rendszerben, míg az utolsó két egyenlet a csuklótengelyek egybeesésének feltételét fogalmazza meg matematikailag.

A tehetetlenségi főtengelyek helyzetét a ψ, θ, ϕ szögek adják meg, szintén a rögzített alaprendszerhez viszonyítva.

4. Következtetések

A dolgozat a kényszeregyenletek módszerének alkalmazását mutatja be. Ez egy igen hatékony, biztosan kezelhető, általános módszer, amely az eddigi ismert módszerek bármelyikét helyettesítheti.

A tudományos eredményeket hasznosítani lehet, bármely karos mechanizmus vagy robotok kinematikai vizsgálatánál. Véleményünk szerint a gépszerkezettan oktatását nagymértékben lehet a módszer bevezetésével korszerűsíteni, leginkább új laborgyakorlatok kialakításával.

A kényszeregyenletek módszerének használatával pontosan meg lehet határozni a térmechanizmusok tagjaihoz tartozó központi tehetetlenségi főtengelyek pozícióját a saját, valamint a külső rögzített koordináta rendszerhez viszonyítva.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Maros, D., Orlandea, N.,: *Contributions to the Determination of the Equations of Motion for Multidegree of Freedom System*, ASME, paper 70-Mech.-29, Ohio, USA, 1970

[2] Maros, D.,: *Calcule numerice la mecanismele plane*, Ed. Dacia, Cluj-Napoca, 1987

[3] Papp, I.,: *Contribuţii la echilibrarea dinamică a mecanismelor spaţiale*., Teză de doctorat, Cluj Napoca, 2000

[4] Papp, I.: *The Equations of the Constrained Screw Joints*, PRASIC vol. I pag.1, 89-193, Braşov, 2002

[5] Papp I.,: *Mechanizmusok elmélete*, Scientia Kiadó, Kolozsvár, ISBN 978-973-1970-29-5, 2010

[6] Papp I., Popa-Müller I.: *Karos mechanizmus kinematikai elemzése kényszeregyenletekkel*, 1298 számú Kutatási szerződés a Sapientia Alapítvány Kutatási Programok Intézetével, 2005

[7] Papp I., Popa-Müller I.: *Pozíció meghatározása kényszeregyenletek segítségével, általános transzformálás esetén*, Kutatási szerződés a Sapientia Alapítvány Kutatási Programok Intézetével 2008

[8] Pelecudi, Chr.,: *Teoria mecanismelor spaţiale*, Ed. Academiei, Bucureşti, 1972

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 151–162. 17
http://hdl.handle.net/10598/30075

KOMPLEX MONITORINGRENDSZER HASZNÁLATA VASÚTI FELÉPÍTMÉNY VIZSGÁLATÁBAN AZ IPAR 4.0-VAL ÖSSZHANGBAN

USING A COMPLEX MONITORING SYSTEM FOR RAILWAY STRUCTURE INVESTIGATION IN ACCORDANCE WITH 4.0.

Tokody Dániel[1], Nyikes Zoltán[2], Kovács Tünde[3]

[1] *Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, 1081 Budapest Népszínház u. 8., tokody.daniel@mav.hu*

[2] *Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, 1081 Budapest Népszínház u. 8., nyikeszoli@gmail.com*

[3] *Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, 1081 Budapest Népszínház u. 8., kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu*

Abstract
The provision of railway transport and transport a priority part of the infrastructure, not only in our country, but all over the world. The rails must be checked because of the damages resulted from the continuous demand. The continuous in-situ monitoring enables the safe operation, which information obtained in the monitoring, management and processing of data after regulates the rail system. Loss or change of the measured data can cause a disaster, so by monitoring the information security is a top priority.

***Keywords**: real-time rails health monitoring, rail diagnosis, Industry 4.0, smart rail technology, data-driven railway systems*

Absztrakt
A vasúti szállítás és közlekedés biztosítása az infrastruktúra kiemelt fontosságú része nemcsak hazánkban, de a világ minden részén. A sínpályákat az igénybevételekből eredő károsodások miatt folyamatosan ellenőrizni kell. A folyamatos in situ ellenőrzés lehetőséget nyújt a biztonságos üzemeltetésre, mely a monitorozás során kapott információk, adatok kezelése és feldolgozása után szabályozza a vasúti rendszert. A mért adatok elvesztése vagy megváltozása katasztrófát is okozhat, ezért a monitorozás során az információbiztonság kiemelt fontosságú.

***Kulcsszavak:** valós idejű sínmonitoring, síndiagnosztika, Ipar 4.0, okos vasúti technológiák, adatalapú vasúti rendszer létrehozása*

1. Bevezetés

Wolfgang Wahlster, a Német Mesterséges Intelligencia Kutatóközpont vezetője előadásában az Ipar 4.0-ról beszélt már 2013-ban. Lényegében meglátása szerint a 4. ipari forradalmat éljük, ami az ipari automatizálás tekintetében a kiberfizikai rendszerek megvalósítását jelenti [1].

Cikkünk címe láttán felmerül a kérdés, hogy mi a kapcsolat a vasúti felépítmény vizsgálata és az Ipar 4.0 között. Az Ipar 4.0 létrejötte a digitalizáció folyamatához köthető. A digitális forradalom, a negyedik

ipari forradalom vagy, ahogy nevezzük „Ipar 4.0” a teljes gazdaságunkat átalakítja. A gazdaság mindig is erős kapcsolatban állt a közlekedés fejlettségével. Gondoljunk csak arra, ha egy régióban például autópálya vagy vasúti pálya épül, ezáltal a közlekedés folyamatai beindulnak, milyen hatással van az a teljes ott élő társadalom egészére. Ez a katalitikus hatású változás következik be a digitalizáció vasúti területen történő elterjedése esetén is. [2]

Úgy, ahogy az 1946-os évektől Norbert Wiener által először megfogalmazott kibernetika megváltoztatta a vasút világát, meglátásunk szerint úgy fogja a digitalizáció is átalakítani a vasúti ipart, a vasúti infrastruktúrát, illetve a vasúttal kapcsolatos tevékenységek egészét. Nevezhetjük ezt a folyamatot a közlekedési rendszereket tekintve digitalizációnak, intelligens vagy okos rendszerek létrehozásnak, vasúti eszközök internetének (IoT), intelligens közlekedési rendszerek kialakításának vagy akár okos mobilitásnak. Lényegében arról van szó, hogy a valós fizikai világ és a virtuális (digitális, kiber) világ közötti kapcsolatok létrejötte az élet összes területén megjelenik. Így nemcsak a városokban, közlekedésben, de még a vasúti alkalmazásokban is, létrehozva a hálózatba kapcsolt kooperatív intelligens közlekedést, amelynek egyik fontos eleme a fizikai környezet érzékelésére szolgáló érzékelő hálózaton alapuló és a fizikai rendszerbe is beavatkozni képes automatikus felügyeleti és irányítórendszer megvalósítása.

1.1. Preventív valós idejű pályaállapot monitoringrendszer kialakításának kérdései

A vasúti pálya monitoring jelentős szerepet tölt be a vasúti pálya kiépítési állapotának fenntartásában, a megfelelő színvonalú és biztonságos vasúti közlekedés megvalósításában. A vasúti pályahibából eredő szolgáltatásromlás jelentős negatív hatásokat és plusz költségeket jelent a vasúti szolgáltatást nyújtóknak.

Ugyanakkor a ma alkalmazott vizsgálati módszerek bonyolult mérővonatokba épített szerkezeteket igényelnek, amelyek üzemeltetése, futásigénye, szakemberek általi felügyelete többletköltségként jelentkezik a vasúti pályát üzemeltető számára. Ennek csökkentésére jó lehetőség mutatkozik egy kompakt kivitelű mérő- és felügyeleti rendszer kialakításával. Ezt az új kialakítású rendszert nem külön mérővonatokra szerelt berendezések alkalmazásával szeretnénk létrehozni, hanem a mai magyar vasúton használt összes mozdonytípusra felszerelhető változattal kívánjuk megvalósítani. A rendszer előnye, hogy az amúgy is futó mozdonyokon elhelyezve folyamatos, valós idejű adatokat szolgáltathat a teljes bejárt pályaszakaszokról, ezzel mintegy állandó felügyelet alatt tartva a vasúti infrastruktúra ezen részét. Ennek előnye azonnal látszik, hiszen a mérővonatok csak bizonyos időnként képesek végigjárni a különböző vasúti pályaszakaszokat.

Ezért mind a mai napig vonalgondozó kollégák járják a vasútvonalakat. A vonalgondozó tevékenysége a vonalbejárás, melynek során megfigyeli a vasúti pályát és annak tartozékait, a vasúti űrszelvényt és annak szabad voltát a vasúti forgalom biztonságának garantálása végett. Mondani sem kell, az emberi érzékelés korlátait miatt ez a fajta tevékenység nem derítheti fel az összes pályaproblémát.

A vasúti pályáról folyamatosan gyűjtött adatokat a mozdony vezetőjének hathatós közreműködése nélkül automatikus módon GSM-R kommunikáción keresztül egy zártcélú felügyeleti rendszer számára továbbíthatjuk. A nagy mennyiségű adat feldolgozását követően platform független felületen jeleníthetjük meg az egyes vasútvonalakon regisztrált mérési eredményeket. A rendszer kialakításából adódóan akár egy vonalon haladó összes mozdony által mért adatot egy helyen ábrázolhatjuk. Így az egyszeri

vagy ritka mérésből fakadó problémák nem jelentenek gondot a rendszerben. Kiváltképpen így van ez egy forgalmasabb vonalszakasz esetén.

Nem szükséges a vasútvonal mérése kapcsán külön pályakapacitást felhasználni, így ebben az időben a pályát üzemeltető vasúti társaság saját tevékenységét végezheti. A rendszer a mai felügyeleti rendszerek minden előnyével is párosul. A gyűjtött adatok feldolgozásával olyan prediktív riportok állíthatók elő, amelyek segítik a pályaszakaszok üzemeltetését, karbantartását, hibaelhárítását, felújításának tervezését stb.

2. Síndiagnosztikai kihívások

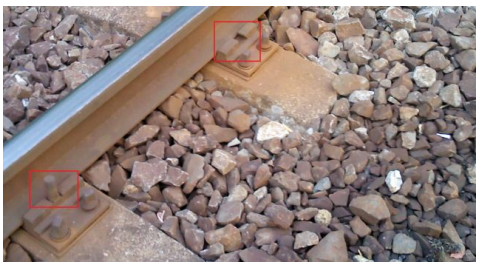
Milyen sín-, illetve pályadiagnosztikai funkciókat valósíthatunk meg az említett rendszerrel?

Ilyen a vasúti sín teljes körű vizsgálata. Az **1. ábrá**n egy sínfejhibát láthatunk, amely súlyos problémát okoz a nagy sebességű és nagy teljesítményű mozdonyok által továbbított vasúti szerelvények közlekedésében.

Sínek, aljak, kapcsolószerek, ágyazat megfigyelésére képessé tehető a felügyeleti rendszer.

1. ábra. *Vasúti sínfejhiba [3]*

A **2. ábrá**n a sínleerősítési hiányosságok láthatók.



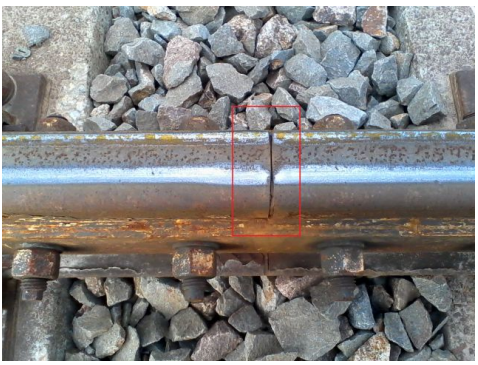
2. ábra. *Vasúti pálya sínleerősítési hiányossággal [4]*

A vasúti pályában keletkező egyéb hibák automatikus feltárása. A vasúti pálya nem megfelelő víztelenítése okán keletkező ágyazateliszaposodás felderítésére is alkalmassá tehető a rendszer. Segítségével pontos adatbázist hozhatunk létre az említett problémák minél hamarabb történő szakszerű kezelésére.

A **3. ábrá**n a vasúti ágyazat kezdődő eliszaposodását láthatjuk. A rendszer képessé tehető a vasúti pályába épített egyéb eszközök állapotának felmérésére is. Például a hazai vasúti technikában alkalmazott szigeteltsínek állapotának vizsgálatára.

3. ábra. *Vasúti ágyazat eliszaposodásának felismerése (saját ábra, Gödöllő állomás 2016.08.12.)*

A **4. ábrá**n a sínfejnek egy szigetelő hevederkötésnél kialakuló összeverődését figyelhetjük meg.



4. ábra. *Vasúti pályába épített berendezések vizsgálata (saját ábra, Gödöllő állomás 2016.08.12.)*

Nemcsak a szigeteltsínek vizsgálata, felügyelete valósítható meg, hanem például a balízok (elektromágneses jeladó a sínpár között), a kitérőkbe épített hajtóművek, egyéb szerelvények vizsgálata is.

A rendszerben gyűjtött adatok kiértékelése módot adhat arra, hogy a vasúti pályahibából adódó balesetek megelőzhetők legyenek. Egy ilyen síntörésből fakadó baleset képét látjuk az **5. ábrá**n.

5. ábra. *Széles nyomtávolságú vasúti pálya meghibásodása, jármű alatti síntörés (Záhony, 2013.10.10-én) [5]*

3. Vasúti sínek állapotfelügyelete, mérési lehetőségek és módszerek

A sínek károsodási formái igen különbözőek lehetnek. Az acélsín üzemszerűen a szintén acél vasúti kerékkel érintkezik száraz (az időjárási csapadéktól eltekintve) gördülő és csúszó mozgásban. A felületek folyamatosan ismétlődő és váltakozó terhelésnek kitettek, mely fárasztó igénybevételt okoz. A rugalmas képlékeny alakváltozás finom szövetszerkezeti változásokat okozhat, melyek befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat [6][7]. Emellett nem hanyagolható el az a másik szintén a sínpályát terhelő igénybevétel („zakatolás”), mely a sín alapjának, a vasúti ágyazatnak a károsodása miatt ébredő fárasztó igénybevétel, mely esetben már az üzemi terheléstől eltérő lengő és lüktető igénybevétel lép fel. A két egymástól eltérő fárasztó igénybevétel szuperponálódása katasztrofális károsodási eseményekhez vezethet.

A használatban lévő sínpályák károsodásának vizsgálata csak roncsolásmentes vizsgálatokkal végezhető el. Azoknak a vizsgálati módszereknek a száma, melyekkel a hibák kimutathatók, igen széles. A vizsgálati módszer kiválasztásakor mindig figyelembe kell vennünk a vizsgálandó anyag kémiai összetételét, a gyártási módból adódó strukturális sajátosságait, valamint a geometriájából is származó feszültségállapotát.

3.1. Szemrevételezés (optikai kamera alkalmazása)

A legelterjedtebb roncsolásmentes vizsgálati módszer a szemrevételezés. Ebben az esetben általában a vizsgáló személy végzi a vizsgálatot, de alkalmazhatunk optikai kamerát, valamint képelemző rendszert. Ebben az esetben etalon képpel történő összehasonlítás történik, melyhez megfelelő megvilágítás szükséges. A sín felületére kerülő szennyeződések és megváltozó fényviszonyok a vizuális képelemzés eredményét befolyásolhatják.

3.2. Ultrahangos vizsgálat

Az ultrahangos vizsgálatnak két típusát különböztethetjük meg, az egyik, amikor a vizsgálófej csatoló folyadékkal a vizsgálan-

dó darab felületéhez érintkezik, a másik pedig amikor nem szükséges az érintkezés. Mindkét esetben a nagy frekvenciás ultrahang azon tulajdonságát használjuk ki, hogy a közegben terjedve annak határáról visszaverődik.

3.3. Akusztikus emissziós vizsgálat

A repedések, törések keletkezésénél a rugalmas energia felszabadulása hangkibocsátással jár. A kerék-sín kapcsolat során keletkező hangok rögzítése és „etalon" jelsorozattal való összehasonlítása is szolgáltathat információt a sín állapotát illetően, természetesen a zavaró jelek kiszűrése elengedhetetlen.

3.4. Örvényáramos vizsgálat

Elektromosan vezető anyagok esetén alkalmazható, melyekben az időben változó mágneses tér áramot indukál. Ezt az áramot örvényáramnak nevezzük. Az örvényáram is gerjeszt mágneses teret, mely visszahat a gerjesztő mágneses térre, illetve az azt létrehozó áramra. Az áramot mérni lehet, az eredményből különböző anyaghibákra vagy anyagtulajdonságokra és azok megváltozására lehet következtetni[6].

A vizsgálat korlátja, hogy csak a felületi és a felülethez közeli eltérések kimutatására alkalmas, így a vizsgált darab belsejében keletkezett repedés, hiba nem mutatható ki.

3.5. Radarvizsgálat

A vizsgálat a földradarral azonos elvű geofizikai módszer, amely radar impulzusok segítségével gyűjt információkat a pálya állapotáról, ahhoz hasonlóan, mint az ultrahangos technikánál. A kapott eredmények alapján a felszín alatti repedések, hibák mutathatóak ki. A georadar elektromágneses rövidhullámot bocsát ki, mely a nem egyforma dielektromos állandójú rétegekben visszaverődik. A dielektromos állandót többnyire a talaj nedvességtartalma (minél magasabb a nedvességtartalom, annál magasabb a dielektromos állandó), kisebb mértékben pedig a talaj sűrűsége és szerkezete határozza meg.

A georadaros roncsolásmentes vizsgálattal kimutatható a vasúti pálya romlásának két fő tényezője: az ágyazat és az alépítmény megnövekedett nedvességtartalma, illetve annak felaprózódása és szennyezettsége, aminek következménye a teherbírás-csökkenés. Kimutathatók továbbá a különböző szerkezeti rétegekben végbemenő tönkremeneteli folyamatok, rétegvastagság megváltozása, altalajsüllyedés, vízzsákok kialakulása, továbbá a felszín alatti közműkeresztezések, akadályok, tereptárgyak jelenléte stb [6] [7].

3.6. Termográfiai vizsgálat

Infravörös fény alkalmazásával járó termográfiai vizsgálat szintén jó eredményt adhat. Ezzel a módszerrel is csak a sínfelületen létrejövő és ahhoz közeli hibák mutathatók ki. A termográfiás, termovíziós eljárások általában azon az elven alapulnak, hogy egy anyag, pl. lemez egyik oldalának melegítésekor a belső anyaghibáktól mentes helyeken a termikus energia akadálytalanul átjuthat, míg a belső anyaghibás helyeken hőtorlódás keletkezik. Ez utóbbi jelenségnek az az oka, hogy a hibahelyeket kitöltő levegőnek a hővezetőképessége a fémeknek csak mintegy tized-, esetleg század-része. A termovíziós eljárás az infravörös színképtartománynak egy sávját hasznosítja. A rövidhullám-hosszak felé a nyaláb érzékelési határa a látható tartományban a mélyvörösben van. A hosszúhullám-tartomány felé a határ beleolvad a milliméter nagyságrendű (mikrohullámú) sávba. Az infravörös hullámsávot általában négy csoportra szokták felosztani, úgymint: közeli (10,75...3 μm), közepes (3...6 μm), távoli (6...15 μm) és a legtávolibb (15...1000 μm) tartományra. Az említett tartományok közül a termovíziós eljárás a 3...6 nm hullámhosszúságú közepes infravörös tartományban kisugárzott energiát transzformálja láthatóvá, és jeleníti meg képernyőn.

3.7. Radiológiai vizsgálat

A röntgenvizsgálat vagy izotópos vizsgálatok a sínek teljes keresztmetszetét illetően információt tudnak szolgáltatni az anyagfolytonossági hiányok tekintetében. A mikrorepedések kimutatására azonban nem alkalmas, és az anyagvastagság növekedésével csökken a kimutatható hibák mérete. Az általunk tervezett monitoringmódszerhez nem alkalmazható, mivel alkalmazása során veszélyt jelenthet a környezetében található élőlényekre, a vizsgálat elvégzése szigorú biztonsági szabályhoz kötött. A vonat nagy sebessége leképezési korlátot jelent.

3.8. Lézeres hibakereső vizsgálat

Ennek a vizsgálatnak az alkalmazhatósága is korlátozott, a sínfelület károsodásának ellenőrzésére lehet alkalmas. Mivel ennél a vizsgálatnál az emberi szemre és bőrre káros fényspektrumot alkalmazunk, igen gondos biztonságtechnikai követelményeknek is meg kell felelni.

A javasolható vizsgálati rendszer

A felsorolt vizsgálati módszerek egyike sem alkalmas önmagában, hogy a sínpálya állapotáról egyértelmű információkat szolgáltasson. Javasolt ezért egy kombinált vizsgálati módszer, mely esetén nemcsak a sín felületi rétegeinek károsodásáról kaphatunk képet, hanem a sínpálya egészéről tudunk információt gyűjteni.

4. Kapott adatok, mérési eredmények biztonságos továbbítása

Az ipari adatok, információk védelmére van számos, már létező bevált módszer. Az alapelvek itt is ugyanúgy érvényesülnek. Meg kell felelni annak a bizonyos hármas követelménynek, ami nem más, mint a Sértetlenség, a Bizalmasság és a Rendelkezésre állás elve. Ezt manapság a szakértők még kiegészítik a Letagadhatatlanság elvével is. A négy alapelvnek és ezek megfelelőségének köszönhetően alkalmazhatók azok a védelmi megoldások, amelyek az ipari adatok védelmét szolgálják. [8]

4.1. Miért fontos az információbiztonság

Nem szabad megfeledkezni arról sem, hogy – mint minden védelmi megoldás alkalmazása előtt – kockázati elemzést kell lefolytatni a rendszerre vonatkozóan. A kockázatelemzésre azért van szükség, hogy előre megpróbáljunk modellezni azokat a lehetőségeket, amelyek a rendszerünk biztonságát veszélyeztetik. Ez által jól beazonosíthatóak azok a sérülékenységi pontok, amelyek veszélyt jelentenek a rendszerre. Ezek nemcsak ember által okozott károk, hanem lehetnek természeti vagy anyagfáradásból adódó károk, esetleg a nem megfelelő tervezésből adódó problémák [9].

4.1.1. Fizikai biztonság

A fizikai biztonság tekintetében az egyenszilárd védelem biztosítását kell megoldani, valamint a héjszerű védelmet szükséges alkalmazni. Tehát a fizikai biztonság az a terület, ahogy az adatok, információk hozzáférését fizikai akadályokkal gátoljuk azok számára, akik nem jogosultak a védendő adathoz, információhoz való hozzáférésre.

4.1.2. Személyi biztonság

A személyi biztonság alatt az adott személyek megbízhatóságának és a felmerülő vizsgálati módszernek az összességét értjük. Ezek alapján eldönthető, hogy mielőtt az adott személynek, a szenzitív, védendő adatokhoz, információkhoz való hozzáférése megtörténne, megállapítást nyerjen a megbízhatósága, azaz a rendelkezésére bocsátott adatokkal, információkkal nem fog visszaélni, vagy nem tesz bennük szándékosan kárt.

4.1.3. Adminisztratív biztonság

Az adminisztratív biztonság azt jelenti, hogy a különböző eljárásrendek meglétét szükséges biztosítani. A jogszabályi és/vagy szabványok által biztosítottak alapján a saját eljárásrend kidolgozottsága az üzemeltetésre és az üzemmeneti folytonosság biztosítása céljából (BCM). Továbbá ide tartozik az üzemeltetők és felhasználók képzése és azok tervezése.

4.1.4. Elektronikus információbiztonság

Az elektronikus információbiztonság az adatok, információk elektronikus, digitális megjelenési formájának a védelmét jelenti az adat, információ keletkezésének helyétől a különböző átviteli utakon keresztül a végfelhasználóval bezárólag a megfelelő és szükséges logikai és vírusvédelmet is ideértve, valamint a megfelelő adatrejtést, úgymint a titkosítás/rejtjelezés. Idetartozik az adat tárolása, a biztonsági mentés, a felhasználói autentifikáció, valamint a biztonságos üzemelést biztosító hardver és szoftverelemek és azok frissítései is.

4.2. Az Ipar 4.0 és az IoT kapcsolata

Napjainkban a dolgok internete (Internet of Things, azaz IoT) tartja lázban a világot. A szükséges kommunikációs és információs technológiák ma már képesek az internetre csatlakozó több milliárd eszközt és tárgyat támogatni, valamint az általuk generált hatalmas adatmennyiséget továbbítani, tárolni és feldolgozni. Ahogyan a közösségi hálókon az emberek tartják egymással a kapcsolatot, úgy a dolgok internetjén a legkülönbözőbb tárgyak, a gyártás vagy karbantartás alatt levő termékek is képesek információkat megosztani aktuális állapotukról. A digitális és a fizikai világot összekapcsoló rendszerek többek között beépített szenzorokat, vezeték nélküli kommunikációs képességeket, aktuátorokat és szemantikus termékmemóriát használnak [10].

4.2.1. Az IoT alkalmazásának lehetőségei

Az általunk kialakítandó rendszer a beépített szenzorok segítségével maga ellenőrzi a vizsgált anyag esetében, hogy a memóriájában tárolt követelmények miként teljesülnek, és azonnal riasztást küld, ha eltérést észlel. Így az általunk kialakítandó rendszer minden eddiginél jobban optimalizálhatóvá válik, de a lehetőségek ezzel még nem merülnek ki. Az intelligens eszközök olyan szolgáltatásokat is kínálhatnak az interneten, amelyekkel a gép-gép közötti (M2M) kommunikáció által különböző beavatkozásokat kezdeményezhetnek. A közvetlenségnek és azonnaliságnak köszönhetően rendszerünk dinamikusabbá teheti az erőforrásigények tervezését is. A Res-Com (Resource Conservation through Context-activated Machine-to-Machine Communication) projekt jól alkalmazható lehetne a rendszerünk elemeként, mert a munkaállomás vezeték nélküli kommunikációs kapcsolaton keresztül folyamatos adatkapcsolatot tart fenn az anyagvizsgálatát ellátó szenzorokkal, amelyek így aktívan befolyásolják a vasúti közlekedést. A vasúti szerelvények mint munkaállomás – amelyek integrált webszervereket is tartalmaznak – egymással is kapcsolatban állnak, így több szerelvényre vagy a vasúti közlekedés egészére is kiterjeszthető a folyamatokat összehangoló és optimalizáló, elosztott közlekedésirányítás. A Res-Com rendszer lehetővé teszi, hogy a vasút minden egyes, a vizsgálatban részt vevő szerelvények mindegyikét nyomon követve a méréseken kívül rendkívül nagy mennyiségű adatot gyűjtsön az erőforrások felhasználásáról is, és a valós idejű elemzésükkel nyert információkat egy szintén webalapú vizualizációs keretrendszer (Display-as-a-Service, DaaS) segítségével megjelenítse. Az így nyert betekintés alkalmat ad arra, hogy a vasút menet közben kiértékelje a folyamatok energiahatékonyságát, illetve alternatív lehetőségeket mérlegeljen, és szükség ese-

tén azonnal beavatkozzon a közlekedés biztonsága fenntartásának érdekében. A DaaS egy keretrendszer, amely számos, egymástól eltérő forrásokból származó, vizualizált adatokat az interneten vagy belső hálózaton keresztül különböző eszközökön, igény szerinti összeállításban jeleníti meg. [10]

4.2.2. Az IoT-gateway program-igény

Az IoT-gateway az átalakítandó eszközt felügyelő szenzorokkal egészül ki, amelyek a vizsgált anyag paramétereit mérik. A szoftver e mért értékeket valós idejű információkká konvertálja, vagyis olyan formátummá, amely már az adott vasúti informatikai környezetbe integrálható mint egy „fáradhatatlan szinkrontolmács” az Ipar 4.0 irányába. Az IoT-gateway nem igényel bonyolult programozást, csupán konfigurálni szükséges egy böngésző használatával, ami a gyakorlatban azt jelenti, hogy igen gyorsan üzembe helyezhető. A konfiguráció a közelmúltban megjelent, új nyílt PPMP gépi nyelven (Production Performance Management Protocol) zajlik. Az Ipar 4.0 számára ily módon „felfrissítve” a vasúti szerelvény immár kész a hálózatba kapcsolt közlekedés alapvető új lehetőségeire. Ezek egyike az állandó minőségbiztosítás érdekében végzett folyamatellenőrzés, míg egy másik a nem várt eseményeket megelőzni hivatott állapotfelügyelet [11].

4.3. A mobiltechnológiás adatátvitel

A GSM (Global System for Mobile Communication) szabvány a mobiltelefonok által használt második generációs digitális cellás kapcsolat alapú hálózati protokollok leírására került bevezetésre. A lassú adatátviteli sebesség és a technológia várható elavulása új generációs készülékekben megkérdőjelezi alkalmazását. A GSM-cellák egy ideig nem lesznek lekapcsolva, mivel sok biztonságtechnikai és autóipari alkalmazás is használja ezt a technológiát, de a cellahálózat bővítése nem várható. A ma aktív cellák kikapcsolása legkésőbb 2026-ra várható [12].

Az **Edge (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)** szabványt az adatátviteli sebesség egy új modulációs eljárással az átlagos GPRS adatátviteli sebesség háromszorosára – 100 kbit/s nagyságrendű értékre (max 236 kbit/s) – való növelésével hozták létre. Az Edge a meglévő GSM/GPRS rádiós hálózathoz kötődik, emiatt annak esetleges kikapcsolása miatt nem feltétlenül érdemes ipari alkalmazásokban hosszú távon ezzel a technológiával számolni [12].

Az UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) harmadik generációs mobil távközlési szabvány egy közbülső lépcsőt jelent a régebbi technológiák és az LTE között. Az UMTS bevezetése komoly beruházási háttérrel jár, mert új bázisállomásokat kell építeni. Ez a technológia a nagy sávszélessége miatt (max 384 kbit/s), nagyon kedvező, mert az előző verziókkal kompatibilis, mégis utat fog engedni az LTE (LongTermEvolution) szabványnak. Az LTE-cellák az UMTS-cellákkal ellentétben gombamód szaporodnak [12].

4.3.1. A technológiák áttekintése

GSM/GPRS-modulok az elkövetkező két évben piacra kerülő termékekhez, és LTE-modulok a távolabbi jövő alkalmazásaihoz. **A GSM/GPRS** az iparban széles körben elfogadott technológia, azonban a következő 10-15 évben kivezetésre kerül. Az LTE nem kompatibilis az előző GSM/GPRS vagy UMTS technológiákkal, valamint a magas modul ár is (mely a GSM modulokénak akár nyolcszorosa lehet) problémát jelent. A biztonságtechnikai alkalmazásokban, a mérőberendezésekben és az ipari folyamatirányításban a tapasztalat alapján a feltöltés sebessége a meghatározó. A szenzoradatok közvetítéséhez az IoT felhasználásoknál egy sor kommunikációnak kell zajlania, így a feladatok összetettsége miatt ipari alkalmazásokban egyre szélesebb sávú technológiákra van szükség, a

jövő LTE-technológiáé. Az alkalmazó cégek elvárása a modulgyártók irányába az előző generációs (GPRS) készülékekkel való kommunikáció lehetőségének biztosítása és a működés közben elérhető szoftver erőforrások kihasználhatósága azért, hogy a komplex hardver kialakítást ne kelljen megváltoztatni. Figyelembe véve, hogy Európa nagyobb területein az LTE-topológia jelenleg még nem mindenütt elérhető, javasolt az LTE-modulok mellett ezekhez a tartalék megoldásokhoz folyamodni, hogy a rendszerünk mindenhol működőképes legyen. Nagy biztonsági kockázatot jelent az adatok továbbításában a szerelvények elérhetőségének kérdése hálózatkimaradás esetén. 2016 márciusának elején például a Vodafone hálózata Németország nagy területein elérhetetlenné vált. Azért, hogy ilyen esetekre is felkészüljünk, redundáns hálózati megoldást is be kell építeni a rendszerünkbe. A vezérlő nyílt pályán működik, ahol nincs Ethernet hozzáférés: ilyen esetben a modul 2 multiplexelt SIM kártya bemenettel kell hogy rendelkezzen, amelyik közül az egyikbe egy alternatív szolgáltató SIM kártyája kerül [12].

4.3.2. Az 5G technológia

A felhasználók minden más technológiánál szélesebb körben fogadták el a 3G- és a 4G LTE-szabványt, ami nem egészen 15 év alatt csaknem hárommilliárd végpontot eredményezett. A friss előrejelzések szerint a kommunikációs eszközök száma 2020-ra meghaladja az 50 milliárdot, a mobil adatforgalom pedig mintegy 197 000 PB (petabájt) lesz. [13]

Az 5G nem a meglévő technológiát kívánja kiváltani, így a 4G LTE-re továbbra is nagy feladat hárul majd. Az eltérő szabványokat egymáshoz kell igazítani. Az Európai Unió tagállamaiban létrehoznának egy Ipar 4.0 platformot, amelyeket európai hálózattá kötnének össze. Az Ipar 4.0 csak akkor kaphat komoly esélyt, ha az ügyfelek bízni fognak az új ajánlatokban és a cégekben, valamint azok adatkezelésében [14].

Az 5G-eszközök várhatóan 2020-ban kerülnek az átlag felhasználásra. A 25–80 GHz-es tartományban hihetetlen sebességek érhetőek el, ámde van egy hatalmas nehézsége ennek a spektrumnak: az eszköznek közvetlenül rá kell látnia az adótoronyra. A tesztek szerint a 28 GHz-en a sugárzás kisebb akadályokon (ablakokon, csapadékon, lombozaton) képes áthaladni, azonban komolyabb akadályokon (falakon) nem. Ezenkívül a tereptárgyakon a sugárzás nem visszaverődik, hanem elnyelődik. Az 5G-s eszközöknél egy gombelem vagy egy kisméretű napelem is elegendő lesz majd, ez pedig új felhasználási módokat, egészen új szenzorokat tesz lehetővé [15].

Az **1. táblázat** a különböző mobiltechnológiák jellemzőit foglalja össze generációk szerint.

Új képesség az alacsony késleltetés, ami nagyon fontos az ipari vagy a járműves felhasználásnál is, esetünkben a vasúti közlekedésben. Ugyanis egy alacsony késleltetésű hálózat esetében látszik az LTE és az 5G közötti különbség. Egy 90 km/h sebességgel haladó szerelvény az LTE tipikus 40 ezredmásodperces késleltetése alatt 1 métert tesz meg, míg az 5G 1 ms-nél is alacsonyabb késleltetése alatt csak 2,5 centimétert. Ez az adat a pontos adatszolgáltatás esetében nem elhanyagolható szempont [15].

A Surreyi Egyetem 5G Innovációs Központja szakembereinek, laboratóriumi körülmények között, sikerült másodperceként egy terabit adatot továbbítani vezeték nélkül [16].

A Samsung Electronics tesztjei során 28 GHz frekvencián 1,056 Gbps sebességgel adatokat két kilométer távolságra sikerült továbbítani, amelyhez 64 antennamodulra volt szükség, ezek segítségével tudta kiküszöbölni a magas frekvenciatartomány miatti jelterjedési veszteségét [17].

1. táblázat. A mobiltechnológia áttekintése [12]

Generáció	Technológia	Átvitel	Letöltési sávszélesség
1G	AMPS	analóg, kapcsolatalapú	–
2G	GSM	digitális, kapcsolatalapú	9,6 kbit/s
2.5G	HSCSD	digitális, kapcsolatalapú	57,6 kbit/s
2.5G	GPRS	digitális, csomagkapcsolt	115 kbit/s
2.75G	EDGE	digitális, csomagkapcsolt	236 kbit/s
3G	UMTS	digitális, csomagkapcsolt	384 kbit/s
3.5G	HSPA	digitális, csomagkapcsolt	14,4 Mbit/s
4G	LTE	digitális, csomagkapcsolt	150 Mbit/s
4G	LTE Advanced (LTE-A)	digitális, csomagkapcsolt	300-tól 600 Mbit/s
4.5G	LTE Advanced Pro (LTE-AP	digitális, csomagkapcsolt	1 Gbit/s
5G	5th generation mobile networks and wireless systems	digitális, csomagkapcsolt	6 GHz alatt - 6 Gbit/s

4.4. A felhőszolgáltatás integrálása

A felhőszolgáltatás előnye, ami a digitalizáció alapját jelenti, hogy a szükséges információkhoz földrajzi kötöttségek nélkül hozzáférhetünk. Ugyan az Ipar 4.0 esetében forradalmi váltásról beszélünk, azonban sok esetben korábban már meglévő, eredményesen működő struktúrák újraszervezéséről van szó, kiegészítve napjaink infokommunikációs megoldásaival és az ahhoz szükséges biztonsági követelményekkel. A mobil eszközök ipari alkalmazása vagy a felhőalapú kommunikáció elterjedése elősegíti azt a folyamatot, melynek eredményeként a hazai cégek is egyre szívesebben alkalmazzák a digitális megoldásokat, így a távkarbantartást is. Különösen abban az esetben, ha ez nem jelent számukra jelentős költségnövekedést [18] [19].

5. Következtetések

Az általunk leírt lehetőségek felhasználásával megépíthető az a rendszer, mely alkalmas lesz a vasúti felépítmény folyamatos monitorozására, segítve ezzel a közlekedés zavartalan és biztonságos üzemelését.

Jelenleg a tervezés szakaszánál tartunk, mely során a lehetőségek, igények és a megvalósíthatóság tanulmányozását végeztük el, ennek alapján egy tesztrendszert fogunk felépíteni, mely alkalmas lesz az eltérések felderítésére.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Wahlster, W.: *Industry 4.0: The Semantic Product Memory as a Basis for Cyber-Physical Production Systems*. 2013.

[2] Bearing Point, *Digitalization in the rail sector*, letöltve: 2016.10.31. http://www.bearingpoint.com/ecomaXL/files/Digitalization-in-the-rail-sector.pdf&download=0

[3] Both T.: *Bemutatkozik a Pályalétesítményi Technológiai Osztály Magyar Államvasutak Zrt.*, Sínek Világa, ISSN 0139-3618, 2012.

[4] Képforrása, letöltve: 2016.10.31. http://m.cdn.blog.hu/ma/mav/image/istvanteleki/IMG_20110717_195313.jpg

[5] MÁV Biztonsági Igazgatóság: *Biztonsági Tájékoztató* 2013. október

[6] Csiszár G., Fábián E.R., Ungár T., Dévényi L.: *Hydrogen permeability with dislocation in low carbon, aluminium-killed, enamel-grade steels*, International Journal Of Materials Research 103:(6) pp. 673-679. 2012.

[7] Enikő-Réka Fábián, Gábor Csiszár, Tamás Ungár: *The Dislocation Density and the Dislocation Character Effect on the Hydrogen Permeability of Low Carbon Enamel-Grade Steel*; Anyagok Világa 9:(2) pp. 1-9. (2011)

[8] Rajnai Zoltán, Fregan Beatrix: *Kritikus infrastruktúrák védelme*, A XXI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka előadásai. [Proceedings of the XXI-th International Scientific Conference of Young Engineers], Kolozsvár, Románia, 2016.03.17-2016.03.18. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-Egyesület (EME), 2016. pp. 349-352. (Műszaki Tudományos Közlemények; 5.)

[9] Gabor Vanderer, Zoltan Rajnai: *Applicability Of Risk-Evaluation Theories In Critical Infrastructures, Trends and Innovations in E-business*, Education and Security: PROCEEDINGS Fourth International Scientific Videoconference of Scientists and PhD. students or candidates., Bratislava Slovakia: Ekonomická Univerzita v Bratislave, 2015. pp. 82-90. http://webkonf.eu/index.php/en/archive/2015(letöltve: 2016.11.20.)

[10] Kis Endre: *Ipar 4.0 – a jövő gyára*, Gyártástrend.hu, 2013. április 14., http://www.gyartastrend.hu/informatika/cikk/ipar_4_0__a_jovo_gyara, (letöltve: 2016.11.20.)

[11] Bosch: *A gépek többsége még nem az Ipar 4.0 része*, 2016.11.09., http://www.techstorym2m.hu/a-gepek-tobbsege-meg-nem-az-ipar-4-0-resze.html, (letöltve: 2016.11.20.)

[12] Stefan Koltes, Kiss Zoltán: *GSM technológia ipari felhasználásra*, 2016.10.27., http://www.techstorym2m.hu/gsm-technologia-ipari-felhasznalasra.html, (letöltve: 2016.11.20.)

[13] Lauri Oksanen, Amitava Ghosh: *A jövő vezetékmentes kommunikációja*, Magyar Elektronika, 2016. május 03., https://www.magyar-elektronika.hu/34-tartalom/tartalom/1553-a-joev-vezetekmentes-kommunikacioja, (letöltve: 2016.11.20.)

[14] *Prioritás az 5G bevezetése Európában*, eGov Hírlevél, 2016. március 20., http://hirlevel.egov.hu/2016/03/20/prioritas-az-5g-bevezetese-europaban/, (letöltve: 2016.11.20.)

[15] Gálffy Csaba: *5G, ahogy Barcelonából látszik*, HWSW, 2016. február 24., http://www.hwsw.hu/hirek/55227/5g-mwc-mobilhalozat-gigabit-cella-ericsson-nokia-huawei.html, (letöltve: 2016.11.20.)

[16] *5G-n száz gigabájt lejön egy másodperc alatt*, Origo, 2015.02.26., http://www.origo.hu/techbazis/20150226-5g-n-szaz-gigabajt-lejon-egy-masodperc-alatt.html, (letöltve: 2016.11.20.)

[17] Peresztegi Gábor: *2020-ra 5G-t ígér a Samsung*, HWSW, 2013. május 13., http://www.hwsw.hu/hirek/50261/samsung-

5g-mobil-adatatvitel.html, (letöltve: 2016.11.20.)

[18] Dalnoki László: *A digitalizáció a karbantartási folyamatokat is megújítja*, 2016.11.20., http://www.techstorym2m.hu/a-digitalizacio-a-karbantartasi-folyamatokat-is-megujitja.html, (letöltve: 2016.11.20.)

[19] Zoltán Rajnai, Edit Ruboczki: *Moving Towards Cloud Security*, Interdisciplinary Description Of Complex Systems 13:(1) pp. 9-14. (2015), http://indecs.eu/2015/indecs2015-pp9-14.pdf, (letöltve: 2016.11.20.)

XVII. Műszaki Tudományos Ülésszak, 2016. Kolozsvár, 163–168. 18
http://hdl.handle.net/10598/30080

RELATÍV VÁGÓMOZGÁSOKKAL GENERÁLT PONTFELHŐK SZŰRÉSI NEHÉZSÉGEI

DIFFICULTIES OF PROCESSING POINTS CLOUD GENERATED BY RELATIVE CUTTING MOVEMENTS

Tolvaly-Roşca Ferenc[1], Forgó Zoltán[2]

[1]*Sapientia EMTE, Műszaki és Humán Tudományok Kar Marosvásárhely, Gépészmérnöki Tanszék, Cím: 540485, Románia, Segegesvári út, 1C, Telefon / Fax: +40 265 206 210/+40 265 206 211, levelezési cím, tferi@ms.sapientia.ro*

[2]*Sapientia EMTE, Műszaki és Humán Tudományok Kar Marosvásárhely, Gépészmérnöki Tanszék, Cím: 540485, Románia, Segegesvári út, 1C, Telefon / Fax: +40 265 206 210/+40 265 206 211, levelezési cím, zforgo@ms.sapientia.ro*

Abstract

The Mixed Gear Modeling Method, developed by the authors, requires manipulation of large Points Clouds, situated in a spatial volume. Regular Points Cloud software's and manipulation techniques deals with points situated on surfaces, points obtained with scanning techniques. Generating points Clouds as in the developed methods cannot be manipulated with this usual techniques, therefore it is necessary to develop new techniques: filtering algorithm. The difficulties to develop a new approach consist in the spatial placement of the points, in the particular shape of the Clouds. As the generated points are partially concave and partially convex the usual software tools are not working properly with this kind of Points Clouds, raising some particular issues. The present paper shows some results from the earlier stage of the development, showing the difficulties raised during the application of different Points Cloud filtering algorithms.

Keywords: *Points Cloud, relative cutting movements, filtering algorithm*

Összefoglalás

A szerzők által kidolgozott vegyes fogaskerék generáló módszer egy térfogatban és nem felületeken elhelyezkedő terjedelmes pontfelhők kezelését igényli. Az ismert pontfelhőkezelő szoftverek és eljárások felületeken található pontokat kezelnek, amelyeket általában 3D szkennelési technikákkal kapunk meg. A relatív generáló mozgásokkal generált pontfelhők esetében nem alkalmazhatók a hagyományos eljárások, ezért egy új szűrőalgoritmust kellett kidolgozni. Az új pontfelhőkezelő eljárásnál nehézséget jelent a pontok térfogatban és nem felületen való elhelyezése és ezeknek sajátságos formája. Mivel az így kapott pontfelhők jellemző alakja konvex és konkáv is egyszerre, az ismert eljárások nem működnek megfelelően, amint első kísérleteink során azonnal meg is tapasztaltunk. A jelen dolgozat e nehézségeket igyekszik szemléltetni, a fejlesztés első szakaszaiban kipróbált szűrőalgoritmusokra épülő eredmények elemzésével.

Kulcsszavak: *pontfelhő, relatív generáló mozgások, szűrőalgoritmus*

1. Bevezető

A forgácsolással gyártott alkatrészek, így a fogaskerekek is szinte kizárólag először számítógépes modellezéssel készülnek el. A számítógépes modellek megfelelő pontosságúak kell legyenek, az előállított fogaskerekek felülete gyorsan, illetve kielégítő pontossággal kell legyen megépítve. Ha CAD környezetben modellezzünk, matematikai egyenletek alapján, akkor a felületeket tetszőleges pontossággal építhetjük meg, azonban lehetetlen az analitikus egyenletekkel nem rendelkező felületek, mint például fogaskerék-fogazatok valós láb- és fejfelületeinek az előállítása. A nem matematikai egyenleteken alapuló felületgenerálási módszerek között ismert az előgyártmányból való folytonos szerszámkivonás, az úgynevezett „merevtest kivonásos módszer”. Ezt viszonylag jól lehet alkalmazni a legkülönbözőbb alkatrészek modellezésre, de igen nagy számítógépteljesítményt igényel.

Egy ehhez hasonló modellezési eljárást javasoltunk [1] „vegyes CAD eljárás” megnevezéssel. A megnevezés a merevtestkivonás módszerének relatív mozgásait és az utólagos CAD modellezési eljárások ötvözését igyekszik lefedni. A módszer előnye, hogy nem igényel matematikai egyenleteket, és jól alkalmazható (a megfelelő pontosság elérése után) ismételt és nagyszámú módosítások szinte azonnali modellezésére.

A javasolt eljárás a fogazat vagy tetszőleges felület generálásának a relatív mozgásait valósítja meg virtuális környezetben egy generálási modell felállításával. Az eljárás során a vágóéleken rögzített pontok koordinátáit a generáló mozgás minden egyes lépésében egy rögzített koordinátarendszerhez képest adunk meg, ezeket tároljuk, majd az így kapott pontfelhőt (Points Cloud) matematikai szűrőkkel dolgozzuk fel.

Megjegyezendő, hogy hasonló cél elérése érdekében más szerzők is publikáltak a vegyes CAD eljárástól eltérő eljárásokat, amelyek a fogfelületek burkolóját igyekeznek meghatározni [2].

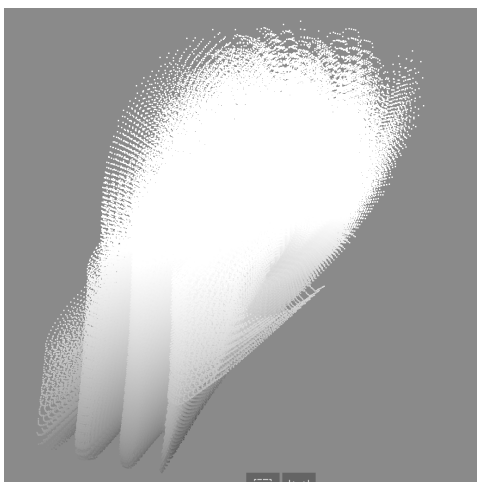
Jelen dolgozat szerzői azonban egy teljes CAD eljárásokon alapuló eljárást igyekeztek kidolgozni. Ennek érdekében a generált pontokra építve, a pontfelhő szűrése után fennmaradt pontokra Bezier Spline felületeket, majd ezekkel merev testmodelleket építünk. Amint bebizonyosodott [3], a kidolgozott módszer igen gyors és rendkívül rugalmas.

2. A generált pontfelhő

Az **1. ábrá**n látható pontfelhők egy konvolut csigamaró segítségével megvalósított ferde fogazat generálásának eredménye. A generálás adatai a következők:

Kerék: z = 25, m = 5mm, x = 0

Csigamaró: z = 9, dm = 77.5mm, γ = 3° 45´ 6”, generálás szöglépése = 5°, generálási szög= 18 °.



1. ábra. *A generált pontfelhő Autodesk ReCap környezetben*

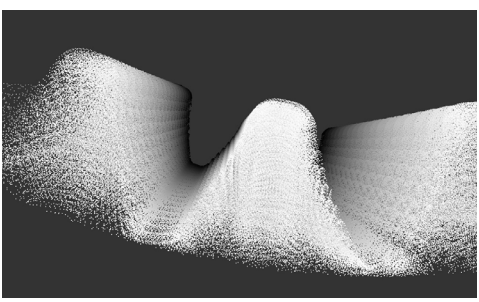
Amint azonnal megfigyelhető, a generált pontok a generálóélen meghatározott pontok halmazát alkotják, a generálás fo-

lyamán felvett szerszám-előgyártmány relatív helyzeteknek megfelelően. Az ábrán látható pontok egy része gyakorlatilag a fogaskerék fogárkaiban találhatók, egy részük a fogak felületén, illetve fennmaradt részük a fogaskeréken kívüli térben. Egyértelműen a pontfelhő azon pontjaira van szükségünk, amelyek a fogaskerék szélességén (magasságán) belül a fogak oldalain vannak. Ezek gyakorlatilag a pontfelhő burkolóján helyezkednek el. Az így kapott pontfelhő sajátos pontfelhő: nem egy felületen vagy felületseregen fekvő pontok halmaza, mint a 3D letapogatással kapott pontfelhők esetén. Ha az utóbbi lenne, nagyon sok alkalmazásban lévő szoftverrel lehetne felületet építeni rájuk, illetve viszonylag egyszerű lenne a testmodell előállítása.

A saját eljárással generált pontok egy térfogatban foglalnak helyet, ismeretlen sűrűségi elosztással, illetve egyértelműen ismeretlen burkolóval. Egy ilyen ponthalmaz fogaskerekek estében, általában vegyes konkáv és konvex burkoló felületekkel rendelkezik. Ezen ponthalmaz kezelése és szűrése egyedi megoldást igényel.

3. Pontfelhő szűrőalgoritmusok

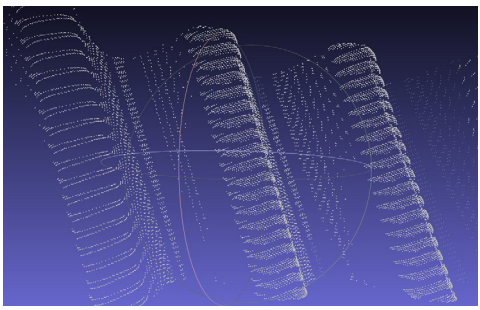
Első megközelítésünk a pontfelhő fogaskerék szélességére való korlátozására irányult. A **2. ábra** a méretekre szűrt pontfelhőt ábrázolja. Ezen már jól azonosítható a feladat bonyolultsága. Jól látható a pontok térbeni elhelyezése és a várható burkolófelületek bonyolultsága.



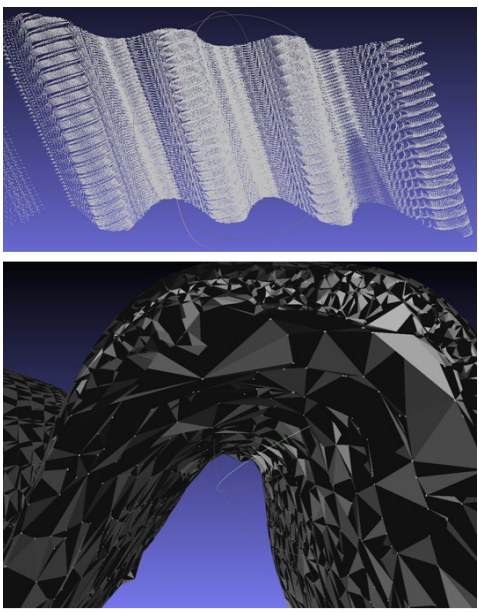
2.ábra. *Pontfelhő tengelyirányú nézetből*

A feladat további lépéseiben a **2. ábrán** látható pontfelhő szűrésére alkalmas kész algoritmust próbáltunk keresni.

Ezek a lépések a Konvex Hull [4, 5] és Qhull (Látható pont algoritmus) [6] algoritmusokhoz vezetett. Habár az első információk síkbeli lehetőségekről számoltak be [4, 5, 6], ezek az algoritmusok Meshlab ingyenes szoftverben is megtalálhatók 3 dimenziós pontfelhők kezelésére is.



3. ábra. *Konvex Hull szűrőalgoritmus eredménye*



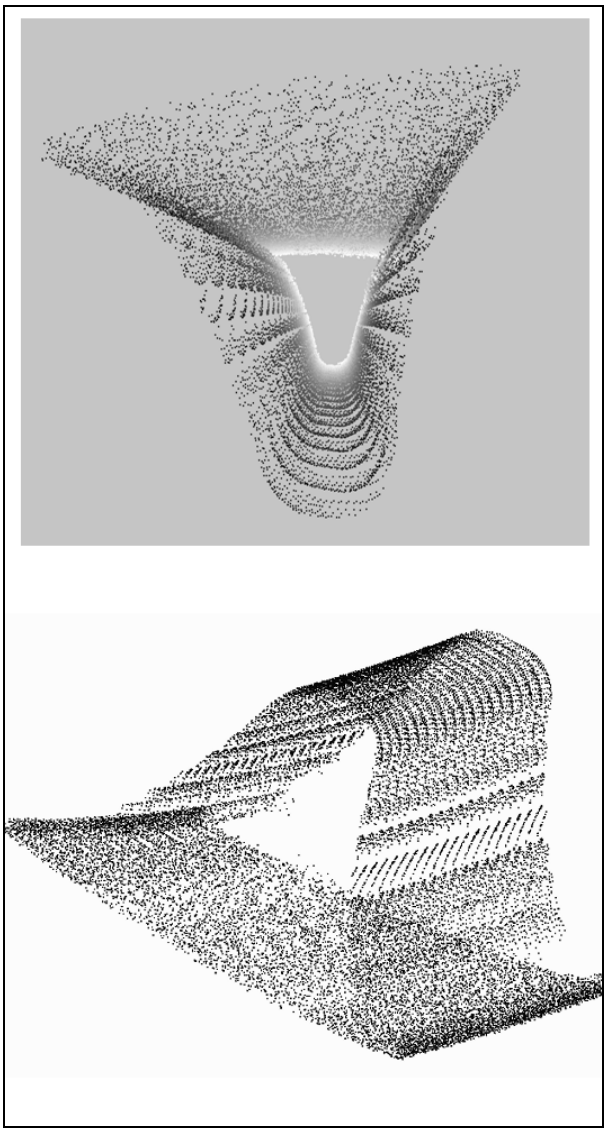
4. ábra. *Qhull szűrőalgoritmus eredménye*

Amint a **3. ábrán** megfigyelhető, a Konvex Hull algoritmus egyértelműen

használhatatlannak bizonyul, mivel a burkoló-felületen található pontok csekély számban maradnak meg.

A **4. ábrá**n a Visible Point szűrőalgoritmus eredménye látható (felül).

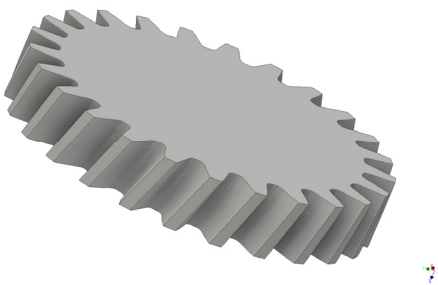
A **4. ábra** alsó képén látható, hogy habár első ránézésre úgy tűnik, a Qhull szűrőalgoritmus helyes eredményt mutatna, a pontok lényegében nagy vastagságban egy térfogatban és nem a burkolófelületen vannak. A szűrő paramétereit változtatva azonnal láthatóvá válik, hogy vékonyítva a ponthalmazt a burkolófelületen található pontok legnagyobb részét megint elveszítjük.



5. ábra. *Saját algoritmussal való szűrt pontok halmaza egy fogárok esetében*

A helyes megoldást az alpha-shape algoritmus [7] eredményezi. Mivel ez az algoritmus síkban működik megfelelően, saját programot írtunk, amely síkmetszetekben alkalmazza az alpha-shape algoritmust. Mivel a saját algoritmus bemutatása nem célunk a jelen dolgozatban, csak alkalmazásának eredményére szorítkozunk, amelyet az **5. ábrá**n szemléltetünk.

Az algoritmus paramétereinek beállításával alapvetően meghatározható a generált pontfelhő szűrési eredménye. Ezek változtatása kizárólag kísérleti úton történt meg. Az algoritmus egyik fő paramétere alapvetően módosítja a burkolófelület meghatározását. A kísérleti úton meghatározott legmegfelelőbb értékek alapján a **6. ábrá**n látható eredményeket kaptuk. Az ábra a szűrt pontokra felépített fogaskerék testmodelljét szemlélteti, felméréseink alapján hasonlító pontossággal az elméleti egyenletekre épülő modellel, illetve a merevtest kivonásos módszerével generált modellhez, sokkal rövidebb generálási idővel.



6. ábra. *A szűrt pontokra felépített testmodell*

Felméréseink alapján a generálási, szűrési és modellfelépítési összidő csupán töredéke a merevtest generálási módszerének, pontossága tetszőlegesen növelhető, és ez nem vonja maga után a generálási idő exponenciális növekedését.

4. További fejlesztési lépések

A kidolgozott eljárás folyamatos fejlesztés alatt áll. A szűrőalgoritmus paramétereinek további tesztelése szükséges, a minimális generálási idő és maximális pontosság elérése érdekében. Ezt csak nagyszámú kísérleti futtatás és minden esetben az elért pontosság értékelése teszi lehetővé. A szűrőalgoritmus egyelőre Matlab környezetben fut, a generálóprogram eredményét egy szöveges állományba mentjük, majd a Matlab programba importáljuk. Ez egy eléggé időigényes és nehézkes eljárás, le kell majd a programot kompilálni és egy *.dll* állomány formájában a generáló környezethez csatolni.

A generálóélek által meghatározott kezdeti ponthalmaz sűrűsége az élgeometria konfigurációja alapján van meghatározva. Az egyenes szakaszokon kevésbé sűrű, illetve az ívelt szakaszokon sűrűbb. Nagyszámú kísérlet eredményeként rájöttünk, hogy ez nem elégséges kritérium: a generálópontok sűrűségének meghatározásánál figyelembe kell venni a vágóéleken található pontok távolságát a szerszám forgástengelyéhez képest. Kisseb távolságra levő élszakaszok esetén kisseb sűrűség is megengedett, a nagyobb távolságra levőknél pedig nagyobb sűrűség szükséges a geometriai alakzatra jellemző pontelosztás mellett.

5. Következtetések

- A létező szakirodalomban nem találtunk olyan algoritmust, amely egyszerűen megoldaná a pontfelhőszűrési feladatot a fogazatoknál jelentkező vegyes konkáv és konvex ponthalmazok esetében.
- Sík ponthalmazok esetében a konvex és konkáv sík ponthalmazok jól kezelhetők alpha-shape algoritmussal [7].
- Az alpha-shape szűrőalgoritmus beépítése a saját fogárokponthalmaz szűrőalgoritmusunkba kiváló eredményeket mutat.
- A kidolgozott pontgeneráló és pontszűrő eljárás sajátságosan fogazatok univerzális és gyors generálására alkalmas.

Köszönetnyilvánítás

A kutatási tevékenységet a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem Kutatási Programok Intézete támogatta a 12/19/2015.04.08. számú szerződés alapján, az Egyetemi Kutatási Program **2015/2016 ** keretén belül.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] Tolvaly-Roșca, F., Forgó, Z.: *Mixed CAD Method to Develop Gear Surfaces Using the Relative Cutting Movements and NURBS Surfaces*, Elsevier, Procedia Technology 19, 2015, pp. 20–27, http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.04

[2] Bendefy, A. G., Horák, P.: *Gear Pair Generation With the Method of Transposed Lines of Action*. DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference, pp. 129–136.

[3] Tolvaly-Roșca, F., Forgó Z.: *Mixed CAD Method to Develop Gear Surfaces Using the Relative Cutting Movements and NURBS Surfaces*. Elsevier, Procedia Technology 19, 2015, pp.20–27, http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.04

[4] Edelsbrunner, H., Kirkpatrick D., David G.; Seidel, R.: *On the shape of a set of points in the plane*. IEEE Transactions on Information Theory 29 (4), 1983, pp. 551–559, doi:10.1109/TIT.1983.1056714

[5] Andrew, A. M. (1979): *Another efficient algorithm for convex hulls in two dimensions*. Information Processing Letters 9 (5), pp. 216–219, doi:10.1016/0020-0190(79)90072-3.

[6] http://www.qhull.org/

[7] Kreveld, M., Lankveld, T., Veltkamp, R.: *On the shape of a set of points and lines in the plane*. Technical Report UU-CS-2011-017 June 2011, Department of Information and Computing Sciences Utrecht University, Utrecht, The Netherlands, 2011, ISSN: 0924-3275, pp.1–24.

SZERZŐK JEGYZÉKE

LIST OF AUTHORS

A, Á

ACHIMAŞ Gheoghe 19
ANDRÁS Endre 115
ANDRÁS József 115

B

BELÉNYI Alpár 19
BITAY Enikő 27, 39, 71
BODNÁR István 51

C, CS

CÎRCU Alexandru-Petru 91
CIUBOTARU Vlad-Costel 91

D

DEZSŐ Gergely 63
DOBRÁNSZKY János 71

E, É, F

FEKETE Albert-Zsombor 79
FORGÓ Zoltán 15, 163

G, GY

GOBESZ Ferdinánd-Zsongor 85

H

HOLCZER Emil 39
HOLLANDA Dénes 137

I, J

ILIEŞ Nicoleta 91
IMECS Mária 103
INCZE János Jób 103

K, L

KACSÓ Irén 39
KISFALUDI-BAK Zsombor 91
KORMOS Fiammetta 39
KOVÁCS József 115
KOVÁCS Tünde 151

M

MÁRIÁS Nimród 125
MÁRTON László 131
MÁTÉ Márton 137

N, O

NAGY Andor-Csongor 91
NYIKES Zoltán 151

P, R

PAPP István 147
PLÁSZTÁN Bence 51
POPA-MÜLLER Izolda 147

S, SZ

SZABÓ Csaba 103
SZIGETI Ferenc 63
SZŐKE Enikő 103
SZÖGI Gábor 371

T

TALPAS János 131
TOKODY Dániel 151
TOLVALY-ROŞCA Ferenc 163

U, V, Z

VERESS Erzsébet 39
ZABÓNÉ VARGA Irén 169