

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XLI. SZEMINÁRIUMA

Géptervezők és Termékfejlesztők XLI. Szemináriuma

Miskolc, 2025. november 13 (csütörtök) – 14 (péntek)

– PROGRAM –

Időpont: 2025.11.13. csütörtök 10:00-12:20 (Plenáris ülés)
Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3., Díszterem (I. em.)
Elnök: Dr. Jálcs Károly

- 10:00 10:05 Dr. Jálcs Károly intézetigazgató egyetemi docens ME-GÉIK Gép- és Terméktervezési Intézet: **MEGNYITÓ**
- 10:10 10:30 Prof. Dr. Orbán Ferenc professor emeritus Pécsi Tudomány Egyetem, Mérnöki és Smart Technológiák Intézete, Gépészmérnöki Tanszék: **Földrengésre való méretezés. A földrengés hatása a tartály méreteire.**
- 10:40 11:00 Dr. Gotthard Viktor egyetemi adjunktus BME, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék: **DFX technikák alkalmazása a géptervezés során**
- 11:10 11:30 Kis-Mihály Csaba Sales Engineer Nord-Lock Group: **Csavar rögzítési megoldások Nord-Lock**
- 11:40 12:00 Keviczki Domicián Projektfelelős Gyémánt-Pirazol Kft.: **Tengerjáró hajókon keletkező szennyvíziszap szárítására szolgáló, modulrendszerű berendezés tervezési sajátosságainak bemutatása**
- 12:00 12:20 Kérdések, kötetlen beszélgetés
- 12:45 13:45 Ebéd és kávészünet a szeminárium regisztrált résztvevőinek

Időpont: 2025.11.13. csütörtök 14:00-18:00 (1. Szakmai szekció)
Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3., Díszterem (I. em.)
Elnök: Dr. Takács Ágnes, Dr. Gotthard Viktor

- 14:00 14:10 Árvai Tamás PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Mechanikai hullámterjedés vizsgálata járműszerkezetekben**
- 14:20 14:30 Dr. Helyei Csaba Szimulációs mérnök ZF Hungaria Kft.: **Korrekciós tényező csapágybepréselés lineáris és nemlineáris statikai szimuláció eredményeinek összehasonlításához**
- 14:40 14:50 Dr. Zwierczyk Péter adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Modern vasúti csúszás- és kipörgésgátló berendezések okozta tönkremeneteli formák a kerék-sín kapcsolatban – áttekintés**
- 15:00 15:10 Zudor Levente PhD hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem: **Amsler duplatárcsás mérőműszer használata vasúti kerék-sín kapcsolat vizsgálatához**
- 15:20 15:30 Döbrentei Sándor PhD hallgató BME, Gépészmérnöki kar, Gép- és Terméktervezés tanszék: **Kritikus sík meghatározásának módszertana**
- 15:40 16:00 Kávészünet
- 16:00 16:10 Dr. Dömötör Csaba egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **A kerék késői felhalálása és a természetes minták hiánya, mint technológiai korlát**
- 16:20 16:30 Albert Judit PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **A matematikai modellezés és energetikai hatékonyság optimalizálás biogázüzemek hatékonyságának növelésében**
- 16:40 16:50 Marada Imre PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Kisméretű műanyag fogaskerek melegegésének mérése**
- 17:00 17:10 Szalánczi Dávid PhD hallgató Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék: **Napelemek viselkedése Különböző szélviszonyok (hűtési hatás) mellett**
- 17:20 17:30 Kriston József Balázs PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **A TDOA módszer hatékonyságának vizsgálata L-alakú acéllemezen**
- 17:40 17:50 Besenyei István PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Alumínium profilok és horonyanyák közötti kompatibilitás vizsgálata**
- 18:00 18:10 Bodnár Dávid PhD hallgató Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet: **Ipari robotkar rendellenes rezgéseinek detektálása gépi tanulással**
- 18:20 18:30 Dobrosi Henrietta BSc hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Az aratás története**

Időpont: 2025.11.13. csütörtök 14:00-18:00 (2. Szakmai szekció)
Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3., Deák terem (I. em.)
Elnök: Dr. Lovas László, Dr. Sarka Ferenc

- 14:00 14:10 Dr. Gönczi David adjunktus Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet: **Emelőfülek végeelemes analizisének néhány kérdése**
- 14:20 14:30 Dr. Gönczi David adjunktus Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet: **Determination of stresses and displacement in orthotropic radially graded disks**

- 14:40 14:50 Katreen Ebrahim PhD student University of Miskolc, Institute Machine and Product Design: **The evolution of lumbar total disc replacement (LTDR): Research trends of device design, biomechanics, and clinical outcomes**
- 15:00 15:10 Alrudhan Alaa PhD student University of Miskolc, Institute Machine and Product Design: **Thermal Performance of Aluminum Porous Metal Foam**
- 15:20 15:30 Karam Shaaya PhD student, Ferenc Sarka associate professor University of Miskolc, Institute Machine and Product Design: **The effect of the nozzle diameter to the accuracy of the FDM printed gears**
- 15:40 16:00 Kávészünet
- 16:00 16:10 Dr. Sarka Ferenc egyetemi docens, Dr. Bolló Betti egyetemi docens, Pedro Baiao hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar: **Próbatest makroszerkezeti módosításainak, hővezetésre gyakorolt hatásának szimulációs és kísérleti vizsgálata**
- 16:20 16:30 Domján János Márk, Péter Máté, Török Olivér, Boronyák Ferenc, Dr. Hány András, Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.: **Az Ipar 5.0 kihívásai és szempontjai a gépészeti tervezés során**
- 16:40 16:50 Dömötör Dávid, Tóth Dániel, Farkas Róbert, Horváth Dániel, Dr. Hány András, Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.: **Hegesztési szimulációk tapasztalatai**
- 17:00 17:10 Kocsis Krisztián István, Boronyák Márton, Szabó Roland, Dr. Hány András, Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.: **Módszertan az élelmiszeripari fóliák vastagsági egyenletességének vizsgálatához**
- 17:20 17:30 Suller Lili PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Nem-newtoni fluidumban ülepedő gömb jelenségének irodalmi áttekintése**
- 17:40 17:50 Venczel Luca BSc hallgató, Sarka Ferenc egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Fából készült hajkiser tervezése**
- 18:00 18:10 Szabó Sándor Imre PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Evolvens származtatása különböző módszerekkel**
- 18:20 18:30 Kasó Ferenc Áron óraadó tanár Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Gőzfejlesztő hőátadó csövek szerkezetintegrációs értékelésének fejlődéstörténete nyomottvízes atomerőművekben**

Időpont: 2024.11.14. péntek 9:00-12:30 (3. Szakmai szekció)
Helyszín: MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3., Díszterem (I. em.)
Elnök: Dr. Piros Attila, Dr. Dömötör Csaba

- 9:00 9:10 Dr. Piros Attila egyetemi docens Neumann János Egyetem GAMF Kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék: **CAD/CAM szakmérnökök posztgraduális oktatása**
- 9:20 9:30 Dr. Taksás Balázs őrnagy egyetemi docens Nemzeti Közszerológiai Egyetem, Pénzügyi és Katonai Közlekedési Tanszék: **A 4. ipari forradalom hatása a hadviselésre és a védelmi innováció új paradigmája**
- 9:40 9:50 Dr. Szirbik Sándor egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet: **Modal analízis szélterhelésnek kitett földi telepítésű napelemes szerkezetre**
- 10:00 10:10 Dr. Trautmann Laura egyetemi adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Erzelemezvezelelt generatív mintázat, mint művészeti alkotás**
- 10:20 10:30 Dr. Szabó Ferenc egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Útközi helyzet optimalizálása**
- 10:40 10:50 Kávészünet
- 11:00 11:10 Borsodi Eszter PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Multidimensional product evaluation**
- 11:20 11:30 Zsibók Marcell PhD hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Additív gyártott polimer próbatestek Pin-On-Disk vizsgálata**
- 11:40 11:50 Németh Géza adjunktus Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Sikbéli és térbéli modellek és kinematikai ábrák a hatékony mérnök képzésben**
- 12:00 12:10 Fodor Péter tervező mérnök, MSc hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Fatüzelelési kandallóalkályha égéslevegő szabályozásának automatizálása**
- 12:20 12:30 Bánya Kristóf BSc hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Ni-B bevonatok előállítási paramétereinek optimalizálása**
- 12:40 12:50 ZÁRSZÓ

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET műszaki, vállalkozási, befektetési,
értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

Elnök:

Vadászné

Dr. Bognár Gabriella

Főszerkesztő:

Dr. Dömötör Csaba

Főszerkesztő-helyettes:

Vesza József

Szerkesztőbizottság:

Dr. Ábrahám György

Dr. Barkóczy István

Dr. Borbás Lajos

Dr. Czifra Árpád

Dr. Danyi József

Dr. Fekete Gusztáv

Dr. Horák Péter

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Jánosi Endre

Dr. Jármay Károly

Dr. Kakuk József

Dr. Kalácska Gábor

Dr. Lelkes Márk

Dr. Kanócz János

Dr. Könözy László

Dr. Mankovits Tamás

Dr. Máté Márton

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Patkó Gyula

Dr. Piros Attila

Dr. Soltész László

Dr. Szabó István

Dr. Szávai Szabolcs

Dr. Száva János

Dr. Szigeti Ferenc

Dr. Tímár Imre

Dr. Weltsch Zoltán

TISZTELT OLVASÓ!

Jelen kiadvány, melyet kezében tart, a Géptervezők és Termékfejlesztők XLI. Szemináriumának szakmai előadásain ismertetett fejlesztő-kutató munkák anyagát foglalja össze írásos formában. A szerzők 40 előadással jelentkeztek a 2025. november 13-14-én rendezett konferenciára. Az előadások túlnyomó része, illetve néhány további publikáció, mindösszesen 32 db szakcikk jelenik itt meg nyomtatott formában. Köszönjük a szerzők és a lektorok munkáját.

Engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy röviden ismertessem a Géptervezők és Termékfejlesztők Országos Szemináriumának történetét. 1972 augusztusában a Gépipari Tudományos Egyesület Tégláson rendezett országos titkári értekezletén 110 vállalat és intézmény 234 delegáltja, többnyire konstrukciós tevékenységet folytató vezető beosztású szakembere foglalkozott az ipari konstrukciós munkával és annak szervezésével. A konstrukció tematikájú összejövetel megrendezését ekkor kezdeményezte prof. Dr. Terplán Zénó, prof. Dr. Magyar József és Dr. Száday Rezső főkonstruktor.

Az első tanácskozást a Miskolci Egyetem Gépelemek Tanszéke munkatársainak részvételével 1973. augusztus 22-24-én rendeztük. A Tanácskozást Dr. Varga Jenő egyetemi tanár, a GANZ gyár főkonstruktor nyitotta meg, kiemelve, hogy ilyen rendezvény hazánkban korábban nem volt. A Vezető Konstruktorok Tanácskozása az 1975. évi rendezvényt követően 1977-ben Géptervezők Országos Szemináriumává alakult.

Hagyományainkhoz híven az idei konferencián több ipari szereplő is képviselteti magát. A bemutatott kutatási-fejlesztési munkákból jól látható, hogy a világ folyamatos változáson megy keresztül. Napjaink kiemelt témái közé tartoznak az additív gyártástechnológiák köré csoportosuló fejlesztések, a környezetvédelem vagy épp a termékfejlesztés és gépépítés modern gyakorlatainak kutatása. Ezzel párhuzamosan az új irányokat támogató hagyományos technológiák folyamatos fejlesztése egyaránt zajlik.

A szeminárium szervezői egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a pályakezdő és fiatal mérnökök, valamint BSc, MSc és PhD hallgatók megszólítására is. Fontos értéknek tartjuk, hogy a szerzők cikkei továbbra is megjelenhetnek hagyományos nyomtatott formában a GÉP folyóirat hasábjain, valamint a gepujsag.hu honlapon is a Gépipari Tudományos Egyesület és a Gazdász Kft. támogatásával. Köszönet érte.

Dr. Dömötör Csaba
a Szeminárium titkára

A szerkesztésért felelős: Dr. Dömötör Csaba • A szerkesztőség címe: 3515 Miskolc, Egyetemváros

Telefon: +36-46/565-111 (12-90) • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: +36-1/202-0656, fax: +36-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

A GÉP folyóirat internetcíme: http://www.gepujsag.hu • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Bárdos Krisztina ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Zrt. • Postacím: 1900 Budapest

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, www.posta.hu WEBSHOP-ban

https://www.posta.hu/ugyfelszolgalat/webform/hirlap, e-mailen a hirlapelofizetes@posta.hu címen, telefonon +36-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldön terjeszti a Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

INDEX: 25 343 • ISSN 0016-8572 (Nyomtatott) • ISSN 3057-9473 (Online)

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Albert Judit, Dr. Takács Ágnes: <i>A matematikai modellezés és energetikai hatékonyság optimalizálás biogázüzemek hatékonyságának növelésében</i>	5	18. Kocsis Krisztián István, Boronyák Márton, Szabó Roland, Dr. Hány András: <i>Módszertan az élelmiszeripari fóliák vastagsági egyenletességének vizsgálatához</i>	76
2. Alrudhan Alaa, Vadászné Dr. Bognár Gabriella: <i>Alumínium porózus közegű fémhab hőteljesítménye</i>	9	19. Kriston J. Balázs, Dr. Jálcs Károly: <i>A TDOA módszer hatékonyságának vizsgálata L-alakú acéllemezen</i>	80
3. Bánya Kristóf, Kovács Sándor, Vadászné Dr. Bognár Gabriella: <i>Ni-B bevonatok előállítás paramétereinek optimalizálása</i>	13	20. Németh Géza: <i>Síkbeli és térbeli modellek és kinematikai ábrák a hatékony mérnök-képzésben</i>	84
4. Benyó Klára: <i>A Z generáció oktatásának pszichológiai háttere</i>	19	21. Dr. Orbán Ferenc, Fenyvesi Sándor: <i>A földrengés hatása a tartály méreteire</i>	88
5. Dr. Bihari János, Marada Imre: <i>A kisméretű műanyag fogaskerekek melegedésének mérése</i>	23	22. Dr. Piros Attila, Dr. Trautmann Laura: <i>CAD/CAM szakmérnökök posztgraduális oktatása</i>	92
6. Döbrentei Sándor, Dr. Zwierczyk Péter Tamás: <i>Kritikus sík meghatározásának módszertana</i>	27	23. Suller Lili, Vadászné Dr. Bognár Gabriella, Dr. Fajtli József: <i>Nem-newtoni fluidumban ülepedő gömb jelenségének irodalmi áttekintése</i>	96
7. Dr. Dömötör Csaba: <i>A kerék késői feltalálása és a természetes minták hiánya, mint technológiai korlát</i>	31	24. Dr. Szabó Ferenc János: <i>Ütközési helyzet optimalizálása</i>	100
8. Dömötör Dávid, Tóth Dániel, Farkas Róbert Dávid, Horváth Dániel, Dr. Hány András: <i>Hegesztési szimulációk tapasztalatai</i>	35	25. Dr. Bihari Zoltán, Szabó Sándor Imre: <i>Evolvens származtatása különböző módszerekkel</i>	104
9. Ebrahim Katreen, Dr. Szabolcs Szávai: <i>Az ágyéki porckorongpótlás (LTDR) fejlődése: az eszköztervezés, a biomechanika és a klinikai eredmények kutatási trendjei</i>	39	26. Szalánczi Dávid, Dr. Bencs Péter: <i>Napelemek viselkedése különböző szélviszonyok (hűtési hatás) mellett</i>	108
10. Fodor Péter, Dr. Bihari Zoltán: <i>Fatüzelésű kandallókályha égéslevegő szabályozásának automatizálása</i>	43	27. Dr. Szirbik Sándor: <i>Modal analízis széltérhelésnek kitett földi telepítésű napelemes szerkezetre</i>	112
11. Dr. Gotthard Viktor: <i>DFX technikák alkalmazása a géptervezés során</i>	47	28. Dr. Markovits Tamás, Dr. Varga Ferenc László, Dr. Szabó Gábor, Fehér Bálint: <i>Kötési szilárdság vizsgálata polimer kompozitok és 3D-nyomatott fém kötőelemek esetén</i>	116
12. Dr. Gönczi Dávid: <i>Radiálisan gradiens ortotrop tárcsák feszültség- és elmozdulásmérőinek számítása</i>	51	29. Zudor Levente Béla, Dr. Zwierczyk Péter Tamás: <i>Amsler duplatárcsás mérőműszer használata vasúti kerék-sín kapcsolat vizsgálatához</i>	120
13. Dr. Gönczi Dávid: <i>Emelőfülek végeelemes analízisének néhány kérdése</i>	55	30. Dr. Zwierczyk Péter Tamás: <i>Modern vasúti csúszás- és kipörgésgátló berendezések okozta tönkremeneteli formák a kerék-sín kapcsolatban - Áttekintés</i>	124
14. Dr. Hettyei Csaba: <i>Korrekciós tényező csapágybepremlés lineáris és nemlineáris statikai szimuláció eredményeinek összehasonlításához</i>	59	31. Zsibók Marcell, Dr. Baka Ernő Zsolt, Dr. Horák Péter: <i>Additívan gyártott polimer próbatestek Pin-On-Disk vizsgálata</i>	128
15. Kapitány Pálma, Dr. Szabó Tamás, Dr. Rónai László: <i>Elektromágnesek modellezéséhez szükséges mérőberendezés fejlesztése</i>	63	32. Dr. Trautmann Laura <i>Érzelmezérelt generatív mintázat, mint művészeti alkotás</i>	132
16. Kasó Ferenc Áron, Dr. Zwierczyk Péter Tamás: <i>Gőzfejlesztő hőátadó csövek szerkezetintegritási értékelésének fejlődéstörténete nyomottvizes atomerőművekben</i>	67		
17. Dr. Kátai László, Nagy István, Dr. Gárdonyi Péter: <i>Boka ízület 3D modellezése</i>	72		

A MATEMATIKAI MODELLEZÉS ÉS ENERGETIKAI HATÉKONYSÁG OPTIMALIZÁLÁS BIOGÁZÜZEMEK HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSÉBEN

Mathematical modeling and energy efficiency optimization in increasing the efficiency of biogas plants

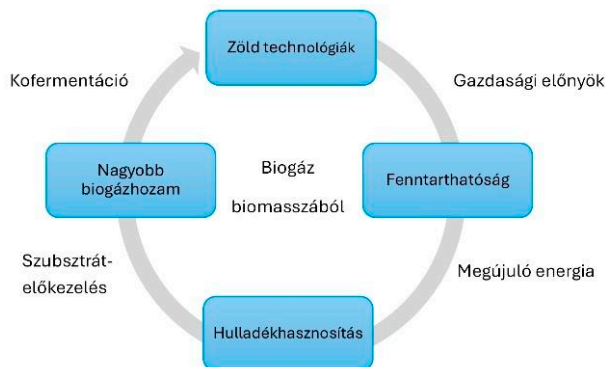
Albert Judit*, Dr. Takács Ágnes*

ABSTRACT

The importance of life-span design and process optimization cannot be overemphasized in the design of pressure vessels, equipment and systems in biogas plants. This is especially true in the early stages of design, where most depends on the expertise and experience of designers and manufacturers. In this paper, we present the most critical design aspects during design and the mathematical models and optimization procedures that support them.

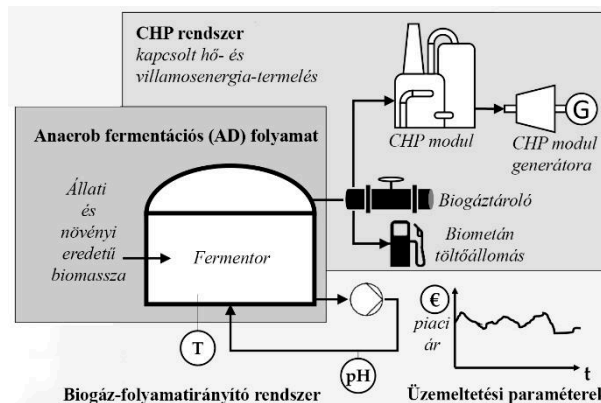
1. BEVEZETÉS

A biogáz egy zöld energiaforrás, amely fokozhatja a fenntarthatóságot a mezőgazdasági és az energiaágazatban. A biogáz-előállítás fenntarthatósági rendszerét illusztrálja az 1. ábra.



1. ábra A biogáz-előállítás fenntarthatósági rendszere

Az 1. táblázat a különböző feldolgozási forrásból származó alapanyagokból keletkező biogázokban az anyagok %-os előfordulását szemlélteti. [1] A 2. táblázat az Európában 2025-ben nyilvántartott biogáz üzemek országokénti darabszámát mutatja, míg a 3. ábra európai szinten tükrözi a biogáz üzemek 2011 és 2024 között végbement gyors elterjedését.



2. ábra A fermentor-CHP-irányítási rendszere [2]

Az energiarendszer-modellezés gyakran fekete doboz-ként tekinti a biogázüzemeket. Alapvetően gáztárolóként és kapcsolt hő- és villamosenergia-termelő egységként (CHP) értelmezi a szakma ezeket az üzemeket. [2] A 2. ábra a biogáz folyamatirányító rendszerét és a fermentor-CHP modul kapcsolatát mutatja be.

2. A MATEMATIKAI MODELLEK

2.1. Elméleti metánhozam (TBMP) modell számítása

Mivel az elméleti metánhozam bármely $C_aH_bO_cN_dS_e$ összetételű szerves anyagra alkalmazható, ezért alkalmas a metán egyenérték számítására is pl. a biogáz üzemekben alkalmazott biomassa esetén. Ebben az esetben a reaktánsok a folyamatba bemenő anyagok (biomassa, víz), a végtermékek pedig a kimenő anyagok (biogáz, digestátum), amint az a 4. ábrán látható. A 4. ábra az anaerob lebontás (AD) folyamatot szemlélteti. [2]

A nalidixsav és a γ -aminovajsav (GABA) maximális metántartalmának kiszámításán Buswell és Mueller dolgozott 1952-ben, majd Boyle az egyenletet módosította 1977-ben [8][9].

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem

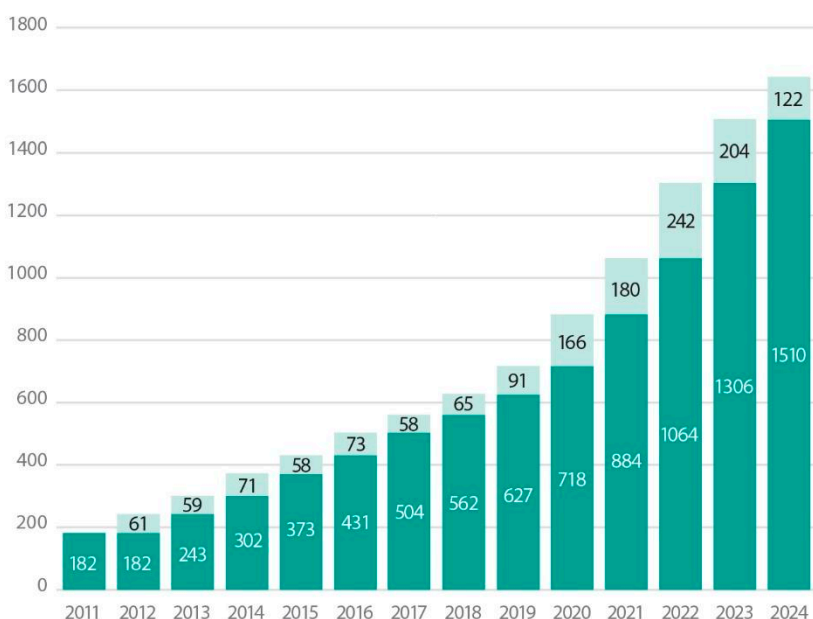
** Egyetemi docens, Miskolci Egyetem

1. táblázat A különböző feldolgozási forrásból származó alapanyagokból keletkező biogázokban az anyagok %-os előfordulása [3]

Gáz típusa	Mezőgazdasági [%]	Szennyvíz [%]	Hulladéklerakó [%]
Metán	49–69	44–67	40–70
Szén-dioxid	29–44	30–44	25–40
Nitrogén	0,6–13	0,1–6	0–17
Oxigén	0,2–3	0,1–3	0–3

2. táblázat A biogáz üzemek száma egyes európai országokban 2024-ben [4]

Ország	Száma	Fő felhasználás
Németország	260	CHP
Franciaország	760	CHP
Olaszország	137	CHP, bioCNG
Hollandia	87	CHP, biometán
Belgium	15	CHP
Magyarország	2	CHP



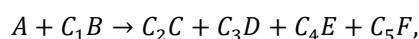
3. ábra Az európai biogáz üzemek száma: sötétzöld - létező üzemek, halványzöld - új üzemek

A nalidixsav és a γ -aminovajsav (GABA) maximális metántartalma az alábbi egyenlettel számítható:

Az (1)-(3) egyenletek tehát a Buswell-Boyle általánosított alakját írják le, amely a szerves vegyületek sztöchiometriai átalakulását jellemzi anaerob környezetben.

$$C_aH_bO_cN_dS_e + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4}\right)CH_4 + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4}\right)CO_2 + dNH_3 + eH_2S \quad (1)$$

vagy egyszerűsített formában:



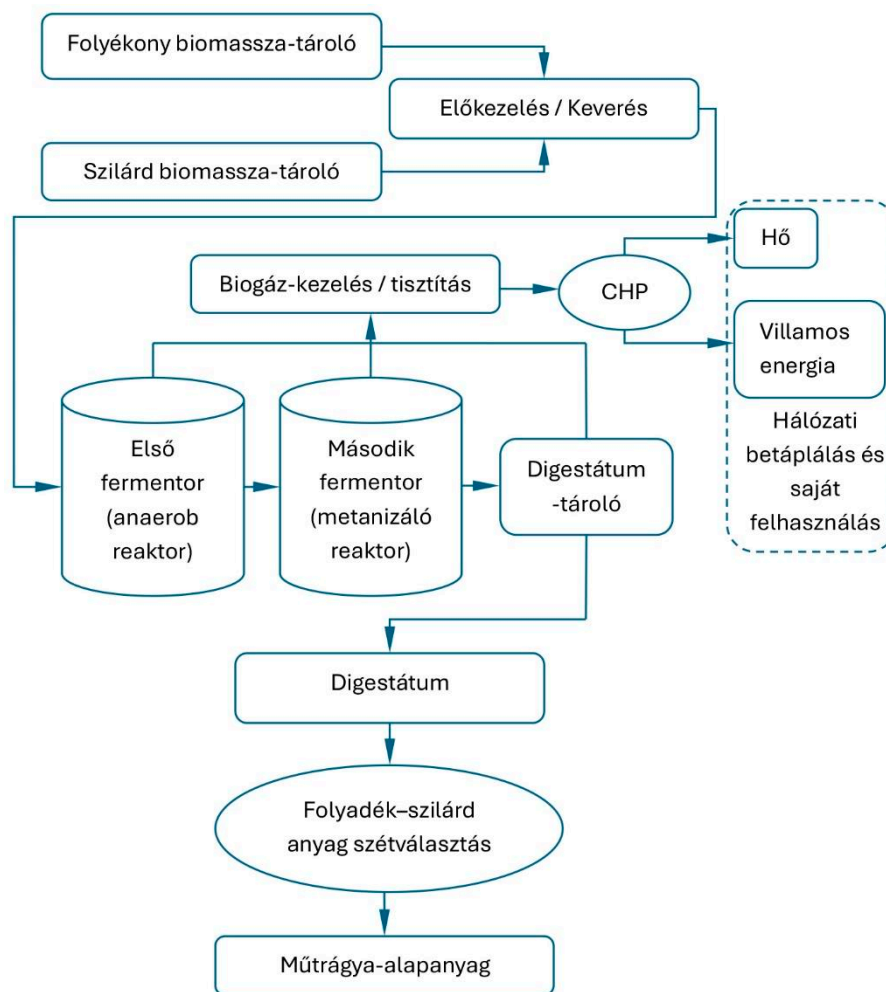
$$\text{reaktánsok: } A = C_aH_bO_cN_dS_e, B = H_2O \quad (2)$$

$$\text{végtermékek: } C = CH_4, D = CO_2, E = NH_3, F = H_2S$$

Az állandó egyenletek a következők:

$$C_1 = a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2}, \quad C_2 = \frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \quad (3)$$

$$C_3 = \frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4}, \quad C_4 = d, \quad C_5 = e$$



4. ábra Az anaerob lebontás (AD) folyamatának általános áttekintése [3]

2.2. Elméleti metánhozam számítása (TBMP) biogázüzemi szubsztrátokra [9] alapján

$$n_{CH_4} = \frac{1}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} - \frac{e}{4} \quad (4)$$

A szénhidrátokkal és fehérjékkel összehasonlítva a lipidek magas metánpotenciállal rendelkeznek. [5]

A biogázüzemekben alkalmazott szubsztrátok közül például a növényi és az élelmiszeripari melléktermékek gyakori kombinációk, mivel a növényi anyagok szénhidrátban gazdagok, illetve az szennyvízipari melléktermékek magas fehérje és zsír tartalommal rendelkeznek, ezáltal kiegyensúlyozott C/N arány biztosítható együttes alkalmazásukkal az anaerob lebontás során.

Az elméleti metánhozam példánkban búzaszalma és szennyvíziszap alkalmazásának lehetőségeit vizsgáltuk, ahol a szerves szárazanyag tartalomra (VS) vonatkozó elemátlalízis-adatokat a [5], [6] és [7] irodalmak alapján vettük figyelembe. A TBMP-t a Buswell-egyenlet alapján [8][9] számítottuk ki, ahol a vegyület képlete $C_aH_bO_cN_dS_e$, és $a = 1$ -re normalizált:

$$TBMP = n_{CH_4} \times 22,414 \text{ [Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}] \quad (5)$$

ahol a szorzó a metán moláris térfogatát jelenti standard körülmények között (STP: 0 °C, 1 atm; 22 400 mL/mol). A szubsztrátok tömegszázalékos összetételét a 3. táblázat, illetve mólarányait 100g-ra a 4. táblázat mutatja be. Az elméleti metánhozam számítások eredményeit az 6. táblázat tartalmazza.

3. táblázat Az alapanyagok tömegszázalékos összetétele

Szubsztrát	C[%]	H[%]	O[%]	N[%]	S[%]
Búzaszalma [5]	44,51	6,02	44,80	0,62	0,16
Szennyvíz iszap [6]	51,9	7,10	36,5	4,00	0,50

4. táblázat Az alapanyagok tömegszázalékos összetétele

Szubsztrát	n_C	n_H	n_O	n_N	n_S
Búzaszalma	3,70	6,02	2,80	0,044	0,005
Szennyvíz iszap	4,325,	7,10	2,281	0,286	0,0156

5. táblázat A búzaszalma és a szennyvíziszap normalizált eredményei ($a=1$)

Szubsztrát	b	c	d	e
Búzaszalma	1,623	0,755	0,0119	0,001
Szennyvíz iszap	1,641	0,527	0,0662	0,003

6. táblázat A szubsztrátok elméleti metánhozama

Szubsztrát	TBMP [Nm ³ CH ₄ /kg VS]
Búzaszalma [9]	0,442
Szennyvíziszap [10]	0,529
50 %-50 % VS-keverék	0,485

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A matematikai modellek alkalmazása lehetővé teszi már a tervezési fázisban a mérnökök számára a rendszerszintű optimalizációt [10][11][12][13], akár biogáz erőmű esetén is. Az energiatermelési potenciál meghatározását segítő módszert mutattunk be, amely támogatja a biogáz-üzemek energetikai és környezeti optimalizálását. Segítségével a biogáz termelés potenciálja fizikai mérések nélkül is becsülhetővé válik, kizárólag az anyagok elemanalízisen alapulva.

4. SUMMARY

The application of the mathematical model makes it possible to determine the energy production potential already in the design phase of the biogas power plant, thus supporting the energetic and environmental optimization of biogas plants. With its help, the biogas production potential can be estimated without physical measurements, based solely on the elemental analysis of the materials.

6. IRODALOM

- [1] KASINATH A., FUDALA-KSIAZEK S., SZOPINSKA M., BYLINSKI H., ARTICHOWICZ W., REMISZEWSKA-SKWAREK A., LUCZKIEWICZ A.: *Biomass in biogas production: Pretreatment and codigestion*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 150, 2021, pp. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111509>
- [2] HEIKER M.; KRAUME M.; MERTINS A.; WAWER, T.; ROSENBERGER, S.: *Biogas Plants in Renewable Energy Systems—A Systematic Review of Modeling Approaches of Biogas Production*, Appl. Sci., 2021, Vol. 11, No. 3361, pp. 1-27, <https://doi.org/10.3390/app110833>
- [3] CINAR S.; CINAR S. O.; WIECZOREK N.; SOHOO I.; KUCHTA K.: *Integration of Artificial*

Intelligence into Biogas Plant Operation, Processes, Vol. 9, No. 85, 2021, pp. 1-18,

<https://doi.org/10.3390/pr9010085>

- [4] SNOWDEN-SWAN L., ZHU Y., JONES S., ELLIOTT D., SCHMIDT A., HALLEN R., BILLING J., HART T., FOX S., MAUPIN G.: *Hydrothermal Liquefaction and Upgrading of Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge: A Preliminary Techno-Economic Analysis*, Pacific Northwest National Laboratory, Technical Report, 2016, PNNL-25464, pp. 1-33
- [5] ACHINAS S., EUVERINK G. J. W.: *Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste*, Resource-Efficient Technologies, Vol. 2, No. 3, 2016, pp. 143-147, <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.08.001>
- [6] CHOU Y., SU J.-J.: *Biogas Production by Anaerobic Co-Digestion of Dairy Wastewater with the Crude Glycerol from Slaughterhouse Sludge Cake Transesterification*, Animals, Vol. 9., No. 618, pp. 1-17., <https://doi.org/10.3390/ani9090618>
- [7] AYOUB M., ABDULLAH A. Z.: *Critical review on the current scenario and significance of crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 5., pp. 2671-2686, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.054>
- [8] BUSWELL A. M., MUELLER H. F.: *Mechanism of Methane Fermentation*, Ind. Eng. Chem., Vol. 44, No. 3, 1952, pp. 550-552, <https://doi.org/10.1021/ie50507a033>
- [9] BOYLE W., WILLIAM C.: *Energy Recovery from Sanitary Landfills - A Review*, Proceedings of a Seminar Sponsored by the UN Institute for Training and Research (UNITAR) and the Ministry for Research and Technology of the Federal Republic of Germany, Göttingen, 1977, pp. 119-138
- [10] ALZYOD H., FICZERE P.: *Material-Dependent Effect of Common Printing Parameters on Residual Stress and Warpage Deformation in 3D Printing: A Comprehensive Finite Element Analysis*, Study. Polymers, Vol. 15, No. 13., 2023, pp. 1-20, <https://doi.org/10.3390/polym15132893>
- [11] KAKUK J.: *Elektromos szegélynyíró gép zajvizsgálata*, Multidiszciplináris Tudományok: a Miskolci Egyetem közleménye, Vol. 9, No. 4., 2019, pp. 383-386, <https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.37>
- [12] SZABÓ F. J., JÁLICS K.: *Optimum Substitution of Complicated Profiles*, International Review of Mechanical Engineering, Vol. 18., No. 12., 2025, pp. 646-652, <https://doi.org/10.15866/ireme.v18i12.25751>
- [13] DÖMÖTÖR Cs.: *Természetes környezettudatosság*, GÉP 66: No. 5-6, 2015, pp. 35-38

ALUMÍNIUM PORÓZUS KÖZEGŰ FÉM HAB HŐTELJESÍTMÉNYE

THERMAL PERFORMANCE OF ALUMINIUM POROUS MEDIA METAL FOAM

Alaa Alrudhan*, Gabriella Vadászné Dr. Bognár *

ABSTRACT

A numerical study optimized the thermal performance of an aluminium tube filled with porous media metal foam. The investigation analyzed four aluminium metal foam models, including those with and partially filled metal foam and multi-layered metal foam of different porosities. The multi-layer porosities, which represent a dual permeability setup, specifically. The porosity of metal foam varies from 0.9 to 0.92, and the pore density (PPI) varies from 10 to 30 PPI. The Darcy-Extend Forchheimer model was used for flow dynamics within the porous region. The local thermal non-equilibrium model was applied within the porous-filled region of the pipe to analyze heat transfer characteristics. The results showed that the thermal performance of a fully filled porous metal foam structure is superior to that of a partially filled structure. As well as multi-layer porosities of aluminium metal foam exhibited greater thermal efficiency than single layers.

1. INTRODUCTION

The irregular and spatially varying flow geometry within porous media significantly complicates the transport of heat and fluid. This variety often leads researchers to shift focus from the complicated local behaviors to the macroscopic ability of the medium to facilitate energy and fluid transport[1]. Metal foams have garnered significant research interest over the past few decades due to their exceptional heat transfer capabilities[2]. This has led to their broad integration into various thermal systems, such as compact heat exchangers, advanced electronic cooling devices, geothermal applications, air-cooled condensers, combustion chambers, and metal casting solidification processes. Open-cell metal foams possess a unique, complex structure characterized by a random network of irregularly interconnected pores[3]. This architecture yields a high specific surface area and promotes intense flow disturbances, making them exceptionally appealing for improving thermal performance in relevant systems. A numerical study was conducted to investigate convection heat transfer in a porous media-filled heat exchanger[5-7]. Results indicated that the mean Nusselt number (Nu) increases

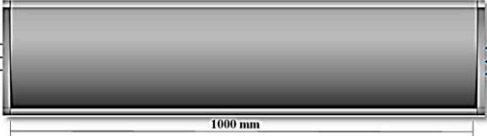
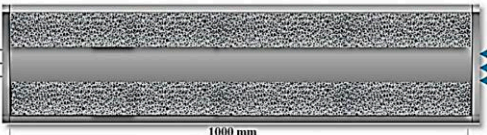
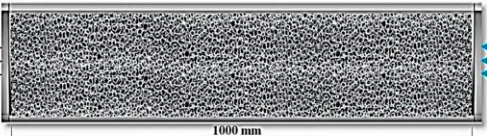
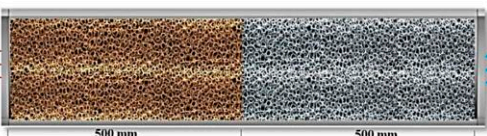
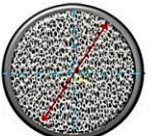
with the Reynolds number[8]. A numerical investigation was conducted to examine the effect of spatially varied porosity in aluminium metal foams filling a vertical pipe. Several experimental, analytical, and numerical studies have been conducted to investigate the hydrodynamic and thermal characteristics of porous media within horizontal and vertical channels. The results showed that the pressure drop was slightly lower for the spatially varied porous media compared to the uniform porosity metal foam[9-10]. Studied partially filled high porosity metallic foams in a horizontal direction pipe and the effect of heat transfer and pressure drop, the results showed thermal performance factor for a variety of PPI and porosity. This study numerically investigates the thermal performance of fully filled versus partially filled porous metal foam in a tube. The primary aim is to compare these configurations and examine the impact of multi-layered structures with varying porosities arranged in series.

2. NUMERICAL SOLUTION

The tube is filled with metal foam porous media, with a length of 1000 mm, an inner diameter (D_{in}) of 100 mm, and an outer diameter of 107 mm. The partial porous structure has with inside diameter ($D_p = 40$ mm). The uniform heat flux of 275 W/m^2 is applied over the wall of the porous media section. The inlet and outlet of the non-porous pipe section were adiabatic wall boundary conditions, 1000mm length for each one to ensure a fully developed turbulent flow rate at inlet and to prevent the back effects at the outlet as shown in Fig. 1. By using ANSYS FLUENT 25, the porous metal foam region and the clear fluid region are modeled as two distinct cell zones. The interfaces between these zones serve as coupling boundaries, enabling interaction between the porous and fluid domains. When employing the Local Thermal Non-Equilibrium model, the solid and fluid phases are treated separately. Within the porous region, the thermal and physical properties of the metallic foam are specified according to the framework to accurately capture the heat transfer behavior between the solid matrix and the fluid phase. Configurations of the models considered are shown in Table 1. To ensure

* Institute of Machine and Product Design, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, University of Miskolc, 3515-Egyetemváros, Miskolc, Hungary

Table 1: Configurations of the models considered.

Case (Model)	Model		Permeability (K) $\times 10^{-7} \text{ (m}^2\text{)}$	Configuration of porous	
	Porosity%	PPI		Longitudinal	Cross section
Non-porous (N-P)	-		-		
Partial porosity (M1)	90	10	2.4		
Single layer (M2)	90	10	2.4		
Two layers (M3)	90 + 92	10 + 30	0.36		

physical consistency at the interface between a porous medium and a clear fluid region, continuity of velocity,

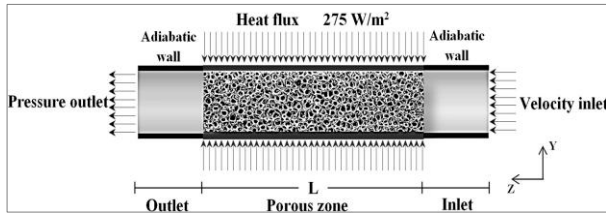


Figure 1: Geometry of the computational domain.

shear stress and heat flux must be maintained for both heat and fluid flow, as shown in Table 2.

Table 2 : Coupling conditions at the porous interface.

Property	Condition
Fluid velocity	$u _{Interface^+} = u _{Interface^-}$
Shear stress	$\frac{k_f}{\varepsilon} \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} \Big _{Interface^+} = k_f \frac{\partial \langle u \rangle}{\partial x} \Big _{Interface^-}$
Fluid temperature	$T_s _{Interface^+} = T_f _{Interface^-}$
Heat flux q_w	$(k_{fe} \frac{\partial \langle T \rangle^f}{\partial x} + k_{se} \frac{\partial \langle T \rangle^s}{\partial x}) \Big _{Interface^+} = k_f \frac{\partial T^f}{\partial x} \Big _{Interface^-} = k_s \frac{\partial T^f}{\partial x} \Big _{Interface^+} = h_{sf} (T_s - T_f) \Big _{Interface^-}$

3. GRID INDEPENDENCE

A grid independence study is conducted to determine the optimal mesh resolution for the proposed numerical model. The equation of grid convergence analysis is also used to measure how close a numerical solution is to the exact solution as the computational grid is refined, see Eq.1 and Table 3.

$$\text{Percentage Deviation} = \frac{|T_{Max2} - T_{Max1}|}{T_{Max1}} 100\% \quad (1)$$

Table 3: Mesh density and corresponding maximum temperature

Number of grid N (elements)	Maximum temperature (°C)
152,388	43.11
334,212	42.99
510,772	42.94
783,544	42.933
945,720	42.922
1,121,670	42.922 Baseline data

4. VERIFICATION

To verify the present approach, the predicted temperature distribution of the porous media tube is compared with the numerical study reported by Prakash H. Jadhav et. al. [13]. An aluminium metal foam of 10 PPI and porosity 92% studied. The temperature distribution at the outlet cross-section is compared for three cases: a fully porous pipe, a partially porous [11] pipe and a non-porous pipe. The inlet diameter was 0.1 m and air velocity 0.6639 m/s with heat flux 275 W/m² for all cases. The simulation results for the fully porous configuration demonstrate enhanced uniform temperature as compared with partially porous [11], while the non-porous pipe exhibits a steep thermal gradient due to limited heat transfer, as illustrated in Fig. 2

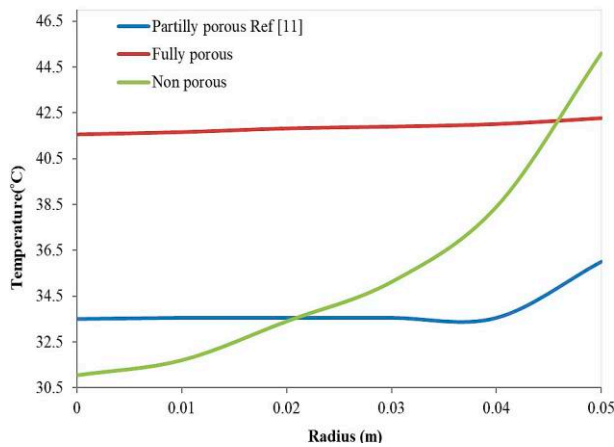


Figure 2: Verification of temperature distribution through the exit area of porous section.

5. RESULTS

The temperature contours of spatial thermal behavior within a porous media metal foam-filled tube, which is shown at Fig. 3. In a non-porous pipe contour refers to classic thermal boundary layer development. A thin layer of higher temperature fluid is confined to the wall, while the center core of flow remains at a low temperature. In contrast, the porous media models having a much more uniform temperature distribution across the pipe cross-section. Model 1 of PPI 10 and porosity 90%, due to the effectiveness of heat transfer, a medium degree of temperature appears because the partial porous media metal foam structure and the center fluid flow will decrease the temperature as compared with the porous region. Model 2 with constant pore density and porosity presents and single layer of metal foam fully filling a tube with a slightly more uniform and overall higher temperature profile at exit. Model 3 of double layers of metal foam shows the clear transition. The first section low pore density and high porosity, has a low temperature profile. At the interface, the air enters the higher PPI region, where enhanced surface area and increased flow mixing lead to more effective heat transfer and more rapid temperature enhancement.

6. CONCLUSION

Three-dimensional numerical simulations were conducted to investigate the impact of dual permeability porous media metal foam fully filling a horizontal pipe (0.1 m in diameter, 1 m in length, and 0.07m thickness). the key findings are summarized below:

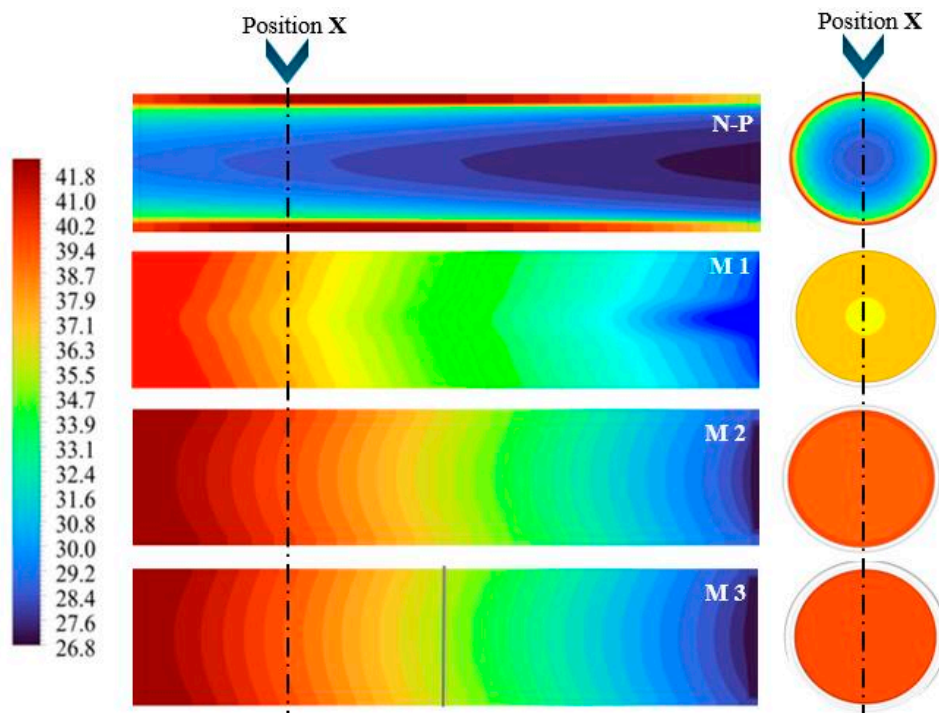


Figure 3: Comparison of temperature contours for porous and clear pipe models at an air velocity 0.66 m/s.

- The inclusion of fully filled porous media inside the pipe results in a higher and more uniform temperature distribution compared to a partially filled configuration.
- The uniformity enhances thermal performance by maintaining the temperature within a consistent range.
- The comparison between pipes with and without porous media highlights a significant improvement in heat transfer efficiency when porous media is present. Specifically, the temperature reduction in the pipe without porous media was about 45%, demonstrating the superior heat transfer capabilities of the porous-filled pipe.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the support and resources provided by the Institute of Machine and Product Design. Special thanks to the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, University of Miskolc.

NOMENCLATURE

PPI	Pores per inch
$LTNE$	Local thermal non-equilibrium model
K	Permeability (m^2)
T_s	Temperature of solid (K)
T_f	Temperature of fluid (K)
k_s	Thermal conductivity of solid (W/m.K)
k_f	Thermal conductivity of fluid (W/m.K)
ε	Porosity
h_{sf}	Interfacial heat transfer coefficient (W/m ² .K)
u ,	Air velocity in direction of X (m/s)
v	Air velocity in direction of Y (m/s)
w	Air velocity in direction of Z (m/s)
D_{in}	Inner diameter of pipe (m)
D_p	partial diameter of pipe (m)
Nu	Nusselt number
q_w	Heat flux (W/m ²)
N	Number of grid
eff	Effective

REFERENCES

- [1] Miao, L., Wang, Y., Kavtaradze, R., Liu, S., Zhang, S. *Experimental and numerical analyses of thermal-hydraulic characteristics of aluminium flying-wing fins*, Applied Thermal Engineering, 203 (2022), 117928.
- [2] Wang, C.-C., Chen, K.-Y., Liaw, J.-S., Tseng, C.-Y. *An experimental study of the airside performance of fin-and-tube heat exchangers having plain, louver, and semi dimple vortex generator configuration*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 80 (2015), 281–287.
- [3] Okbaz, A., Pınarbaşı, A., Olcay, A.B. *Experimental investigation of effect of different tube row-numbers, fin pitches and operating conditions on thermal and hydraulic performances of louvered and wavy finned heat exchangers*, International Journal of Thermal Sciences, 151 (2020), 106256.
- [4] Andreozzi, A., Bianco, N., Iasiello, M., Naso, V. *Natural convection in a vertical channel with open-cell foams*, Journal of Physics: Conference Series, 1599 (2020), 012013.
- [5] Milani Shirvan, K., et al. *Heat transfer and sensitivity analysis in a double pipe heat exchanger filled with porous medium*, International Journal of Thermal Sciences, 121 (2017), 124–137.
- [6] Kiran Kumar, K., et al. *Effect of spatial porosity of metal foams on heat transfer filled in a vertical channel*, Materials Today: Proceedings, 51 (2022), 1539–1547.
- [7] Xu, Z.G., Gong, Q. *Numerical investigation on forced convection of tubes partially filled with composite metal foams under local thermal non-equilibrium condition*, International Journal of Thermal Sciences, 133 (2018), 1–12.
- [8] Jadhav, P.H., Nagarajan, G., Perumal, D.A. *Conjugate heat transfer study comprising the effect of thermal conductivity and irreversibility in a pipe filled with metallic foams*, Heat and Mass Transfer, 56 (2020), 1985–1997.
- [9] Duan, X., Pei, J., Chen, X., Wang, Y., Ding, C. *Enhanced heat transfer in sandwich heat transfer unit with metal foam: A numerical investigation*, Applied Thermal Engineering, 256 (2024), 124144.
- [10] Kotresha, B., Gnanasekaran, N. *Investigation of mixed convection heat transfer through metal foams partially filled in a vertical channel by using computational fluid dynamics*, Journal of Heat Transfer, 140 (2018), 072601.
- [11] Jadhav, P.H., et al. *Performance evaluation of partially filled high porosity metal foam configurations in a pipe*, Applied Thermal Engineering, 194 (2021), 117081.
- [12] Huang, Z.F., Nakayama, A., Yang, K., Yang, C., Liu, W. *Enhancing heat transfer in the core flow by using porous medium insert in a tube*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53 (2010), 1164–1174.

NI-B BEVONATOK ELŐÁLLÍTÁSI PARAMÉTEREINEK OPTIMALIZÁLÁSA

EXPERIMENTAL OPTIMIZATION OF NI-B COATING PARAMETERS

Bányai Kristóf*, Kovács Sándor**, Vadászné Dr. Bognár Gabriella***

ABSTRACT

This study investigates the optimization of deposition and heat treatment parameters for electroless Ni-B coatings with the aim of improving their tribological performance. Using the Taguchi method combined with analysis of variance, the impact of bath temperature, deposition time, and heat treatment temperature on friction coefficient, microhardness, wear volume loss, and wear depth were analysed. Results reveal that heat treatment temperature has the most significant influence, followed by bath temperature and deposition time, with none of the factors being negligible. The developed methodological approach demonstrates the potential of structured statistical design to determine optimal process parameters for high-performance Ni-B coatings.

1. BEVEZETÉS

Az elektrolit nélküli bevonattechnológiák az elmúlt években egyre nagyobb jelentőségre tettek szert, mivel az elektrolízis alkalmazása nélkül előállított bevonatok mind szélesebb körben kerülnek alkalmazásra különböző ipari szektorokban. Ez a növekvő érdeklődés hangsúlyozza a Ni-P és Ni-B bevonatok tribológiai vizsgálatának fontosságát, amelyet korábbi kutatási projektünkben [1] végeztünk el. E munkában bemutattuk és jellemeztük a vizsgált mintákat, valamint részletesen ismertettük a mikrokeménység-vizsgálatok, a kopási tesztek és a pásztázó elektronmikroszkópos elemzések eredményeit. A vizsgálatok célja a Ni-P és Ni-B bevonatok alapvető tribológiai paramétereinek meghatározása volt, beleértve a súrlódási együtthatót, a kopási térfogatvesztést és a kopási tényezőt. Az eredmények rámutattak, hogy a Ni-P-I bevonat rendelkezett a legkedvezőbb tribológiai tulajdonságokkal, mivel a legmagasabb átlagos Vickers-mikrokeménységet kombinálta a legalacsonyabb mért kopási térfogattal és a súrlódási munkához viszonyított legkisebb kopási rátával. Egyértelműen igazolást nyert, hogy az elektrolit nélküli nikkelalapú bevonatok tribológiai viselkedését jelentős mértékben befolyásolják a kémiai fürdő paramétere. E

megfigyelés további kutatásokat indokol az optimális fürdőösszetétel és hőkezelési feltételek meghatározása érdekében, amelyek a tribológiai teljesítmény maximalizálását szolgálják.

Li és munkatársai kutatásukban a leválasztási paraméterek optimalizálására összpontosítottak a keménység és a kopásállóság növelése céljából, igazolva a módszer hatékonyságát a felületi tulajdonságok javításában [2]. Niksefat és Mahboubi eredményei szerint a felületkezelés számottevően javította a grafén-oxiddal erősített nikkel-bór alapú kompozit bevonatok mechanikai és tribológiai jellemzőit [3]. Reddah és munkatársai a Taguchi-módszer alkalmazásával optimalizálták a nikkel-alumínium-oxid kompozit bevonatok elektrodepozíciós folyamatát [4]. Megállapításaik rávilágítottak a folyamatparaméterek szerkezetre és keménységre gyakorolt hatására, amelyek jelentős teljesítménynövekedést eredményeztek. Mei és munkatársai a GCr15 acélon alkalmazott nikkel-bór-molibdén (Ni-B-Mo) elektrolit nélküli bevonat optimalizálására fókuszáltak [5]. Vizsgálataik kimutatták, hogy a sókoncentráció és a leválasztási idő befolyásolja a leválasztási sebességet és a keménységet, melynek célja a kopásállóság fokozása volt. Chintada és munkatársai átfogó irodalmi áttekintést nyújtottak az elektrolit nélküli nikkelalapú bevonatokról, kiemelve a különböző folyamatparaméterek hatását a bevonat tulajdonságaira [6]. Tanulmányuk különös hangsúlyt helyezett a Ni-P és Ni-B kompozitokra, alátámasztva azok potenciálját a keménység, a kopásállóság és a korrózióállóság javításában. Reddy Paturi és munkatársai az ideghálózatok alkalmazási lehetőségeit vizsgálták a felületbevonati folyamatok modellezésében és optimalizálásában, beleértve a nikkelalapú rendszereket is [7]. Hangsúlyozták a gépi tanulás jelentőségét a bonyolult folyamat-tulajdonság összefüggések feltárásában, amely hozzájárul a bevonattechnológiák továbbfejlesztéséhez. Az idézett források összességében igazolják a strukturált, statisztikailag megalapozott optimalizálási módszerek tudományos relevanciáját, a Ni-B bevonatok megértésének és teljesítményének fejlesztése érdekében.

* gépészmérnöki alapszakos hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

** kutatómérnök, Bay Zoltán Alkalmazotti Kutatási Nonprofit Kft.

*** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

A munka tudományos újdonsága a Ni–B bevonatokhoz alkalmazott fürdő- és hőkezelési paraméterek optimalizálására kidolgozott módszertani megközelítésben rejlik. Míg a korábbi kutatások az elektrolit nélküli bevonatok kísérleti jellemzésére összpontosítottak, jelen tanulmány Taguchi-módszert és varianciaanalízist (ANOVA) alkalmaz a folyamatparaméterek tribológiai tulajdonságokra gyakorolt főhatásainak és kölcsönhatásainak értékelésére.

A kutatási célkitűzés megvalósítását támogatandó, a 2. fejezet áttekinti a Ni–P és Ni–B bevonatok jellemzőit befolyásoló fő fürdőparamétereket, továbbá bemutatjuk a hőkezelés várható hatásait a vonatkozó szakirodalom alapján. A 3. fejezet a Taguchi-módszert alkalmazza a kísérletterv összeállítására. A 4. fejezetben az ANOVA-eredmények azt mutatják, hogy a vizsgált tényezők egyike sem hanyagolható el, ami lehetővé teszi a három tényező optimális kísérleti beállításainak meghatározását.

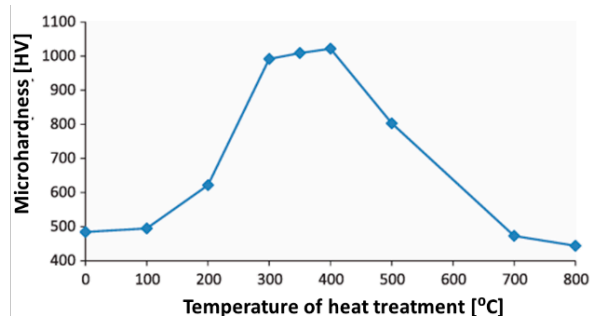
2. A NI–P ÉS NI–B BEVONATOK TULAJDONSÁGAIK BEFOLYÁSOLÓ FÜRDŐPARAMÉTEREK

A szakirodalomban számos tanulmány számol be a bört és foszfort tartalmazó elektrolit nélküli bevonatok tulajdonságairól. A Ni–P és Ni–B bevonatok leválasztását számos tényező befolyásolhatja, ideértve a fürdő összetételét, a pH-értéket és a hőmérsékletet, amelyek mind jelentős hatást gyakorolnak a bevonatok fizikai és mechanikai tulajdonságaira [8]. A stabilizátorok (például a tiokarbamid [9], az ólom-acetát [10] vagy a maleinsav [11]) alkalmazása meghosszabbíthatja a fürdő élettartamát, továbbá befolyásolhatja a leválasztási sebességet és a felületi morfológiát is [12]. A felületaktív anyagok szintén javíthatják a leválasztási feltételeket, növelhetik a leválasztási sebességet, csökkenthetik a bevonat porozitását és fokozhatják a korrózióállóságot [13].

E paraméterek közül a fürdő pH-ja kiemelten fontos, mivel nemcsak a kialakuló mikroszerkezetre van hatással (savas közegben amorf, lúgos közegben kristályos bevonatok képződnek), hanem a bevonat keménységét is befolyásolja [14].

Czagány és munkatársai [15] az egyik legátfogóbb elemzést nyújtják, amely a foszfortartalmú bevonatok tulajdonságait vizsgálja a széles körben alkalmazott W302 melegalakító szerszámacélon. Vizsgálatuk során 6,73–22,2 tömeg% foszfortartalmú bevonatokat választottak le. Az eredmények egyértelműen kimutatták, hogy a bevonatok tulajdonságai jelentős mértékben függenek a foszfortartalomtól. A Ni–B bevonatok esetében a mérési paramétereket hasonló módon tárgyalja Henry [16].

A szakirodalmi adatok szerint a bevonatok tulajdonságait az utólagos hőkezelés is befolyásolhatja. A 300–400 °C hőmérséklet-tartományban végzett hőkezelés növelheti a keménységet az amorf Ni–P ötvözet kristályos nikkellé és kemény nikkell-foszfid fázissá történő átalakulása révén. Amint az 1. ábra mutatja, ez a szerkezeti átalakulás a bevonat keménységét fokozza, ugyanakkor a korrózióállóság csökkenéséhez vezet [17].



1. ábra A hőkezelési hőmérséklet hatása a nikkell–foszfor bevonatok keménységére [18].

A fentiek alapján megállapítható, hogy a fürdőkhöz, a leválasztási folyamathoz és az azt követő hőkezeléshez kapcsolódó számos tulajdonság és paraméter befolyásolhatja a kialakuló Ni–B bevonatok tribológiai viselkedését. Ezek közül célszerű azokra a paraméterekre összpontosítani, amelyek a szakirodalom szerint jelentős hatással vannak a bevonatok tulajdonságaira, és amelyek költséghatékony módon szabályozhatók a különböző típusú bevonatok előállítása érdekében.

Ennek megfelelően az 1. táblázat a bevonatleválasztáshoz alkalmazott rögzített fürdőparamétereket mutatja be, míg a 2. táblázat azokat a paramétereket foglalja össze, amelyek költséghatékonyan változtathatók annak érdekében, hogy lúgos fürdő alkalmazásával eltérő tulajdonságú Ni–B bevonatok legyenek előállíthatók.

1. táblázat Rögzített fürdőparaméterek Ni–B bevonat leválasztásához lúgos fürdőben.

Fürdőparaméterek	Ni–B
NiCl ₂ [g/l]	20
C ₂ H ₈ N ₂ [g/l]	90
NaOH [g/l]	90
NaBH ₄ [g/l]	1.2
Tiokarbamid [g/l]	0,001
pH	>12

2. táblázat Változtatható fürdő- és hőkezelési paraméterek Ni-B bevonat előállításához.

Paraméter	Érték		
Fürdő hőmérséklete [°C]	60	72.5	85
Leválasztási idő [min]	60	80	100
Hőkezelési hőmérséklet [°C]	-	250	350

3. A TAGUCHI-MÓDSZER ALKALMAZÁSA A KÍSÉRLETEK SZÁMÁNAK CSÖKKENTÉSÉRE

A Taguchi-módszert a hagyományos faktoriális kísérletterv fejlesztésére dolgozták ki, amely jelentősen csökkenti a szükséges kísérletek számát. Ortogonális mátrixai lehetővé teszik összetett problémák egyszerűsített vizsgálatát. Ezek a mátrixok előre

definiált kísérletterveket tartalmaznak, amelyek időt és költséget takarítanak meg. A Taguchi-módszer tárgyalásakor fontos tisztázni két alapvető fogalmat: a tényezőt és a szintet. A tényező olyan változó vagy elem, amelyet a kísérlet során vizsgálunk, és amely befolyásolhatja a kimenetet, míg a szint az adott tényező felvehető értékeit jelenti. Például a vízsugaras felületmegmunkálás során a víznyomás tényezőnek tekinthető, a szintek pedig a vizsgált konkrét nyomásértékek [22].

Három tényező és három szint esetén az $L9(3^3)$ ortogonális mátrix alkalmazása indokolt. A bevonatkészítési folyamatparaméterek elemzésére szolgáló $L9(3^3)$ ortogonális mátrix [25] szerkezetét a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat Az $L9(3^3)$ ortogonális mátrix a bevonatkészítési folyamatparaméterek vizsgálatához.

Kísérleti beállítás	Faktor			Súrlódási tényező [-]
	Fürdő hőmérséklete [°C]	Leválasztási idő [min]	Hőkezelési hőmérséklet [°C]	
1	60	60	-	0,53
2	60	80	250	0,53
3	60	100	350	0,57
4	72,5	60	250	0,52
5	72,5	80	350	0,57
6	72,5	100	-	0,51
7	85	60	350	0,56
8	85	80	-	0,51
9	85	100	250	0,48

4. VARIANCIAANALÍZIS ALKALMAZÁSA A FÜRDŐ- ÉS HŐKEZELÉSI PARAMÉTEREK OPTIMALIZÁLÁSÁRA

A módszer a teljes varianciát komponensekre bontja, és azt vizsgálja, hogy a csoportok közötti variancia szignifikánsan nagyobb-e, mint a csoportokon belüli variancia. A varianciaanalízis különösen hasznos olyan kutatásokban, ahol több független változó hatásait kell egyidejűleg elemezni [24].

Az ANOVA-módszer első lépéseként minden tényező alsó, alap- és felső szintjére vonatkozóan kiszámítjuk a kísérleti eredmények összegét az alábbi egyenletek felhasználásával:

$$F_{i,1} = \sum_{k=1}^{k_{max,i,1}} y_{i,1,k}, F_{i,2} = \sum_{k=1}^{k_{max,i,2}} y_{i,2,k}, \quad (1)$$

$$F_{i,3} = \sum_{k=1}^{k_{max,i,3}} y_{i,3,k}, \quad (2)$$

ahol $F_{i,1}$ az i . faktor alsó szintje, $F_{i,2}$ az i . faktor alapszintje, $F_{i,3}$ az i . faktor felső szintje, $y_{i,1,k}$ az i . faktor alsó szintjén végzett kísérlet k . eredménye, $k_{max,i,1}$ az i . tényező alsó szintjén elvégzett különböző kísérletek száma, $y_{i,2,k}$ az i . faktor alapszintjén végzett kísérlet k . eredménye, $k_{max,i,2}$ az i . tényező alapszintjén

elvégzett különböző kísérletek száma, $y_{i,3,k}$ az i . faktor felső szintjén végzett kísérlet k . eredménye, and $k_{max,i,3}$ az i . tényező felső szintjén elvégzett különböző kísérletek száma.

Ezt követően az egyes tényezők átlagos eredményei az adott szinteken a következőképpen határozhatók meg:

$$\bar{F}_{i,1} = \frac{F_{i,1}}{k_{max,i,1}}, \bar{F}_{i,2} = \frac{F_{i,2}}{k_{max,i,2}}, \quad (3)$$

$$\bar{F}_{i,3} = \frac{F_{i,3}}{k_{max,i,3}}, \quad (4)$$

ahol $\bar{F}_{i,1}$ az alsó szinten mért értékek átlaga, $\bar{F}_{i,2}$ az alapszinten mért értékek átlaga, and $\bar{F}_{i,3}$ a felső szinten mért értékek átlaga. Ezt követően az egyes tényezők kísérleti eredményekre gyakorolt hatását az abszolút különbség alapján értékeljük: $|\bar{F}_{i,1} - \bar{F}_{i,3}|$. Amint a 4. táblázat mutatja, a hőkezelési hőmérséklet gyakorolja a legnagyobb hatást a mért súrlódási együtthatóra, mivel $|\bar{F}_{3,1} - \bar{F}_{3,3}| > |\bar{F}_{2,1} - \bar{F}_{2,3}| > |\bar{F}_{1,1} - \bar{F}_{1,3}|$.

Ezt követően meghatározható az egyes tényezők négyzetösszege, majd kiszámítható a hibakomponens négyzetösszege is. Meghatározhatók az egyes tényezők szabadságfokai, valamint kiszámíthatók a hiba

szabadságfokai. Ezek birtokában meghatározhatók a tényezők varianciaértékei, továbbá a hiba varianciája is kiszámítható (lásd 5. táblázat). Ezt követően a tényezők varianciarányadosai meghatározhatók az egyes tényezők és a hiba varianciaértékei alapján.

Kiszámítható a tényezők tiszta négyzetösszege, valamint meghatározhatók a tényezők százalékos hozzájárulásai. A számítások eredményeit a 6. táblázat foglalja össze.

4. táblázat Az egyes tényezők kísérleti eredményekre gyakorolt hatásának elemzése.

Statisztikai tulajdonság		Faktor		
Megnevezés	Jelölés	t_f [°C]	T_l [min]	t_h [°C]
A kísérleti eredmények összege (a tényezők alsó szintjein)	$F_{i,1}$	1,630	1,610	1,550
A kísérleti eredmények összege (a tényezők alapszintjein)	$F_{i,2}$	1,600	1,610	1,530
A kísérleti eredmények összege (a tényezők felső szintjein)	$F_{i,3}$	1,550	1,560	1,700
A kísérleti eredmények átlaga (a tényezők alsó szintjein)	$\bar{F}_{i,1}$	0,543	0,537	0,517
A kísérleti eredmények átlaga (a tényezők alapszintjein)	$\bar{F}_{i,2}$	0,533	0,537	0,510
A kísérleti eredmények átlaga (a tényezők felső szintjein)	$\bar{F}_{i,3}$	0,517	0,520	0,567
Az alsó és felső szinten végzett kísérletek átlaga közötti különbség	$ \bar{F}_{i,1} - \bar{F}_{i,3} $	0,027	0,017	0,050

5. táblázat A tényezők és a hiba négyzetösszegei, szabadságfokai és varianciaértékei.

Statisztikai tulajdonság		Faktor			Hiba
Megnevezés	Jelölés	t_f [°C]	T_l [min]	t_h [°C]	
Az egyes tényezők és a hiba négyzetösszege	S_i, S_e	0,001	0,001	0,006	0,000
Az egyes tényezők és a hiba szabadságfokai	f_i, f_e	2,000	2,000	2,000	2,000
Az egyes tényezők és a hiba varianciaértékei	V_i, V_e	0,001	0,000	0,003	0,000

6. táblázat A varianciarányadosok számított értékei, a tényezők tiszta négyzetösszegei és százalékos hozzájárulásai.

Statisztikai tulajdonság		Faktor		
Megnevezés	Jelölés	t_f [°C]	T_l [min]	t_h [°C]
Az egyes tényezők varianciarányadosa	VA_i	12,25	6,25	64,75
Az egyes tényezők tiszta négyzetösszege	S'_i	0,001	0,000	0,006
Az egyes tényezők százalékos hozzájárulása	P_i	13,35%	6,23%	75,67%

A 6. táblázatból látható, hogy a súrlódási tényező szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 75,67%-ban, a fürdő hőmérséklete 13,35%-ban, míg a leválasztási idő 6,23%-ban befolyásolta a súrlódási együttható értékét. Mivel egyik tényező hatása sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a súrlódási együtthatóra a „minél kisebb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 85$ °C, leválasztási idő $T_l = 100$ min, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 350$ °C. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 0,541$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 0,026$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma [0,515; 0,567].

Az eddigi gondolatmenethez hasonlóan elvégezhető más tribológiai jellemzők esetében is az optimális bevonatelőállítási paraméterek optimalizálása.

A mikrokeményiség szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 61,5%-ban, a fürdő hőmérséklete 11,57%-ban, míg a leválasztási idő 19,91%-ban befolyásolta a mikrokeményiség értékét. Mivel egyik tényező hatása

sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a súrlódási együtthatóra a „minél nagyobb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 60$ °C, leválasztási idő $T_l = 60$ min, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 350$ °C. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 704,82$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 147,83$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma [556,98; 852,65].

A kopási térfogatveszteség szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 49,5%-ban, a fürdő hőmérséklete 18,66%-ban, míg a leválasztási idő 22,09%-ban befolyásolta a mikrokeményiség értékét. Mivel egyik tényező hatása sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a kopási térfogatveszteségre a „minél kisebb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 60$ °C, leválasztási idő $T_l = 80$ min, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 250$ °C. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti

eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 4,56 \cdot 10^7 \mu\text{m}^3$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 1,26 \cdot 10^7 \mu\text{m}^3$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma $[3,29 \cdot 10^7; 5,83 \cdot 10^7]$.

A súrlódási tényező, a mikrokeménység és a kopási térfogatvesztesség szempontjából végzett optimalizálás során a legjobb mért érték kívül esett a konfidenciaintervallumon, aminek több magyarázata is lehet:

- Az ANOVA nem egy-egy konkrét mért értéket „jósol”, hanem a faktorok hatását becsüli meg a teljes adatstruktúrára támaszkodva.
- Az optimális érték, amit az ANOVA-ból kaptunk, modell-alapú átlagolt becslés, tehát az összes kísérleti adat trendjét tükrözi.
- A konfidencia intervallum azt mutatja meg, hogy a valódi átlag milyen tartományban lehet (adott valószínűséggel, pl. 95%). Ez nem jelenti azt, hogy egyedi mérések ne eshetnek ezen kívülre. Egy-egy mérés kisebb (vagy nagyobb) lehet, mint a becült optimum, hiszen minden mérés tartalmaz szórást/zajt.
- Az ANOVA-optimumban szereplő feltételek átlagosan biztosítanak jó (kisebb) súrlódást, de egy mérés soha nem az „átlagot” adja vissza.

A kopásmélység szempontjából a hőkezelési hőmérséklet 59,4%-ban, a fürdő hőmérséklete 7,83%-ban, míg a leválasztási idő 21,96%-ban befolyásolta a kopásmélység értékét. Mivel egyik tényező hatása sem hanyagolható el, és figyelembe véve, hogy a kopásmélységre a „minél kisebb, annál jobb” elv érvényes, az optimális kísérleti beállítások a következők: fürdőhőmérséklet $t_f = 72,5^\circ\text{C}$, leválasztási idő $T_l = 80 \text{ min}$, valamint hőkezelési hőmérséklet $t_h = 250^\circ\text{C}$. Az optimálisan kiválasztott kísérleti beállításokhoz tartozó kísérleti eredmény várható értéke meghatározásra került: $y_{opt} = 12,841 \mu\text{m}$, továbbá kiszámításra került a várható érték konfidencia-intervalluma is: $KI = \pm 4,387 \mu\text{m}$. A becült optimális érték konfidencia-intervalluma $[8,453; 17,228]$, amely tartalmazza a legjobb mért értéket, ami $y_{min} = 9,548 \mu\text{m}$.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja az volt, hogy meghatározza azokat a fürdő- és hőkezelési paramétereket, amelyekkel a Ni-B bevonatok kopásállósága és keménysége javítható. A vizsgálatokhoz a szerzők a Taguchi-módszert és varianciaanalízist alkalmazták. Elemezték a fürdő hőmérsékletének, a leválasztási időnek és a hőkezelésnek a hatását. Az eredmények rámutattak, hogy különösen a hőkezelési hőmérséklet döntő szerepet játszik, de a többi tényező sem hagyható figyelmen kívül. A módszer gyakorlati útmutatót ad a

bevonatok előállítási körülményeinek optimalizálásához.

6. SUMMARY

The research focused on identifying the deposition and heat treatment parameters that enhance the hardness and wear resistance of electroless Ni-B coatings. The Taguchi method and analysis of variance (ANOVA) were applied to study the influence of bath temperature, deposition time, and heat treatment conditions. The findings show that heat treatment temperature plays a decisive role, while the other factors also contribute significantly to coating performance. This approach provides practical guidance for optimizing process parameters in the production of durable Ni-B coatings.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.



8. IRODALOM

- [1] BÁNYAI K., CZAGÁNY M., KOVÁCS S., BOGNÁR G.: *Characterisation of tribological properties and morphologies of Ni-P and Ni-B coatings*, Lubricants, Vol. 13, 2025, p.168. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040168>
- [2] LI Y., LIU Z., LI Y., LIN J.: *Optimization of Deposition Parameters for Ni-P-WC-BN(H) Composite Coatings via Orthogonal Experimentation and Wear Behavior of the Optimized Coating*, Metals, Vol. 15, 2025, p. 714. <https://doi.org/10.3390/met15070714>
- [3] NIKSEFAT V., MAHBOUBI F.: The Effect of Plasma Nitriding Time on the Tribological and Mechanical Properties of Electroless Nickel-Boron-Reduced Graphene Oxide (Ni-B-rGO) Nano-Composite Coatings. Trans. Indian Inst. Met., Vol. 77, 2024, pp. 2845–2855. <https://doi.org/10.1007/s12666-024-03262-7>
- [4] REDDAH I., GHELANI L., TOUATI S., LEKMINE F., HVIZDOŠ P., DEVESA, S., BOUMEDIRI H.: *Experimental Investigation and Optimization of the Electrodeposition Parameters of Ni-Al₂O₃ Composite Coating Using the Taguchi Method*, Coatings, Vol. 15, 2025, p. 482. <https://doi.org/10.3390/coatings15040482>

- [5] MEI S., ZOU X., HU Z., YANG J., ZHENG Q., HUANG W., GURYEV A., LYGDENOV B.: *Optimization of Ni-B-Mo Electroless Coating on GCr15 Steel: Effects of Main Salt Concentration and Deposition Time* Materials, Vol. 18, 2025, p. 1981. <https://doi.org/10.3390/ma18091981>
- [6] CHINTADA V.B., KOONA R., BAHUBALENDRUNI M.V.A.R.: *State of Art Review on Nickel-Based Electroless Coatings and Materials* J. Bio Tribo-Corros., Vol. 7, 2021, p. 134. <https://doi.org/10.1007/s40735-021-00568-7>
- [7] REDDY PATURI U.M., CHERUKU S., GEEREDDY S.R.: *Process Modeling and Parameter Optimization of Surface Coatings Using Artificial Neural Networks (ANNs): State-of-the-Art Review* Mater. Today Proc., Vol. 38, 2021, pp. 2764–2774. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.695>
- [8] SUDAGAR J., LIAN J., SHA W.: *Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – A critical review*, J. Alloys Compd., Vol. 571, 2013, pp. 183–204. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.107>
- [9] HE Y.D., FU H.F., LI X.G., GAO W.: *Microstructure and properties of mechanical attrition enhanced electroless Ni–P plating on magnesium alloy*, Scr. Mater., Vol. 58, No. 6, 2008, pp. 504–507. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.10.051>
- [10] BALARAJU J.N., SELVI V.E., RAJAM K.S.: *Electrochemical behavior of low phosphorus electroless Ni–P–Si₃N₄ composite coatings*. Mater. Chem. Phys., Vol. 120, No. 2-3, 2010, pp. 546–551. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2009.11.047>
- [11] CHEONG W.J., LUAN B.L., SHOESMITH D.W.: *The effects of stabilizers on the bath stability of electroless Ni deposition and the deposit*, Appl. Surf. Sci., Vol. 229, No. 1-2, 2004, pp. 282–300. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.02.003>
- [12] ELANSEZHIAN R., RAMAMOORTHY B., NAIR P.K.: *Effect of surfactants on the mechanical properties of electroless (Ni–P) coating*, Surf. Coat. Technol., Vol. 203, No. 5-7, 2008, pp. 709–712. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.021>
- [13] CHEN B.-H., HONG L., MA Y., KO T.-M.: *Effects of surfactants in an electroless nickel-plating bath on the properties of Ni–P alloy deposits*, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 41, No. 11, 2002, pp. 2668–2678. <https://doi.org/10.1021/ie0105831>
- [14] CHANG S.-H., CHANG C.-C., LIANG C.: *Electroless Ni–P plating and heat treatments on S45C carbon steel*, IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., Vol. 46, 2013, p. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/46/1/012003>
- [15] CZAGÁNY M., BAUMLI P., KAPTAY GY.: *The influence of the phosphorous content and heat treatment on the nano-micro-structure, thickness and micro-hardness of electroless Ni–P coatings on steel*, Appl. Surf. Sci., Vol. 423 2017, pp. 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.168>
- [16] HENRY J.R.: *Electroless (autocatalytic) plating*, Met. Finish., Vol. 105, No. 10, 2007, pp. 350–360. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(07\)80353-9](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(07)80353-9)
- [17] GUO Z., KEONG K.G., SHA W.: *Crystallisation and phase transformation behaviour of electroless nickel phosphorus platings during continuous heating*, J. Alloys Compd., vol. 358c, No.1-2, 2003, pp. 112–119. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(03\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00069-0)
- [18] HIGGS C.E.: *The effect of heat treatment on the structure and hardness of an electrolessly deposited nickel-phosphorus alloy*, Electrodeposition Surf. Treat., Vol. 2, No.4, 1974, pp. 315–326. [https://doi.org/10.1016/0300-9416\(74\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0300-9416(74)90007-8)
- [19] MONTGOMERY D.C.: *Design and Analysis of Experiments*, Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2019.
- [20] ANTONY, J. *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Elsevier, 2023.
- [21] HERZOG M.H., FRANCIS G., CLARKE A.: *Understanding Statistics and Experimental Design: How to not lie with Statistics*, Springer Nature, 2019.
- [22] JING X., YANG Q., ZU'AN W., YUANSHEEN Q., QINGFENG X.: *Application of the Taguchi method to areal roughness-based surface topography control by waterjet treatments*, Appl. Surf. Sci. Adv., Vol. 19, 2024, pp. 100548. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100548>
- [23] SOBIH M., ELSEDDIG Z., ALMAZY K., YOUSSEF A., SALLAM M.: *Optimization of EBW Parameters for 2219 AL-alloy Using Grey Relation Method*, Adv. Mater. Res., Vol. 591-593, 2012, pp. 507–514. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.591-593.507>
- [24] MUKERJEE R., JEFF WU, C.F.: *A Modern Theory of Factorial Design*, Springer Series in Statistics. 2006.
- [25] Orthogonal Arrays (Taguchi Designs). Available online: <https://www.york.ac.uk/depts/maths/tables/orthogonal.htm> (accessed on 2 January 2025).

A Z GENERÁCIÓ OKTATÁSÁNAK PSZICHOLÓGIAI HÁTTERE

THE PSYCHOLOGICAL BACKGROUND OF THE EDUCATION OF GENERATION Z

Benyó Klára*

ABSTRACT

Throughout history, the development of humanity has been accompanied by the training of the next generation and the transmission of existing knowledge. This process has been going on for thousands of years, although there are few written methodological records. It was only from the 18th century, during the Age of Enlightenment, that thinkers working in the field of education appeared who wrote down their views based on their experience. Since then, countless educational methodologies have been born, recreating the previous procedures. One or another technique has proven to be functional for a relatively long time, enriching the existing forms with useful new methods.

However, today, our incredibly fast-changing world, the development of technology, information technology, and the advancement of AI have greatly changed the thinking and attitude of our children towards learning. Teachers must respond to this and be up-to-date in order to reach the stimulus threshold of students living in a quasi "virtual world". The article aims to paint a picture of the current situation based on the experience of practicing teachers, presenting the problems and suggesting options for solutions.

1. BEVEZETÉS

Minden társadalomban fontos szerepet töltött be az oktatás. Ez a tanítási-tanulási folyamat egyre nagyobb változáson megy keresztül, hiszen különböző generációk foglalják el helyüket különböző iskolákban.

„A generáció olyan személyek csoportja, akik azon a történelmi időn és téren osztoznak, mely kollektív személyiséget biztosít nekik.” (McCrindle-Wolfinger, 2010).

Az oktatás a társadalmi változások tükörképe. Minden nemzedék a saját tapasztalatait és elvárásait igyekszik az iskolarendszerbe menekíteni, ezeket ott kiegészíteni, fejleszteni. Az alábbi táblázatban helyet kapott a Z generáció, mint vizsgálatomnak célcsoportja.

1. táblázat: Generációk

(A Year-by-Year Guide to the Different Generations)

The Greatest Generation (GI Generation)	Born 1901–1927
The Silent Generation	Born 1928–1945
Baby Boom Generation	Born 1946–1964
Generation X	Born 1965–1980
Millennial Generation or Generation Y	Born 1981–1996
Generation Z or iGen	Born 1997–2010
Generation Alpha	Born 2010–2024
Generation Beta	Born 2025–2039

2. GENERÁCIÓS VÁLTSÁGKÉP

Századunkban nagy kihívást jelent ennek a Z generációnak az oktató-nevelő munkája, hiszen az ő virtuális világukkal kell versenyeznie a valós térben dolgozó oktatóknak. Ennek a generációnak minden tagja korszerű információs eszközök tulajdonosa, ugyanazokat az INTERNETes oldalakat böngészik, általában teljesen hasonló filmek és zenék kötik le a figyelmüket. Sokkal több időt töltenek az iskolában, mint szüleik. Ők már annak az un. digitális korszaknak a fiataljai, akiknek természetes az online tér, az okostelefon. Közösségüket a média világában építik. Nincs türelmük az információ megszerzéséhez, azonnal akarnak mindent. Mindent tudni, mindent csinálni. Könnyen elérnek minden információt, folyamatos és korlátlan hozzáférésük van a digitalizálódott világ szegmenseihez. Sajnos a tanulási szokások ennek megfelelően a technológia által válnak meghatározóvá, a természetes gondolkodás háttérbe szorul. A kisiskolások figyelmét eddig sem lehetett hosszabb távon fenntartani, sajnos ez ma már a középiskolás korosztályra is jellemző. Alulmotiváltak, nincs jövőképük, így pedig igazi kihívás megtalálni azokat a módszereket, melyekkel el tudjuk vezetni őket a való világba, a munka világába, elindítani őket a társadalomba való beilleszkedés útján, felkészíteni őket a kiszámíthatatlan jövőre. Az internet megjelenése egy olyan környezetet teremtett, amelyben a gyors

* mesteroktató, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

információszerzés rövid ideig tartó figyelemmel, összpontosítással párosul. Gyors visszajelzést várnak el minden téren, emiatt akár súlyos önértékelési probléma is fellép.

3. PEDAGÓGIAI ASPEKTUS

Pedagógiai oldalról nézve ezt a tendenciát, meg kell állapítanunk, hogy a Z generáció oktatásának pszichológiája a teljes neveléstudományt állítja nehéz helyzet elé. Olyan módszertani kérdésekkel kell szembenézni, melyek bizonyos szemléletváltást is igényelnek.

A korábbi pedagógiai módszerek nem, vagy csak kevésbé hatásosak. Azokat az információkat tudják csak feldolgozni a fiatalok, amelyekben párhuzamosan érkezik a vizuális és verbális információ. Fontosnak érzem, hogy a verbális tanulás során kialakuljon a tanulóknál az u.n. interverbális asszociációs kapcsolatrendszer. Ezt képzettársításnak nevezzük. Ilyenkor a térben és időben többször egyszerre észlelt tárgyak asszociálódnak. Az oktatás során mind az elméleti, mind a gyakorlati képzésben nagy szerepe van az asszociációs kapcsolatoknak.

Az oktatás vezetői megkövetelik az oktatást végzőktől a hatékony tanulási technikák kialakítását a tanítási-tanulási folyamat során.

„A tanároknak meg kell tanulniuk hogyan kell tanítani!” [1]

A Z generációt egyértelműen a technikai fejlettséghez való gyors kötődés jellemzi. Az előző generációk tagjai is természetesen kihasználták a lehetőségeket munkájuk megkönnyítésére. Sajnos az általam vizsgált generáció tagjai a munkájuk elvégzését bízzák a technikára, tehát helyettesítik a befektetendő munkát, energiát az okoseszközökkel. Olyan digitális kompetenciával rendelkeznek, amely felöleli az információs társadalom technológiáinak (*Information Society Technology*) magabiztos és kritikus használatát a kommunikáció, a tanulás, a munka és a szabadidő terén.

Nem volt látható kezdetekben, hogy ez a technikai fejlődés óriási károkat is okozhat. Megfigyelhető a személyiségtorzulás bizonyos mértéke, illetve az érzelmi elbizonytalanodás egyre nagyobb körben jelenik meg. Az önbizalomhiány bizalmatlanságot szül. Tekintsük csak pl. a közösségi médiát, a Facebookot, a Tik-Tokot, az Instagramot. „Nem vagyok elég szép, de szépnek akarok látszani!” Ezért olyan álarcokat öltenek magukra a fiatalok, amelyek messze nem a valós értékeiket mutatják. A filterek csak önmaguk és mások megtevesztésére alkalmasak. De mondjuk egy bőrhíbat sosem fog véglegesen orvosolni a rendszer... De ne menjünk messzire, tekintsük napjainkban a középiskolás korosztályt. A kislányok ki sem mozdulnak otthonról alapozó felkenése és műszempilla nélkül. Nem is olyan régen egyenesen tilos volt az iskolákban ez a fajta megjelenés...

4. CSALÁDI HÁTTÉR

Meg kell említenem itt a szülői felelősséget. A rendszerváltás után olyan társadalmi helyzet teremtetődött, ahol háttérbe szorult a kötelesség tudat és a felelősségérzet. A család, mint elsődleges szocializációs közeg egészen kisgyerekkorban nem tanít meg bizonyos normákat, de az iskola, mint másodlagos szocializációs közeg már erre nem képes. Így kerülnek a tanítási-tanulási folyamatba olyan gyerekek, akiknek semmiféle kudarcélményük eddig nem volt és gondolkodni se nagyon kellett, mert otthon mindent kitaláltak helyettük. Következésképpen az iskolai kudarcokat nem tűrik, a jobbító szándékú kritikákat ellenségeskedésnek fogják fel. Torz a tükör és nehéz szembenézni a tényekkel. A tanítási-tanulási folyamat egy háromlábú szék: az egyik, a legfontosabb láb a gyerek. Segítenünk kell, hogy haladjon. A második láb a család, a szülő. A harmadik láb a tanár, az oktató. Bármelyik is hiányzik ebből a stabilitásból, összedől a rendszer. Ezt sajnos tapasztalataim szerint a szülők nem igazán értik, érzik, sokszor otthon csak számonkérnek, fegyelmeznek, (vagy azt se...), rábízzák az iskolára a teendőket. Súlyos hiba! Hiszen az alapok otthonról indítatnak! A gyerekek TV-n vagy lapon keresztül néznek mesét ahelyett, hogy mesélnének nekik. Hallani kellene a szülők hangját. Később már önállóan használják az okostelefonokat. Olyan információcunamival találkoznak ezek a fiatalok, amivel nem igazán tudnak mit kezdeni. Hiányos ismereteik miatt képtelenek az összefüggések áttekintésére, mindent elfogadnak, amit az INTERNET sugall. Nincs egy egészséges szűrő, a bizonytalanságuk miatt pedig inkább hagyatkoznak a gépre, mint a józan eszükre. Egy nagyon eklatáns példa: levelesládára kellett nevet írni. A Word mindig is javítja, ha valami nem tetszik, el kell dönteni, egyetértünk-e, vagy hagyjuk javítás nélkül. Történetesen egy Zoltánné nevének kellett volna kikerülni, de mivel a Word ezt pirossal aláhúzta, javításként pedig felkínálta a Zoltáné lehetőséget, ez volt olvasható egy ideig a levelesládán.... Szomorú. És ez a legkisebb gond...

A családmodelleket vizsgálva látható, hogy a kamaszkor kitolódik. Napjainkban a legtöbb középiskolát végzett gyerek jelentkezik felsőoktatásba. Ezzel nem is lenne gond, de az egyetemi oktatás feltételez bizonyos fejlettségi szintet, mint magatartásban, mint felkészültségben. Ugyanis nem kötelező a napi iskolai jelenlét, nincs napi számonkéréstől való félelem. Ez egy felkészületlen hallgatót nagyon meg tud tévesztetni és el is viszi az eddig még ki sem alakult rendszerét rossz irányba. Élvezi az életet, szórakozik, még a kamaszkori lázadó korát éli. Nincs szülői felügyelet, egy „lázadó gyermeki énállapot”-ban kellene az elvárásokat teljesíteni. Nem sikerül. Jönnek a kudarcélmények és mivel nincs kudarctüresem, ezért kezdődik a folyamat előlről. Menekülnek a közösségi médiába, keresnek hasonló „sorsú” „barátokat”.... A régi rendszerek rákényszerítették az embereket, hogy felnőttekké

váljanak. Ma ez nincs. A COVID megjelenése nagyon sokat rontott a helyzeten. Rákényszerült a család, hogy az oktatás bármelyik szintjén tanuló gyerekének a tanuláshoz nagyobb mértékkel járuljon hozzá, mint eddig bármikor. Az online illetve a digitális oktatás pusztán arra adott lehetőséget, hogy az információk beintegrálásra kerüljenek, de valljuk be, hogy a rutin ellenőrzésére már kevésbé.

5. EGYETEMI OKTATÁS

Az egyetemi oktatásra szűkítve a problémákat, meg kell említenem azokat a nehézségeket is, melyekkel a középiskolából kikerülő hallgatók tanulmányaik első évében találkozhatnak. Eleve egy teljesen új környezetbe csöppennek, sokszor más városba kerülnek, és manapság már az sem ritka, hogy más országban tanulnak tovább. Ez önmagában is egy stresszhelyzetet, bizonytalanságot generál. A szorongó ember teljesítőképesége pedig korlátozott. Amíg a középiskolákban a témazáró dolgozat a legmagasabb szintű számonkérés, 200%-os jeggyel mérik, addig az egyetemen első pillanattól kezdve olyan mennyiségű és bonyolultságú tananyaggal találkozhatnak, melyek messze meghaladják a témazáró dolgozat mennyiségét. Ez nagy kihívás, hiszen nincs tanulási módszerük. Kialakulhat egy olyan mértékű frusztráció, amely azt eredményezi, hogy a hozzájuk legközelebb eső eszközhöz, azon belül pedig a „legsegítőkésebb” programhoz, a ChatGPT-hez, az AI-hoz fordulnak. Itt van a nagy csapda, hiszen a már előzőleg említett hiányosságok miatt ellenőrizni nem tudják ezen programok megoldásait és így ellenőrzés nélkül épül be az esetlegesen téves információ.

Sok hallgató lakik kollégiumban. Ez egy új társadalmi környezetet jelent, mivel kikerülnek a mikrokörnyezetből és belecsöppennek egy olyan közegbe, ahol alkalmazkodni kell a különböző szokásokhoz, adott esetben különböző kultúrákhoz. Külföldön tanuló hallgatóknak pedig az adott országot is meg kell ismerni, asszimilálódni kell, hiszen ott ők „vendégek”.

Talán a legjelentősebb probléma az idő. Napjainkban sajnos egyre több hallgató vállal munkát a nappali tagozaton való tanulás mellett. Nagyon nehéz összeegyeztetni ezt a két, külön-külön sem egyszerű dolgot. Habár nem kötelező az előadások mindegyikén való részvétel, de mindenki tudja, hogy jelentősen megkönnyíti a tananyag elsajátítását az oktatói magyarázat. Oktatóként megkönnyíthetjük a hallgatók dolgát, ha eltérünk az eddigi egyetemi gyakorlattól és megpróbáljuk az elsajátítandó tananyagot rendszeresen, viszonylag rövid időközönként (akár heti rendszerességgel) számon kérni a szokásos, szemeszterenként két alkalom helyett. Ez megfelelő motivációt is adhat, eredményesebbé teheti a tananyag feldolgozását. Természetesen az oktatóknak ez plusz feladat, idő, terhelés, de mégiscsak a legfontosabb feladat az egyetemen az oktatás!

Tanulás módszertani kutatások szerint azonban nem elég a Z generáció oktatásához a módszertani változás, nem hagyható figyelmen kívül a pszichológiai változás sem. Amikor a behaviorista szemléletet követjük, akkor a magolás, a memoriterek visszamondása az eredményesség feltétele. Ez az a szemlélet, amelyben a tanárnak irányító szerepe van, kontroll alatt tartja a tanulási folyamatot, tehát a tanulás, mint folyamat külsőleg irányított folyamat. Sajnos, ilyen esetben nem veszik figyelembe a gondolkodási folyamatot, a kreativitást, a belső motivációt. Lehet nagyon jó eredményeket elérni, de sajnos ez ma már nem elég. Gyors felejtés következik, ez pedig a későbbi kudarcok melegágya. Viszont vannak a műszaki oktatás területén olyan ismeretek, melyek elsajátításához nagyon jól alkalmazható ez a módszer. Ilyen pl. a géprajz. Itt ugyanis nagyon fontos a pontosság, a precizitás, a szabványok helyes használata, az ábrázolás különböző technikáinak elsajátítása, hiszen ez egy nyelv. Olyan nyelv, mint bármelyik idegen nyelv, mert a rajzok készítői, a tervezők közötti kommunikáció eszköze. A tervezés arról szól, hogy az ötleteket, elképzeléseket nagyon pontosan és a szabványokhoz igazodva ábrázolja a mérnök, mert csakis így lesz a tervből megvalósulás.

A kognitív pszichológia előtérbe kerülésével a megtanult szabályok alkalmazása lett fontos. Nem a szabályok, definíciók szó szerinti idézése fontos, hanem azok alkalmazása. A számítógépes tervezőprogramok, rajzolóprogramok megjelenése nagy mérföldkő, tipikusan a szabályok szigorú betartása mellett tudnak csak eredményesen a hallgatók segítségére lenni. A kognitív pszichológia a belső, mentális állapotra helyezi a hangsúlyt. A tanári feladat átalakul: nem irányító a szerep, hanem „csak” segítő. Ilyenkor hagyjuk a hallgatót önállóan gondolkodni, fejlesztve ezzel a problémamegoldó képességét. Mélyebb tudásbeépülés érhető el ezzel a módszerrel. Sajnos azonban a mai oktatási rendszer sokszor nem teszi lehetővé ezt a meglehetősen időigényes munkát. Nincs lehetőségünk a tananyag oly mértékű elemzésére, amely a régebbi korok rendszerében még adott volt. Az óraszámok csökkentése miatt a hallgatóknak önállóan kell sokszor a logikai összefüggéseket felismerni és legfeljebb egy ellenőrzés során van az oktatónak lehetősége véleményt mondani. Említve azonban a géprajz tantárgyat, meg kell állapítani, hogy a tanulás-tanítási folyamatban nem szabad elsiklani bizonyos törvényszerűségek megértése mellett. A vetületi ábrázolás minden műszaki rajz alapja. Nem szabad sajnálni az időt arra, hogy a hallgatók felismerjék ennek logikáját, megértsék a fontosságát és ezzel fejlesszék a vizuális problémamegoldási képességüket.

Tapasztalataim szerint a végső következtetések közös levonása közelebb viszi a hallgatókat a hosszabb távú, tudatos, önálló munkához.

Napjainkban vizsgálva egyes országok oktatási rendszerét, tapasztaljuk, hogy a konstruktivista szemlélet olyan eredményességgel van jelen, amely a hallgatók önállóságát, saját belső motivációját használja ki. Csoportokban, közösen, ún. projektmunkában

dolgoznak, mindenkinek külön feladata van és a végén áll össze a kész munka. Ha a behaviorista szemlélet vizsgálatakor azt mondtam, hogy a tanár a külső vezető, a konstruktivista szemlélet használatakor a tanárnak nem szabad kívülről irányítani a tanulási folyamatot, hanem hagyni kell, hogy a hallgatók önállóan saját belső értelmezésük felhasználásával oldják meg a feladatokat. Természetesen a felmerülő kérdéseket meg kell válaszolni, ezzel egy segítő szerepet be lehet tölteni, de nem a tanár adja át az ismeretanyagot. Maradva a géprajz tanítási folyamatánál, ez a szemlélet is jól alkalmazható. Sőt, a Gépelemek tantárgy tanításakor is kihasználható ennek a szemléletnek minden eleme. Egy szerkezet alkatrészeinek rajzolásakor mindig az a feladat, hogy „megfelelő számú” nézetet és metszetet készítsenek a hallgatók. Ehhez meg kell ismerniük a térbeli alkatrész rajzlapon történő megjelenítésének lehetőségeit, alkalmazniuk kell az addig megtanult szabályokat. Az sem okoz gondot, ha egymás között megbeszélik a feladatot, meghallgatják egymás véleményét, esetleg vitatkozhatnak is.

Ez az a szemlélet, ami szerintem a jövő. Konstruktív gondolkodásra, kreatív tanulásra és együttműködő csapatmunkára nevelhetjük a hallgatókat.

6. ÖSSZEGZÉS

Összefoglalva oktatóként úgy gondolom, hogy a Z generáció oktatása nem a tudásátadást jelenti elsősorban, hanem a kreativitásuk, önállóságuk fejlesztését, közösen végzett munkájuk segítségét, olyan kompetenciák elsajátítását, mellyel segíteni tudom őket a szakmai fejlődésükben. *„Nagy hangsúlyt kell fektetni a tanulás során annak módszereire, technikájára, az alapelvek tudatosítására, az ismeret elsajátításának stratégiájára.”*[2]

Hiszen:

„Az iskola arra való, hogy az ember megtanuljon tanulni, hogy felébredjen tudásvágya, megismerje a jól végzett munka örömeit, megízlelje az alkotás izgalmát, megtanulja szeretni, amit csinál, és megtalálja azt a munkát, amit szeretni fog.”

(Szent-Györgyi Albert nyomán).

Új kihívásoknak kell megfelelnünk, ezzel új lehetőséget is kapunk, hogy alkalmazhassuk azokat a technikákat, melyek túlmutatnak az egyetemi tanulmányainkon és a tanítási tapasztalatainkra épülve alkalmazhatók válnak. Ez a generáció nehezen viseli a monotonitást, azonnali reflektálást vár el. A frontális osztálymunka ezért a középiskolákban már nem igazán alkalmazható tanítási módszer. *„A figyelem fenntartása érdekében különösen fontos a változatos, élményszerű, digitális elemeket is integráló oktatási környezet...”*(Bandura, 1997)

Az egyetemen azonban előadások keretében még muszáj alkalmazni, de ez természetesen azonnal kiegészül a gyakorlatokkal.

A Z generáció oktatásának pszichológiai hátterét végül is úgy gondolom, hogy a digitális kompetencia

fejlesztése kell, hogy meghatározza. természetesen emellett nem maradhat el az oktató személyes, értékközvetítő munkája sem.

7. IRODALOM

- [1] Burrhus Frederic Skinner: The technology of teaching; Gondolatkiadó; Budapest; 1973
- [2] Barnóczki Ilona-Putnoky Jenő: Tanulás és motiváció; Tankönyvkiadó; Budapest; 1980
- [3] Perkó Magdolna-Tóth Tímea: Neveléstudományi alapismeretek; Képzőművészeti Kiadó; Budapest; 2006
- [4] Vajda Zsuzsanna: Életkorok pszichológiája; Osiris kiadó; Budapest; 2025
- [5] Dr. Kelemen László: Pedagógiai pszichológia; Tankönyvkiadó; Budapest; 1984
- [6] Dr Balogh László: Pedagógiai pszichológia az iskolai gyakorlatban; Urbis Könyvkiadó; 2006

A KISMÉRETŰ MŰANYAG FOGASKEREKEK MELEGEDÉSÉNEK MÉRÉSE

MEASURING THE HEATING OF SMALL PLASTIC GEARS

Dr. Bihari János*, Marada Imre**

ABSTRACT

Small plastic gears are straight-toothed gears with an involute profile and a module of no larger than 0.5 mm. These gears are made of some type of plastic, usually POM or PA.

There is no international standard for the calculations required for the reliable design of plastic gears; instead, regionally accepted guidelines, national guidelines or guidelines within individual companies are used. This means that essentially every major plastic gear manufacturer has its own calculation method and guidelines. This situation poses a major obstacle for the plastic gear industry, as it hinders the easy exchange of design knowledge and information.

Among the forms of damage to plastic gears, the literature considers failure due to tooth heating to be one of the most common. Therefore, we compared the values calculated from the heating formulas in the literature with the measurement results.

1. BEVEZETÉS

A kisméretű műanyag fogaskerekek ennek a cikknek az értelmezésében olyan evolvens profilú, egyenes fogú fogaskerekek, melyeknek modulja nem nagyobb 0,5 mm-nél. Ezeknek a fogaskerekeknek az alapanyaga valamilyen műanyag, általában POM vagy PA [1].

A műanyag fogaskerekek megbízható kialakításához szükséges számításokhoz nem áll rendelkezésre nemzetközi szabvány, hanem csak régióként elfogadott, nemzeti szintű vagy egyes cégeken belüli irányelveket használnak [2]. Így lényegében minden nagyobb műanyagfogaskerék-gyártónak megvan a maga számítási módszere és segédlete. Ez a helyzet nagy akadályt jelent a műanyag fogaskereket tervezők számára, mivel akadályozza a tervezési ismeretek és információk egyszerű cseréjét [3] [4] [5].

A kisméretű műanyag fogaskerekek károsodási formái közül a szakirodalom a fog melegedéséből származó tönkremenetelt tartja az egyik leggyakoribbnak [6][7]. Ezért a szakirodalomban szereplő melegedési képletekből származó értékeket vetettük össze mérési eredményekkel.

2. A LEGFONTOSABB MÓDSZEREK

A műanyag fogaskerekek melegedésének meghatározására műanyag fogaskerekek tervezését segítő katalógusok és irányelvek vagy számítási módszert, vagy kísérletek és számítások kombinációját használják.

Európában a műanyag fogaskerekek tervezésének alapjául sokáig a VDI 2545 irányelv szolgált. Ez az irányelv 1981-ben jelent meg, és 1996-ban vonták vissza. Mivel a visszavonása után nem állt rendelkezésre más hasonló irányelv, a gyakorlatban egészen a VDI 2736 irányelv 2016-os megjelenéséig általában ezt használták, a mai napig fontosnak számít.

A VDI 2545 irányelv szerint a műanyag fogaskerekek melegedését a (1) egyenlettel lehet kiszámítani [6] [8].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + 136 \cdot P \cdot \mu \cdot \frac{1+u}{z_2+5} \cdot \left(\frac{17100}{b \cdot z_{1,2}} \cdot \frac{k_2}{(v \cdot m)^{\kappa}} + 6,3 \cdot \frac{k_3}{A} \right) \quad (1)$$

Ahol:

- ϑ_k - a környezet hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],
- P - a hajtás teljesítménye [kW],
- μ - a súrlódási tényező,
- u - a fogsámvizony,
- z - a fogsámszámok,
- b - a fogszélesség [mm],
- v - a fogaskerék görbülőköri sebessége [m/s]
- m - a modul [mm],
- A - a hajtómű belső felülete [m^2]
- k_2 - az anyagtényező,
- k_3 - a hajtómű tényező [$\text{m}^2\text{K/W}$],
- κ - a párosított fogaskerekek anyagait veszi

figyelembe.

Mivel évekig nem állt rendelkezésre általánosan elfogadott módszer a melegedés számításához, több alapanyaggyártó is kidolgozott olyan segédanyagokat, amelyek jól alkalmazhatóak adott határokon belül. Ezek közül a Licharz cég módszere a VDI 2545 egy tapasztalati adatok alapján módosított változata. Ezt a (2) egyenlet mutatja be [4].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + 136 \cdot P \cdot \mu \cdot f \cdot \frac{1+i}{z_{1,2}+5 \cdot i} \cdot \left(\frac{17100}{b \cdot z_{1,2}} \cdot \frac{k_2}{(v \cdot m)^{\frac{3}{2}}} + 7,33 \cdot \frac{k_3}{A} \right) \quad (2)$$

Ahol:

- i - az áttétel,
- f - a hajtómű szakaszos üzemét figyelembe vevő korrekciós tényező.

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

** PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

2016-ban aztán végül megjelent a VDI 2736 irányelv. A VDI 2736-ban szereplő melegedési képletet Hachmann és Strickle munkássága alapján hozták létre [9]. Manapság ezt a képletet használják a melegedés számítására. A VDI 2736 szerinti számítási módszert a (3) egyenlet tartalmazza [10].

$$\vartheta_{1,2} = \vartheta_k + H_v \cdot P \cdot \mu \cdot \left(\frac{k_g}{b \cdot z \cdot (v \cdot m)^{\frac{3}{4}}} + \frac{R_{\lambda,G}}{A_G} \right) \cdot ED^{0,64} \quad (3)$$

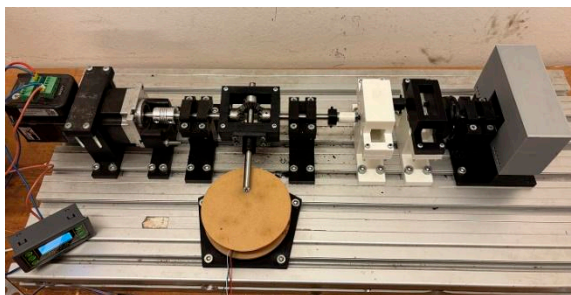
Ahol:

- A_G - a hajtómű belső felülete [m^2]
- k_g - a hőátadási tényező [$K(m/s)^{0,75} mm^{1,75}/W$], értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- $R_{\lambda,G}$ - a hajtómű tényező [m^2K/W], értékét táblázat alapján lehet megállapítani,
- ED - a relatív terhelési ciklus, azt állapítja meg, hogy a hajtómű folyamatos vagy szakaszos üzemű-e,
- HV - a fog veszteségi foka.

Említést érdemel még a japán JIS B 1759 szabvány. Bár ebben a szabványban nem szerepel külön számítás a műanyag fogaskerek melegedésére, a szabvány a hőmérséklet hatását a fogaskerék anyagának fogtónál vett megengedett hajlítófeszültségénél veszi figyelembe egy környezeti hőmérsékleti tényező és egy hőmérséklet-növekedési tényezővel. Mindkettőnél a szabvány alapján méréseket kell végezni etalon paraméterekkel és ezeket az eredményeket kell összehasonlítani a tényleges paraméterekkel. Így a JIS B 1759 szabvány módszeréről elmondható, hogy nagy mértékben különbözik a VDI irányelvekben használt módszerektől, hiszen a JIS B 1759 módszerében a tényezők nagy része nem korábbi adatokat tartalmazó táblázatokból és diagramokból származik, hanem leírja, hogyan lehet olyan méréseket végezni, hogy a szilárdságot befolyásoló tényezőket megkapjunk [11].

3. A MELEGEDÉS MÉRÉSE

A melegedés méréséhez használt berendezést az 1. ábra mutatja. A berendezés egy meghajtó motorból, egy nyomaték-mérő egységből, a mérendő fogaskereket tartalmazó hajtóműből és a terhelőegységből áll, amely egy folyadékba merülő vízkerék. A fogaskerek melegedésének méréséhez egy Testo 872 hőkamerát alkalmaztunk. A külső hőmérsékletet mérésére és ellenőrzésére egy egyszerű digitális hőmérsékletmérőt használtunk.



1. ábra A melegedés méréséhez használt berendezés

Minden mérés során két $m=0,5$ mm modullal rendelkező fogaskereket mértünk. A hajtott oldali fogaskerék fogszáma 30, a másiké 50 volt. A fogaskerek fogszélessége 3 mm volt, anyaguk POM. A fordulatszám és a terhelés is minden mérés esetén más és más volt. Emellett, mivel a méréseket különböző napokon végeztünk el, hogy egy mérés után legyen ideje a berendezésnek lehűlni, ezért a környezeti hőmérséklet is különbözött az egyes mérések során.

Így végeztünk el öt mérést, amit az 2. fejezetben bemutatott képletekből kapott eredményekkel vetettük össze. A méréseket úgy végeztük el, hogy első körben mértünk 30 percet, aztán 30 percig nem leállítva magára hagytuk a berendezést, majd újabb 10 percet mértünk, ezt követően újabb 30 percre hagytuk a berendezést futni, végül egy újabb 10 percig mértük a hőmérséklet változását. A mérések során a hőkamerát beállítottuk, hogy az úgynevezett „hot spot”-ot mérje, azaz a legmelegebb pontot, mely a fogaskerek érintkezési pontjának környezetében volt.

Az így mért értékeket értékeltük ki öt szakaszban. Az I. szakasz a mérés kezdeti 10 percét jelenti, a II. szakasz a következő 10 percet, a III. szakasz pedig a harmadik 10 percet. A IV. szakasz az első 30 perces mérés nélküli futás utáni 10 percet jelöli, az V. szakasz pedig az utolsó 10 perces hőmérsékletmérést.

A mérések paramétereit az 1. táblázat, a képletekkel számított hőmérséklet értékeket a 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A mérések paramétereiről

Mérés	Tangenciális erő a fogon [N]	A kiskerék fordulatszám [1/min]	A külső hőmérséklet [°C]
1. mérés	0,0413	273,73	25,1
2. mérés	0,7284	660	22,8
3. mérés	0,3991	500	22,1
4. mérés	0,114	360	21,6
5. mérés	0,2615	600	21,3

2. táblázat A képletekkel kapott eredmények az egyes mérési esetekre

Mérés	VDI 2545 [°C]	Licharz [°C]	VDI 2736 [°C]
1. mérés	25,15	25,27	25,27
2. mérés	24,39	26,45	26,46
3. mérés	22,84	23,96	23,97
4. mérés	21,77	22,09	22,09
5. mérés	21,84	22,58	22,58

A VDI 2736 irányelv felállításkor is hasonló mérést használtak a hőmérséklet képletének meghatározásához. Az irányelv 4 számú része hőkamera alkalmazását mutatja be, kenés nélküli esetben. A méréseket nem megszakított futtatásokkal végezték el, azt a kvázistacionárius állapotot keresték, ahol hőegyensúly áll be, azaz a fogaskerek nem melegednek tovább. Ezt tapasztalatok alapján 20 és 45 perc közötti időtartam esetén érték el [12].

4. A MÉRÉSEK EREDMÉNYEI

4.1. Első mérés

A mérések azt mutatták, hogy az I. szakaszban a hőmérséklet 26,3 és 27,2 °C között változott, 26,7 °C-os átlaggal. Látható, hogy már a mért hőmérsékletek minimuma is több, mint 1 °C-kal volt melegebb, mint a képletekkel számított hőmérsékletek.

A II. szakaszban a mért hőmérséklet minimuma és maximuma is 1 °C-kal nőtt. Az átlaghőmérséklet ebben a szakaszban 26,8 °C volt. A maximum a mérés további szakaszaiban már nem nőtt tovább, megállt 27,3 °C-on.

A III. szakaszban tovább növekedett a mért értékek minimuma, ismételten 1 °C-kal. A III. szakaszban mért hőmérsékletek átlaga 26,8 °C volt.

A minimum érték a IV. szakaszban is 1 °C-ot nőtt. Az átlagérték itt 26,9 °C volt. A maximum már nem növekedett.

A minimum értékének 1 °C-os növekedése az V. szakaszban is folytatódott. Az átlagérték itt is 26,9 °C volt.

4.2. Második mérés

Az átlaghőmérséklet ebben a szakaszban 26,1 °C volt. Bár a minimum érték a VDI 2545-öt leszámítva kisebb, mint a képletekkel számítottak, a maximum értéke mindet túllépi.

A II. szakaszban a hőmérséklet 25,7 és 27,9 °C között változott, 26,8 °C-os átlaggal.

A III. szakaszban tovább folytatódott a maximum és minimum érték növekedése. Előbbi 28,2, utóbbi 26,3 °C lett. A mért hőmérsékletértékek átlaga is növekedett, ez 27,2 °C lett.

A IV. szakasz már jelentős hőmérsékletnövekedést mutat, mivel ez a mérés történt a III. szakasz utáni 30 perces mérés nélküli futtatás után. A minimum értéke itt már túlhaladta minden esetben a képletekkel számolt hőmérsékletet a 27,6 °C-os értékével. A maximum értéke 30,4 °C lett. A IV. szakaszban mért értékek átlaga 29,1 °C volt.

Az V. szakaszban a minimum értéke 27,9 °C-ra növekedett. A maximum értéke már csak 0,1 °C-ot nőtt, 30,5 °C-ra. Ez azt jelentheti, hogy a maximum értéke már további futás esetén sem növekedne jelentősen. Az átlagérték az V. szakaszban 29,5 °C volt.

4.3. Harmadik mérés

Az I. szakaszban a hőmérséklet 23,3 és 24,4 °C közötti értékeket vesz fel, 23,8 °C-os átlaggal. A Licharz és a VDI 2736 képleteivel kapott eredmény ebbe a tartományba esik, de a maximumnál kisebb. A VDI 2545 szerint számolt érték már ezt a tartományt sem éri el.

A II. szakaszban a minimum értéke 23,5 °C-ra, a maximum értéke 24,7 °C-ra növekedett. Az átlagérték 24 °C volt.

A III. szakaszban a hőmérséklet 23,8 és 24,8 °C közötti értékeket vett fel. Az átlag ebben a szakaszban 24,3 °C volt.

A maximum és minimum értéke már a IV. és V. szakaszra sem változott. Elmondható így tehát, hogy a képletekkel számított értékek a Licharz és a VDI 2736 esetén körülbelül 0,1 °C-kal voltak nagyobbak a mért értékek minimumától, a maximumot azonban nem érték el. A IV. szakaszban az átlag 24,3 °C volt, az V. szakaszban 24,4 °C.

4.4. Negyedik mérés

Az I. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22,1 °C volt, ami 0,01 °C-kal nagyobb, mint a képletekkel kapott legnagyobb érték. A mért értékek maximuma 23,1 °C volt. Az I. szakaszban mért értékek átlaga 22,5 °C volt.

A II. szakaszban a minimum és a maximum értéke is 0,1 °C-kal nőtt. Az átlag értéke 22,8 °C lett.

A III. szakaszban a minimum 22,4, a maximum 23,5 °C értéket vett fel. A mért hőmérsékletek átlagos értéke 23 °C volt.

A IV. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22,6 °C volt, a legnagyobb pedig 23,6 °C. Az átlag 23,1 °C lett.

Az V. szakaszban sem a minimum, sem a maximum értéke nem változott. Az átlag 0,1 °C-kal növekedett a IV. szakaszhoz képest.

4.5. Ötödik mérés

Az I. szakaszban a legkisebb mért hőmérséklet 22 °C volt. Ezt az értéket a VDI 2545 képletből számított érték nem érte el, a másik kettő képletéből számított hőmérséklet azonban igen. Azonban egyik számított eredmény sem érte el a maximum értékét, ami 23,2 °C volt. A mért értékek átlaga ebben a szakaszban 22,5 °C volt.

A II. szakaszban a maximum és a minimum értéke is 0,2 °C-kal nőtt. Az átlagos érték ebben a szakaszban 22,8 °C volt.

A III. szakaszban újabb 0,2 °C-kal nőtt a maximum és a minimum értéke. Az átlagos érték itt már 23,1 °C volt.

A IV. szakaszban mind a maximum, mind a minimum értéke jelentősen megnőtt. A legkisebb mért érték 23,1 °C volt, ami már meghaladja az összes

számított értéket. A legnagyobb mért érték pedig 24,1 °C volt. A mért értékek átlaga 23,6 °C volt.

Az V. szakaszra a maximum értéke nem változott, a minimumé azonban még 0,1 °C-kal nőtt. Az átlagos érték 0,2 °C-kal nőtt 23,8 °C értékre.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Összességében elmondható, hogy a mért értékek maximuma minden mérésnél jelentősen meghaladta a képletekből számított értékeket. A Licharz és a VDI 2736 szerinti képletekből kapott eredmények egyes esetekben a mért tartományokon belül voltak, míg a VDI 2545 esetében ez sohasem következett be. Azonban a kisméretű műanyag fogaskerekek melegeedésének szempontjából nem elég, ha a melegeedés számítására használt képletek belesznek a mérési tartományba. A maximum értékének minél jobb megközelítése lenne a céljuk, ugyanis a műanyagok esetében a hőmérsékletnek nagyobb a hatása a szilárdsági és alakváltozási jellemzőkre, mint a fémeknél. Ezért nem hagyagolható el, hogy mi az a legnagyobb hőmérséklet, amit működés közben a fogaskerekek elérnek. A következtetésünk az, hogy erre az esetre egy új számítási módszert kellene kidolgozni. Ehhez sajnos jelenleg nem állnak rendelkezésünkre megfelelő eszközök.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben a kisméretű műanyag fogaskerekek melegeedésével foglalkoztunk, mivel a műanyag fogaskerekeknek a fog túlzott melegeedéséből származó megolvadása jelenti az egyik fő okot, illetve a jelenleg használt irányelvek és gyártói katalógusok nem adnak megfelelő számítási képleteket a 0,5 mm vagy annál kisebb modulú fogaskerekek esetével.

A cikkben először bemutattuk a jelenleg legtöbbször használt módszereket és képleteiket.

Ezután öt mérezt végeztünk, különböző terhelési esetekre, amiket a képletekből kapott eredményekkel vetettünk össze.

Az eredmények azt mutatták, hogy a mért hőmérsékletek maximuma minden esetben nagyobb volt a képletekkel számított értékeknél.

Mivel a műanyagok esetében a hőmérsékletnek nagyobb a hatása az anyagjellemzőkre, mint a fémeknél, ezért egy új képlet meghatározása lenne javasolt. Erre sajnos jelenleg nem állnak rendelkezésünkre megfelelő eszközök. De egy további kutatás részét képezheti egy megfelelő képlet létrehozása.

6. SUMMARY

In this article, we focused on the heating of small plastic gears, as melting due to excessive heating is one of the main causes of failure in plastic gears, and the guidelines and manufacturer catalogs currently in use do

not provide adequate calculation formulas for gears with a module of 0.5 mm or less.

In the article, we first presented the most commonly used methods and their equations.

We then performed five measurements for different load cases, which we compared with the results obtained from the formulas.

The results showed that the maximum measured temperatures were higher than the values calculated using the formulas in all cases.

Since temperature has a greater effect on the material properties of plastics than metals, it would be advisable to define a new formula. Unfortunately, we do not currently have the appropriate tools at our disposal. However, the creation of a suitable formula could be part of further research.

7. IRODALOM

- [1] Bihari, J.: Kisméretű műanyag fogaskerekekkel szerelt hajtóművek tűrésezési problémái, GÉP 2016/5-6., pp: 14 – 17, 2016.
- [2] Bihari, J. – Kamondi, L.: Kis méretű műanyag fogaskerekek vizsgálata, GÉP 62:(7-8), pp: 21 – 24, 2011.
- [3] Bae, I. & Kissling, U.: Comparison of strength ratings of plastic gears by VDI 2736 and JIS B 1759 – In vision of building a new international standard, 2019, 10.51202/9783181023556-1267
- [4] LICHARZ GMBH: Designing with engineering plastics. Licharz GmbH, Buchholz, Németország, 2016.
- [5] DuPont: General Design Principles – Module I., Du Pont de Nemours International SA, Genf, Svác, 2003.
- [6] Antal, M.: Műanyagok gépészeti alkalmazása II. kötet, Gépipari Tudományos Egyesület Kiadványszerkesztési és Műszaki Iroda, Budapest, 1987.
- [7] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 1, BeuthVerlag, Berlin, 2016.
- [8] VDI 2545 Zahnräder aus thermoplastischen Kunststoffen, BeuthVerlag, Berlin, 1981.
- [9] Hachmann, H., Strickle, E.: Polyamide als Zahnradwerkstoffe, Konstruktion 18 (1966) 3, S. 81-94
- [10] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 2, BeuthVerlag, Berlin, 2014.
- [11] JIS B 1759:2019 (JGMA/JSA) Estimation of tooth bending strength of cylindrical plastic gears, Japanese Standards Association, Tokyo, 2020.
- [12] VDI 2736 Thermoplastische Zahnräder, Blatt 4, BeuthVerlag, Berlin, 2016.

KRITIKUS SÍK MEGHATÁROZÁSÁNAK MÓDSZERTANA

METHODOLOGY OF CRITICAL PLANE DETERMINATION

Döbrentei Sándor*, Dr. Zwierczyk Péter Tamás**

ABSTRACT

Fatigue analysis is among the most challenging tasks in engineering practice. Not only because of the statistical nature of fatigue experiments, but the numerous formulas available for fatigue parameter calculation, which allows the engineers to compare the actual stress and strain state of the parts to the results of fatigue experiments. The situation becomes even more complicated, if one is interested in the orientation of the critical plane, on which the fatigue crack propagation is anticipated. In this work a possible methodology of critical plane is introduced.

1. BEVEZETÉS

A kifáradásra való méretezés és ellenőrzés a mérnöki gyakorlat fontos eleme, mert a gépelemek jelentős része ciklikus igénybevételnek van kitéve. Mióta a jelenséget a 19. században felismerték, a fáradási elméletek nagyon sokat fejlődtek, de a többtengelyű, nem arányos terhelés esetén bekövetkező tönkremenetel meghatározása napjainkban is aktívan kutatott terület. Ennek oka, hogy nem arányos terhelés esetén mind a feszültségi, mind az alakváltozási főirányok változnak egy terhelési ciklus során, így a repedés keletkezés és terjedés szempontjából veszélyes sík meghatározása is bonyolultabbá válik. Ismert, hogy a repedés mikroszinten nyírás hatására keletkezik, mert a kristályszerkezet csúszósíkjai nyírás hatására mozdulnak el [1]. Ebből kifolyólag feltételezhető, hogy azok a síkok lesznek repedés keletkezés és ezzel egyidejűleg kifáradás szempontjából veszélyesek, amelyeken a nyírófeszültség és/vagy a nyíró alakváltozás a legnagyobb értéket veszi fel. Bár a repedés keletkezés mikroszinten történik, ahol az anyag a kristálysíkokat és a szemcsék méretét tekintve erősen inhomogén és anizotróp, a mérnöki gyakorlatban a feszültség- és alakváltozási állapotot makroszinten ismerjük és homogén, általában izotróp anyagot tételezünk fel. Tekintve azonban, hogy acélok esetén a szemcseméret μm -es nagyságrendbe esik [2], míg mechanikai oldalról a vizsgálható legkisebb térfogat a mm^3 -es tartományba, így a makroszinten vizsgált sík orientációjával nagyszámú azonos vagy közel megegyező orientációjú csúszósíkot találunk, amelyekben a csúszás nyírás hatására létrejön. A repedés terjedése szempontjából az esetek többségében azonban a normál-feszültség válik meghatározóvá, mivel a már

makroszintű, a szemcseméret többszörösét meghaladó méretű repedést az igénybevétel repedéssíkra merőleges komponense fogja „nyitni”.

Az első kritikus sík meghatározásán alapuló fáradási modellt Findley publikálta, és munkájában ő is a nyírás hatását tartotta fontosnak [3]. Azóta több kutató is publikált különböző elven alapuló modelleket, amelyek három fő kategóriába sorolhatók: feszültségi modellek, alakváltozási modellek és energiaalapú modellek, amelyek kombinálják a feszültség és alakváltozás hatását. A feszültségi modellek általában egytengelyű igénybevétel és nagyciklusú fáradás esetén mutatnak jó egyezést a kísérleti eredményekkel. Az alakváltozás alapú modellek szintén főleg egytengelyű igénybevétel és kisciklusú fáradás esetén használatosak, míg az energia alapú modelleket összetett, nem arányos igénybevétel esetén alkalmazzák kis- és nagyciklusú fáradás esetén egyaránt. Az eddig publikált modellek jelentős része a témát áttekintő [4] és [5] munkákban megtalálhatók. Ebben a munkában a továbbiakban az általános esetben jobban alkalmazható energia alapú modellekkel fogunk foglalkozni, de minden megállapítás érvényes a feszültség és alakváltozás alapú modellekre egyaránt.

A kritikus sík modellek közös tulajdonsága, hogy a vizsgált anyagi pontban meghatározott feszültségi és alakváltozási mátrix alapján kiszámítjuk egy adott orientációjú síkban ébredő normális és a síkba eső komponens és ezekből az értékekből számítjuk az alkalmazott elméletnek megfelelően az adott síkra érvényes fáradási paramétert (FP). Ezt a vizsgálatot az orientációt diszkrét értékekben változtatva több síkra is elvégezzük úgy, hogy lefedjük lehetséges orientációk teljes halmazát, majd a legmagasabb paraméter értékkel jellemzett síkot tekintjük kritikusnak. A továbbiakban feltételezzük, hogy ez a sík, vagy az anyagi inhomogenitásokat és a főirányok forgását figyelembe véve egy közel azonos orientációjú sík fog helyet adni a tönkremenetelt okozó repedésnek, a kapott paraméter értékét pedig felhasználjuk az élettartam meghatározására, összehasonlítva azt egy kísérletileg megállapított élettartam görbével. Mivel az ismertetett módszer számítási igénye jelentős és a repedés keletkezését és terjedését sok, a számításokban figyelembe nem vehető tényező (anyaghiba, szennyeződés stb.) befolyásolja, így ebben a cikkben egy, a gyakorlatban is alkalmazható módszer kerül bemutatásra.

* PhD hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, e-mail: dobrentei.sandor@gt3.bme.hu

** Egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék, e-mail: z.peter@gt3.bme.hu

2. A FÁRADÁSI PARAMÉTER MEGHATÁROZÁSA

A módszer ismertetéséhez a Jiang és Sehitoglu által javasolt fáradási paraméter került felhasználásra, melynek alakja a következő [6]:

$$FP = \frac{\Delta \varepsilon}{2} \sigma_{max} + J \cdot \Delta \gamma \cdot \Delta \tau, \quad (1)$$

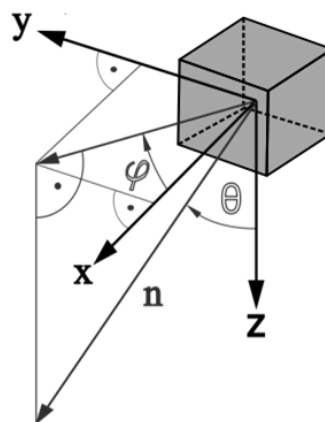
ahol $\Delta \varepsilon$ a vizsgált síkon ébredő normál alakváltozás tartomány, σ_{max} a maximális normál feszültség, J a nyírás hatását figyelembe vevő tényező, értéke általában 0,18 és 0,25 között változik, $\Delta \gamma$ és $\Delta \tau$ rendre a nyíró alakváltozás és feszültség tartomány. A paraméter meghatározásához ismerni kell a vizsgált pontban az alakváltozás és feszültség történetet egy teljes terhelési ciklus esetére. Ezt végelem módszer alkalmazása esetén az algoritmus az elem integrálási pontjaiban határozza meg, innen számítható interpolációval és átlagolással az elem középpontjára vagy a csomópontokra a felhasználó igényei szerint. Megjegyzendő, hogy feszültség és alakváltozás esetén a pontosság rendje megegyezik az elmozdulásmező pontosságával, amennyiben az interpolációs polinom fokszámával megegyező rendű Gauss pontokban számítjuk [7]. Ez azt jelenti, hogy amennyiben lineáris sík elemet használunk, ahol a merevségi mátrix pontos integrálásához 2x2-es Gauss kvadraturát kell alkalmaznunk, a származtatott mennyiségek pontossága az egy renddel kisebb Gauss pontban, vagyis az elem közepén lesz pontosabb. Szintén fontos megemlíteni, hogy amennyiben kifáradásra ellenőrzünk, kiemelten fontos az eredményeket illetően konvergencia vizsgálatot végezni, mert kis változás a feszültségekben nagy eltérést képes okozni a várható élettartamot illetően az élettartam görbe exponenciális jellegéből adódóan. Miután a feszültség és alakváltozás történetet kellő pontossággal meghatároztuk a vizsgált pontban, kiszámítjuk az (1)-es összefüggéssel definiált paraméter értékét diszkrét orientációjú síkokon. A vizsgált síkot a normálvektorával definiáljuk, amely a következő alakban írható fel:

$$\underline{n} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

ahol $\theta \in [0, \pi/2]$ y tengely menti forgatást valósít meg, míg $\varphi \in [0, 2\pi]$ z tengely menti forgatást az 1. ábrának megfelelően. A szögtartományokból látható, hogy csak a pozitív z irányú térfelet fedi le a vizsgálat, mivel a negatív térfelet ugyanazokat a síkokat kapjuk, csak ellentétes orientációjú normálvektorral. A vizsgálandó orientáció kiválasztását követően az (1)-es összefüggésben szereplő mennyiségek közül először meghatározzuk az adott síkon ébredő maximális normál feszültséget:

$$\sigma_{max} = \text{Max} \left[\left(\underline{\sigma}(t_i) \cdot \underline{n} \right) \cdot \underline{n} \right], \quad (3)$$

ahol $\underline{\sigma}(t_i)$ a feszültség tenzor az i -edik időpillanatban (a használt összefüggésekben az aláhúzás nélküli, vékonyan szedett mennyiségek skalár értékűek, egy aláhúzással jelöljük a vektor és két aláhúzással a tenzor mennyiségeket).



1. ábra. Sík normálisának definíciója.

Az (1)-es összefüggésben szereplő további mennyiségeket az alábbi algoritmus segítségével határozzuk meg:

$$\underline{t}_{\sigma}(t_i) = \underline{\sigma}(t_i) \cdot \underline{n}, \quad (4a)$$

$$\underline{t}_{\varepsilon}(t_i) = \underline{\varepsilon}(t_i) \cdot \underline{n}, \quad (4b)$$

$$\sigma(t_i) = \underline{t}_{\sigma}(t_i) \cdot \underline{n}, \quad (4c)$$

$$\varepsilon(t_i) = \underline{t}_{\varepsilon}(t_i) \cdot \underline{n}, \quad (4d)$$

$$\underline{\sigma}(t_i) = \sigma(t_i) \cdot \underline{n}, \quad (4e)$$

$$\underline{\varepsilon}(t_i) = \varepsilon(t_i) \cdot \underline{n}, \quad (4f)$$

$$\underline{\tau}(t_i) = \underline{t}_{\sigma}(t_i) - \underline{\sigma}(t_i), \quad (4g)$$

$$\underline{\gamma}(t_i) = \underline{t}_{\varepsilon}(t_i) - \underline{\varepsilon}(t_i), \quad (4h)$$

ahol $\underline{t}_{\sigma}(t_i)$ és $\underline{t}_{\varepsilon}(t_i)$ az $\underline{n}$ normálvektorral definiált síkhoz tartozó feszültség és alakváltozás vektorok, σ és ε rendre a normális irányú feszültség és alakváltozás, τ és γ pedig a síkba eső nyíró feszültség és alakváltozás komponens.

Mind a fáradási paraméter és a hozzá tartozó kritikus sík meghatározásának pontossága ebben a fázisban függ a sík definiálásánál alkalmazott szögosztás lépésközének nagyságától. Mivel a számítási kapacitás és a szögosztás lépésköze között exponenciális az összefüggés [8], így a szögosztást felére csökkentve a számításgény négyzetesen fog növekedni. Ennek kiküszöbölésére egy optimalizált algoritmus került kidolgozásra, amely első lépésben egy nagyobb lépésközzel közelítő becslést ad a fáradási paraméter eloszlására a szögek függvényében, majd az így számított legnagyobb érték közelében egy finomított keresést végez a pontos érték meghatározására [8]. Ezzel a módszerrel a számításgény jelentősen

csökkenthető. Az említett kétlépcsős algoritmus esetén a műveleti igény a következő összefüggéssel jellemezhető:

$$OP_0 = (Div1_\theta \cdot Div1_\varphi + Div2_\theta \cdot Div2_\varphi) \cdot m^2. \quad (5)$$

A fenti képletben $Div1_\theta$ és $Div1_\varphi$ a szöglépések száma a közelítő számítás esetén, míg $Div2_\theta$ és $Div2_\varphi$ pedig a szöglépések száma a finomított tartomány vizsgálatakor, m pedig az adatpontok száma egy cikluson belül, ami a tranziens számítás során alkalmazott időlépések számával egyezik meg. Ha az (5)-ös összefüggést a szöglépések száma helyett a szöglépés nagyságával fejezzük ki, valamint feltesszük, hogy a második lépésben a legnagyobb érték körüli finomított tartomány mérete megegyezik az első lépésben alkalmazott szöglépés kétszeresével (mivel a maximális érték körül mindkét irányban végrehajtjuk a finomított keresést), és utóbbi esetén a szöglépés l° , akkor az összefüggés a következőképpen módosul:

$$OP = \left(\frac{32400}{StepSize^2} + 4 \cdot StepSize^2 \right) \cdot m^2, \quad (6)$$

ahol a $StepSize$ paraméter jelöli a szöglépés nagyságát. A (6)-os összefüggés esetén kényelmi okokból a szögeket radián helyett fokban helyettesítettük. Ezzel az átírással analitikusan megkereshető a számítási igény szempontjából legoptimálisabb szöglépés nagysága. A (6)-os összefüggést deriválva majd a deriváltat egyenlővé téve 0-val az optimális szöglépés nagysága az első fázisban $9,487^\circ$. Ahhoz, hogy mind az előzetes keresés, mind a finomított fázis esetén egész számú szöglépést lehessen használni, a 10° -os szöglépés javasolt. Ezzel a választással a számítási igény 40-ed részére csökken ahhoz képest, mintha a teljes tartományt egy lépésben 1° -s lépésenként vizsgálnánk át, azonban a kapott eredmények pontossága nem változik. Ezzel az élettartam meghatározásához szükséges fáradási paraméter értékét kellő pontossággal meghatároztuk, a kritikus sík meghatározása azonban további megfontolásokat igényel, amit a következő fejezetben fogunk ismertetni.

3. A KRITIKUS SÍK MEGHATÁROZÁSA

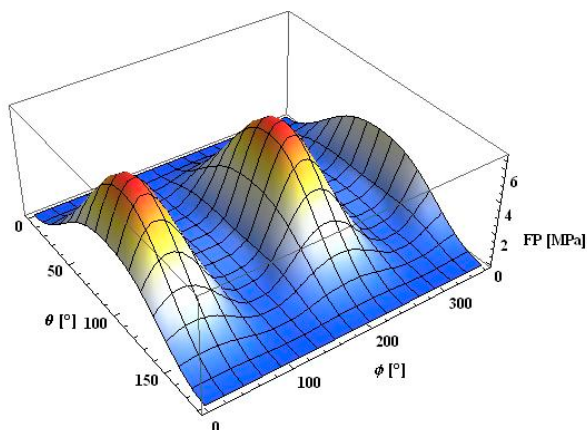
A kritikus sík meghatározása azon a feltevésen alapszik, hogy a tönkremenetet okozó repedés a legnagyobb fáradási paraméterrel jellemzett síkon fog terjedni. A feszültségi és alakváltozási jellemzőket homogén anyagot feltételezve határozzuk meg, azonban a szerkezeti elemek mind tartalmaznak anyaghibákat, szennyező anyagokat és egyéb, a lokális feszültségi és alakváltozási állapotot befolyásoló tényezőket, amelyek feszültségcsúcsokat okoznak, akadályozzák a diszlokációk mozgását, ezzel gátolva a repedés terjedését. Ehhez társul még a főirányok változása is nem arányos terhelés esetén. Ez a hatás jól megfigyelhető a 2. ábrán, ahol egy fárasztóvizsgálat során eltört próbatest látható [9]. A vizsgálat során az EN-GJS-500-14

öntöttvasból készített próbatest terhelése kombinált húzás és csavarás volt arányos terheléssel, és a törés 160 ciklus után következett be. Jól látható, hogy bár a terhelés állandó volt, a repedés a fentebb említett okok miatt többször is irányt váltott a vizsgálat során. Ez alapján helyénvalóbbnak tűnik a



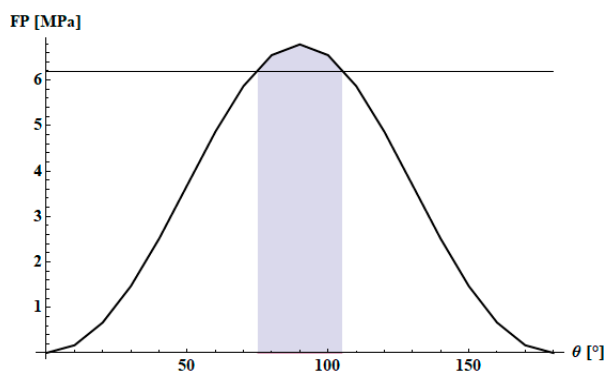
2. ábra. EN-GJS-500-14 próbatest tönkremenetele kombinált húzás-csavarás esetén [9].

repedés síkjára vonatkozóan egy lehetséges szögtartományt kijelölni, amely orientációk között a végső törést okozó repedés terjedni fog. Ez történhet FP maximális értékéhez tartozó sík orientációjától való, %-ban kifejezett eltérés megadásával, vagy az előzetes számítással felvett paraméter térkép segítségével, amikor a lehetséges orientációkat a fáradási paraméter maximális értékétől való eltéréssel definiáljuk. A 2. ábrán bemutatott fárasztóvizsgálathoz tartozó térkép látható a 3. ábrán, amit $J=0,2$ értéket választva kaptunk. Az ábra jól mutatja, hogy FP maximális értéke körül, amit a síkgörbén a piros csúcsok jelentenek, FP értékével arányosan kijelölhető egy szögtartomány, amin belül a repedés az inhomogenitások okozta lokális feszültséggyűjtő helyek miatt kialakulhat, illetve terjedhet. Ebben a példában ezt a tartományt 10%-ban megválasztva azt mondhatjuk, hogy mivel $FP_{max} = 6,8 \text{ MPa}$, így $6,12-6,8 \text{ MPa}$ értékkel rendelkező síkokon várható a repedés terjedése. Az előzetes számítás alapján FP maximális értéke a $\theta = 90^\circ$ és $\varphi = 40^\circ$ -os orientációjú síkon ébred. Az egyes szögek tartományait áttekinthetőbb módon szemléltethetjük, ha az egyik szög állandó értékénél a 3. ábrán látható térgörbéből kimetszünk egy síkot és azt értékéhez tartozó szögek esetén.

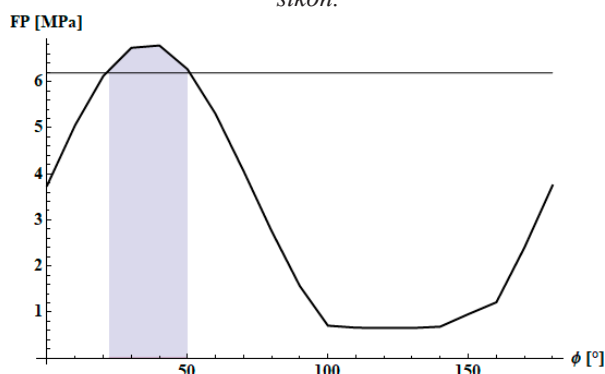


3. ábra. Paraméter térkép.

Az ábrákon jól látszik, hogy FP 10%-os tartománya esetén $\theta \in [75^\circ, 105^\circ]$, míg $\varphi \in [22^\circ, 50^\circ]$. A 2. ábrán látható repedés orientációját a hivatkozott mű szerzői 41° -nak mérték, az ebben a cikkben ismertetett módszerrel FP maximális értéke $\varphi = 35^\circ$ -nál adódott (a θ szög a próbadarab anyagvastagsága mentén definiálva, így itt nem ellenőrizhető). Ha figyelembe vesszük az 5. ábrán kijelölt tartományt, vagyis, hogy a repedés 22° és 50° között várható, akkor megállapíthatjuk, hogy az előrejelzésünk helyes volt és a repedés valóban ebben a tartományban várható.



4. ábra. FP változása θ függvényében a $\varphi = 40^\circ$ -os síkon.



5. ábra. FP változása φ függvényében a $\theta = 90^\circ$ -os síkon.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben a kritikus sík meghatározására szolgáló módszer került ismertetésre. A fáradási paraméter meghatározása egy kétlépéses algoritmus segítségével történt, amivel jelentős számítási kapacitás takarítható meg, és felvehető egy paraméter térkép, amely segítségével a repedés várható orientációja meghatározható, figyelembe véve az anyag inhomogenitásait és a főirányok változását egyaránt. Az eredmények ismeretében a következő konklúziók vonhatók le:

- számítási igény szempontjából a legoptimálisabb választás, amennyiben az első fázisban 10° -os szöglépést alkalmazunk.
- Az ebben a cikkben felhasznált mintapélda esetében FP maximális értékétől 10%-os eltérést feltételezve a vizsgálat során keletkezett repedés az előzetesen felvett tartományba esik.

5. IRODALOMJEGYZÉK

Schijve J., *Fatigue of Structures and Materials*. Springer, 2009.

O. P. Modi, N. Deshmukh, D. P. Mondal, A. K. Jha, A. H. Yegneswaran, and H. K. Khaira, "Effect of interlamellar spacing on the mechanical properties of 0.65% C steel," *Mater Charact*, vol. 46, no. 5, pp. 347–352, May 2001.

W. N. Findley, "A Theory for the Effect of Mean Stress on Fatigue of Metals Under Combined Torsion and Axial Load or Bending-asme/terms-of-use," *Journal of Engineering for Industry*, pp. 301–305, 1959.

L. Poczkán, J. Polák, and T. Kruml, "Comparison of critical plane models based on multiaxial low-cycle fatigue tests of 316L steel," *Int J Fatigue*, vol. 171, Jun. 2023.

A. Karolczuk and E. Macha, "A review of critical plane orientations in multiaxial fatigue failure criteria of metallic materials," *Int J Fract*, vol. 134, no. 3–4, pp. 267–304, Aug. 2005.

Y. Jiang and H. Sehitoglu, "A model for rolling contact failure," *Wear*, vol. 224, pp. 38–49, 1999.

J. Barlow, "Optimal stress locations in finite element models," *Int J Numer Methods Eng*, vol. 10, pp. 243–251, 1976.

S. Döbrentei and P. T. Zwierczyk, "An effective algorithm for critical plane calculation," *ECMS 2025, 39th Proceedings*, pp. 184–189, Jun. 2025.

J. Kraft, A. Linn, M. Wächter, A. Esderts, and M. Vormwald, "Multiaxial fatigue behavior and crack orientation prediction for steel and cast iron," *Int J Fatigue*, vol. 183, Jun. 2024.

A KERÉK KÉSŐI FELTALÁLÁSA ÉS A TERMÉSZETES MINTÁK HIÁNYA, MINT TECHNOLÓGIAI KORLÁT

THE LATE INVENTION OF THE WHEEL AND THE LACK OF NATURAL PATTERNS AS A TECHNOLOGICAL CONSTRAINT

Dr. Dömötör Csaba*

ABSTRACT

The article analyses the hypothesis that the main reason for the late appearance of the wheel for transportation is that there is no direct model in nature that humans could have copied. Therefore, the wheel is more of an abstract, engineering breakthrough than a biomimetic invention. In this study, we will see whether we can still recognise structures in nature that resemble wheels.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki gyakorlatban gyakran létező megoldások másolásával, átalakításával, fejlesztésével, röviden adaptálásával hozunk létre új szerkezeteket. Az ötlet forrása sokszor a természet, hiszen benne az evolúció során kifejlődött és akár évezredek alatt tökéletesedett megoldások állnak rendelkezésünkre. Számos emberi találmány ezért a természet által inspirált tudatalatti intuíció hatására jött létre. A tengely-kerék kapcsolat azonban nem ilyen.

Ez a cikk azt a hipotézist vizsgálja meg, miszerint a kerék késői megjelenésének egyik oka az lehetett, hogy természetben nincs rá közvetlen minta, amit az ember lemásolhatott volna.

2. PROBLÉMAFELVETÉS

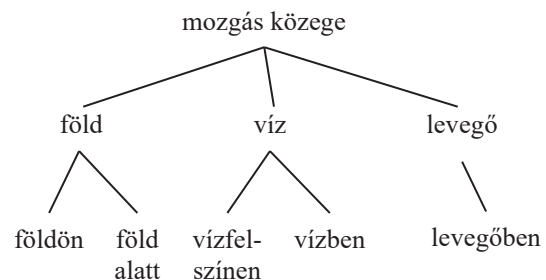
A történészek, antropológusok és mérnökök többsége egyetért abban, hogy a kerék feltalálása viszonylag későn történt meg az emberiség technológiai fejlődéséhez képest. Az első ismert kerék nyomai i.e. 3500 környékéről. Mezopotámiából származnak, de azt még nem köz-lekedésre, hanem fazekaskorongként használták. A helyváltoztatásra használt kerek járművek csak 500 évvel később, i.e. 3000 körül jelentek meg. Ekkorra az emberiség már:

- mezőgazdasági tevékenységet folytatott (kb.i.e.10000),
- több szintes épületeket épített (kb.i.e.7500),
- öntözőrendszereket használt (kb.i.e.6000),
- fémeket munkált meg (kb.i.e.5000),
- városokat alapított (kb.i.e.4000),
- írást fejlesztett ki (kb.i.e.3200),
- komplex társadalmakat hozott létre (kb.i.e.3000).

3. HELYVÁLTOZTATÁS KÖZEGEI

A természeti rendszerek többségének működéséhez hozzá tartozik a mozgás valamilyen szabad szemmel látható vagy mikroszkopikus formája. Ezek tanulmányozását jelen vizsgálat szempontjából célszerű leszűkíteni a kifejezetten helyváltoztatást megvalósító mechanizmusok vizsgálatára. A helyváltoztatás különböző halmazállapotú közegekben jöhet létre, ami az 1. ábrán bemutatott rendszerezés alapját jelenti.

A közeg halmazállapota, sűrűsége és egyéb jellemzői befolyásolják a rajta vagy benne történő mozgást. Egy test mindig részben vagy egészben egy másik közeg belsejében mozog, amiben rá olyan erő hat, amely a mozgását általában akadályozni igyekszik. Ez az elmozdulás irányával párhuzamos, de vele ellentétes irányú erőkomponens a közegellenállási erő, amit az élőlények energiafelhasználásuk optimalizálásához mindig minimálisra igyekeznek csökkenteni.



1. ábra A helyváltoztatás csoportosítása a mozgó test és a közeg viszonya szerint

De több lehetőség is kínálkozik a mozgásból származó járulékos jelenségek, így például a test adott közegben való relatív elmozdulásának irányára merőleges komponensek kiaknázására is. Megemlíthető a dinamikai felhajtóerő vagy a leszorító erő, melyek a mérnöki megoldásokban és az élőlények esetében egyaránt könnyen munkavégzésre bírhatók. Ehhez hasonlóan a nyugvó folyadékokban és gázokban megfigyelhető felfelé irányuló felhajtó erő, illetve a Föld tömegvonzásából származó lefelé irányuló nehézségi erő is mozgás elősegítője lehet, ahogyan az áramló közegek

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

impulzuserő hatására létrejövő szállítóképességének kihasználása is gyakori az élővilágban.

4. A KÖZEGELLENÁLLÁS LEGYŐZÉSE

Levegőben és vízben történő nagyobb sebességű mozgás esetén az egyik legfontosabb feladat a közegellenállás legyőzése. Az ember már nagyon hamar rájött arra, hogy a közegellenállási erő mértéke nagyban függ az azonos körülmények között mozgó objektumok alakjától. Mivel a közeg sűrűségén és a kívánt sebességen nehézkes változtatni, az erő csökkentéséhez célszerű a test alakjának minél áramvonalasabb kialakítása. Ez az oldalfelületen létrejövő súrlódási ellenállás csökkentésével, valamint a kialakuló áramlás test előtti lassulásának, illetve a test mögött létrejövő örvénylésnek minél hatékonyabb kiküszöbölésével érhető el. Amikor ezzel ellentétben a közegellenállási erő kihasználása a cél, akkor is a test alakjának megváltoztatása jelenti a legegyszerűbb megoldást, hiszen a relatív áramlás irányára merőleges keresztmetszet növelésével egyenes arányban nő a testre ható erő nagysága is.

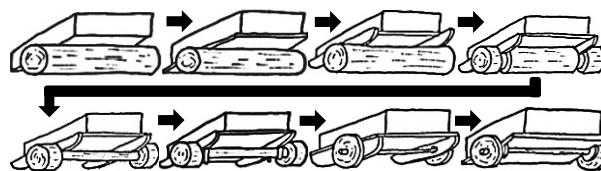
5. MOZGÁS SZILÁRD FELÜLETEN

Amikor szilárd felületen történik a helyváltoztatás, legegyszerűbb esetben a felület közel vízszintes, tömör és viszonylag nagy súrlódási tényezővel bír. A feladat specializálódik, ha a talaj kevésbé masszív (pl. homokdűne), ha nagyon kicsi a súrlódási tényező (pl. jég), vagy ha a felület a vízszinteshez képest nagyobb szöget zár be (pl. sziklafal). Szükségszerűen a természetben minden esetre alakultak ki megoldások.

A Mezopotámiából, azaz a mai Irak területéről származó régészeti bizonyítékok alapján szilárd talajon történő mozgáshoz a mérnökök az i.e. 3000-es évek óta terveznek kerekeken guruló járműveket. Egy 2015-ös kutatás szerint viszont akár már i.e. 3900 környékén is megjelenhetett az első helyváltoztatásra használt kerék a Kárpátok rézérc bányáiban Délkelet-Európában. A térségben végzett ásatások során több agyagból készült négykerekű kocsimodellt találtak a régészek, ami szintén megerősíti ezt a feltételezést [2, 3].

Ez alapján a kerék meglehetősen régi találmánynak tűnik, a kutatók mégis úgy vélik, hogy az emberi civilizáció technológiai színvonalának fejlődéséhez képest a tengely-kerék kapcsolatot viszonylag későn sikerült kifejleszteni [1].

Ennek oka bár összetett, viszont jelen vizsgálat feltételezéséből kiindulva egyértelműnek tűnik, hogy mindehhez nagyban hozzájárulhatott az a tény is, hogy a kerékre az élővilágban mai napig nem találtak olyan funkcionális analógiát, amely a természeti népek számára intuíción alapul szolgált volna ezen eszköz megalkotásához. A természetes mozgásformák (úszás, repülés, mászás) nem inspirálták a kerék koncepcióját. Ezért a kerék sokkal inkább egy absztrakt mérnöki áttörés lett, mintsem egy biomimetikus találmány.



2. ábra A kerék feltalálásának lehetséges állomásai [1]

Bár magára a guruló helyváltoztatásra a természet is mutat számos példát, mégis a valódi értelemben vett kerék napjainkig az emberiség egyedi találmánya maradt. Ennek fő oka gépszerkezettani szempontból az, hogy a tengely-kerék kapcsolat legalább két különálló, egymáson elforduló, ennek következtében folyamatosan súrlódó testet feltételez. Egy élő szervezetben az efféle kényszerkapcsolat problematikája abban keresendő, hogy elégséges kenés nélkül a nagy kopás miatt csak igen rövid élettartammal működhet, de ugyanígy felveti a meghajtásnak, valamint a testrészek működéséhez elengedhetetlen testnedvek keringetésének vagy épp az idegrendszeri ingerületek átadásának kérdését is.

6. INSPIRÁCIÓ A TERMÉSZETBŐL

Az emberi találmányok gyakran természetes minták utánzása révén születnek:

- repülés → madarak,
- hajók → vízi élőlények,
- házipírás → barlangok, fészkek,
- hálózatok → gombák, gyökérzet.

Ezzel szemben a kerék működése absztrakt mechanikai elvek összessége, amelyhez minta hiányában önálló geometriai és fizikai megértés szükséges (forgás, tengely, súrlódás csökkentése, anyagmegmunkálás). A kerék ráadásul nemcsak egy kör alakú tárgy, hanem egy működő rendszer része, ahol technikai nehézséget jelent a tengely és agy illesztése, a stabilitás kérdése (többnyire csak párban használható), vagy a teherbírás és önsúly problémaköre. Ezek felismeréséhez és megoldásához összetett mérnöki gondolkodás kellett, amit csak bizonyos társadalmi és technológiai fejlettségi szinten lehetett megvalósítani. [8, 9]



3. ábra Ókori gyermekjáték (ie. 950-900) [4]

A kerék technológiailag sem triviális, hiszen viszonylag precíz megmunkálást igényel a tengely és a kerék megfelelő illesztéséhez. Elkészítéséhez megfelelő anyag kellett, ami elég tartós, de megmunkálható (kő,

keményfa). Ráadásul a használhatósága is kérdéses, ha épp nincsenek kellően sima utak, amiket szintén ki kellett építeni. Érdekesség, hogy például az inka birodalomban, sosem használták a kereket közlekedésre, mivel a hegyes terepükön nem volt praktikus. Pedig magát a koncepciót ismerték és pl. játékokban alkalmazták is. (3. *ábra*)

A kerék tehát nem egyetlen nép vagy személy találmánya, hanem egy összetett technológiai fejlődés eredménye, amely több régióban párhuzamosan, illetve egymástól függetlenül alakult ki.

7. A KERÉK FEJLŐDÉSE

Az első kerekek tömör fából (helyenként kőből faragva) készültek. Az i.e. 2600-2500 környékéről ismert sumér harci szekerek is még ilyenekkel voltak szerelve. Ezek a járművek viszont nem voltak gyorsak, inkább a gyalogság támogatására szolgáltak.

A küllös kerék i.e. 2000 körül tűnt fel, szintén főként harci szekereken. Ekkor jelenik meg a középső kerékagy, amelyből küllők vezettek a peremhez. Ez tekinthető a kerék egyik legfontosabb technológiai újításának, amely jelentős előrelépést hozott a mobilitás, sebesség és hatékonyság terén, hiszen könnyebb volt, mint a korábbi tömör korongkerék, és jobban irányítható, ami különösen fontos volt a hadviselésben. A legkorábbi régészeti leletek Mezopotámiából, Óegyiptomból, a szkítáktól és ógörögöktől származnak [5].

Később a fakerék peremére vasabroncsot helyeztek. Ezt felhevítve illesztették rá, ami lehűtve szorosan összetartotta a szerkezetet. Hamar rájöttek, hogy a tengely és kerékagy a korábban megszokottnál komolyabb kenést igényel a súrlódás csökkentésére és a hatékonyság növelésére. Emiatt a korai időkben használt, víz és sár helyett áttértek a növényi olajok (pl. olívaolaj, lenolaj, ricinusolaj), az állati zsírok (pl. marhafaggyú vagy sertészsír), helyenként méhviasz, illetve fagyanta használatára. A 19-20. században robbanásszerű fejlődés következett be a kerékpárok és autók kifejlesztésekor, amikor megjelentek a modern drótküllös kerekek, valamint a légtömölös gumiabroncsok.

8. ANALÓGIÁK A TERMÉSZETBŐL

A kutatásokból egyértelműnek tűnik, hogy hagyományos tengely-agy kapcsolattal rendelkező kerék a természetben nem alakult ki. Azonban a guruló mozgás jelen van. A sima felületen történő kétdimenziós gördülésre a gömb a legalkalmasabb. Erre több megoldás található a természetben, ahogyan a csapágygolyók is a gépek alapvető alkotóelemeivé váltak.

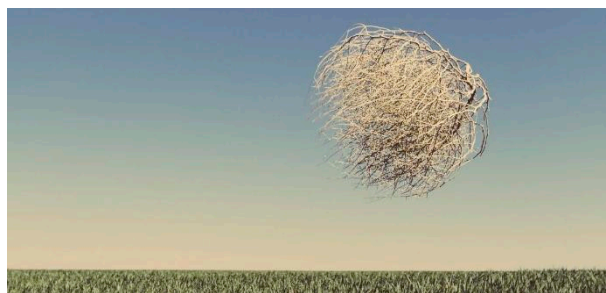


4. *ábra* Az ászkarak gömb alakja

Bár az első golyóscsapágy szabadalom a 18. század végén került bejegyzésre, az ötlet valójában a természet megfigyelésén alapuló ókori találmánynak tekinthető, hiszen i.e.100 körül a rómaiak, sőt görögök formában a vándorló gótok és vandálok is használták.

A gördülés kihasználásának passzív módja a természetben, amikor egy (akár védekezésért össze-gömbölyödő gömbászka vagy épp armadillo) golyót formáló teste önkéntelenül arrébb gurul (4. *ábra*).

Ugyanígy passzív, mégis tervezett a pusztákról és prériről ismert „ördögszekér”, ami a mezei iringó, (más területeken a homoki ballagófű) népies neve. Ez a növény ősszel a tövétől leszakadva gömb alakja lévén a szél által sodorva messzire tudja elszórni magjait, gondoskodva ezzel a populáció terjedéséről. (5. *ábra*)



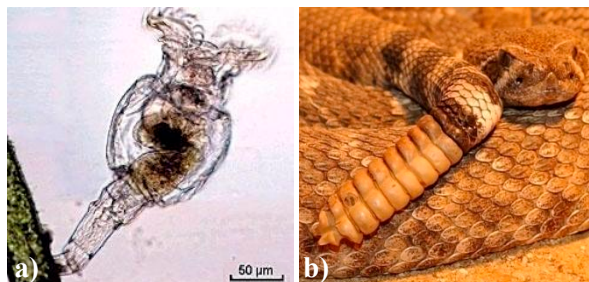
5. *ábra* Ördögszekér mozgásban

De egyes élőlények nemcsak hogy tudatosan, de önerejükkel képesek gördüléses helyváltoztatásra. A délnyugat-afrikai Namib-sivatagban, majd később a Szaharában is találtak olyan pókot (*Araneus rota*) (6. *ábra*), ami lábait kerékké gömbölyítve gurul a homokdűnéken. Erős lábai segítségével ezek a pókok futva másodpercenként 1 métert képesek megtenni, viszont ez az érték gurulva 2 méterre nő, ami komoly stratégiai előny a meneküléshez. [6]



6. *ábra* Szaharai gurulópók

A kerék analógiáját keresve az elsők között szokták említeni a kerekeshérgest (Rotatoria). Felfedezője, Anton van Leeuwenhoek kezdetben még úgy vélte, ezek

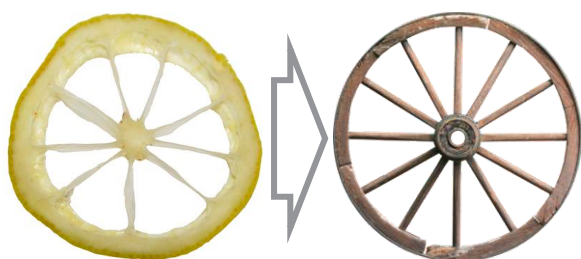


7. *ábra* a) Kerekeshérges b) A csörgőkígyó szarugyűrűi

a parányi állatok tényleg kerek segítségével közlekednek. A részletesebb vizsgálat során kiderült, hogy ez csak érzécsalódás, amit valójában a két, egymással szemben körbefutó csillógyűrű rendezett csapkodása kelt. (7.a ábra) [7]

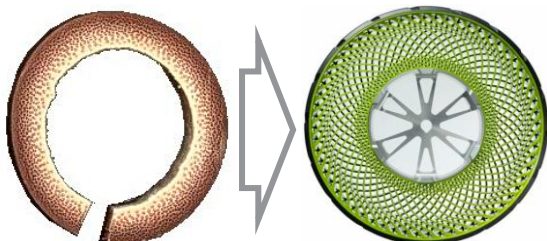
Ha viszont egymástól elkülönülve mozgó alkatrészeket keresünk, akkor a csörgőkígyók vedlésenként visszamaradó szarugyűrűi jelenthetnek jó példát. Azonban ezek a gyűrűk egymáshoz viszonyítva csak minimális mozgásra képesek, így nem jelenthettek inspirációt a forgó kerek feltalálásához. (7.b ábra)

Jóval látványosabb analógiát mutat a kerék küllős változatára a citrusfélék keresztmetszete (8. ábra). Az evolúciós konstrukció célja a szükséges merevség biztosítása mellett a közép vonaltól azonos távolságban tartani a külső felületet. Apró különbség, hogy a gyümölcs belső hátyái húzás igénybevételét felvéve biztosítják a termés merevségét. [8]



8. ábra A kerék formai megfelelője a citrusskarika

A legmodernebb levegőmentes kerekknél pedig a bambusz nád belső szerkezetével fedezhető fel formai hasonlóság. Itt teherviselés szempontjából sugárirányban szükséges rugalmasság és tengelyirányban megkövetelt oldaltartás jelent további párhuzamot. (9. ábra)



9. ábra A bambusz és a Bridgestone laprugós kereke

Havon, jégen vagy puha talajon, amikor a hajtóerő átvitelének feladatát is nehezebb megoldani, az ember számára a mélyen bordázott kerek vagy a lánc talpas eszközök biztosítják a haladás lehetőségét. Az állatok ezzel szemben kemény, puha vagy csúszós talajon is inkább lépkednek, ugrálnak, csúsznak vagy a feregmozgás változatait alkalmazzák.

A természetben igen elterjedt, de jóval több és bonyolultabb alkatrészrel és komplexebb vezérléssel megvalósítható lépegetést, mint helyváltoztatási elvet, robotokban és különleges gépekben az ember is alkalmazza, bár korántsem olyan széleskörűen, mint az élőlények. Mivel azonban speciális körülmények között megkerülhetetlen a lépegető robotok használata, így

napjainkban – a főként még mindig csak a kutatás-fejlesztés területein terjedőben lévő humanoid robotok mellett – már léteznek ipari feladatokat ellátó lépegető gépek is. (10. ábra)



10. ábra a) John Deere traktor b) Tesla Optimus Gen2

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Belátható, hogy a kerék absztrakt, nem természet által ihletett konstrukció, ami az emberi leleményességet és kreativitást jól bizonyítja. De bármennyire is hízog ez ránk nézve, be kell látni, hogy a találmányaink nagyobbik része a természet által inspirálva, azt leutánozva született. Ennek megfelelően a modern mérnöktudományok sem nélkülözhetik a természet megfigyelését és az onnan merített adaptációt.

8. IRODALOM

- [1] Robert Krulwich: *Why'd it take so long to invent the wheel?*, NPR 2011.09.16., <http://www.npr.org/blogs/krulwich/2011/09/15/140508448/whyd-it-take-solong-to-invent-the-wheel>
- [2] Richard W. Bulliet: *The Wheel - Inventions and Reinventions*, Columbia University Press, 2016, eBook ISBN 9780231540612 <https://doi.org/10.7312/bull17338>
- [3] Kai James: *How was the wheel invented?*, The Conversation, 2025, <https://doi.org/10.64628/AAL.dg9nv76p7>
- [4] Rose Barfield: *Who Invented the Wheel - A Brief History*, Blog Bricsys, 2020, <https://www.bricsys.com/it-it/blog/who-invented-the-wheel-a-brief-history>
- [5] Tarr László: *A kocs története*, Corvina, Budapest, 1978, ISBN 9631300323
- [6] <https://www.haziallat.hu/terrarium/izeltlabu-fajok/gurulo-pokfaj-a-szaharaban/2426/>
- [7] Horváth Árpád: *Ötletadó kerekfűgerek*, National Geographic Magyarország, 2009. november
- [8] Dömötör Csaba: *A természeti intuíció hatása a termékfejlesztés gyakorlatára*, GÉP 65: 2 pp. 23-26. 2014
- [9] Dömötör Csaba: *Természeti analógiák adatbázisa, statisztikai elemzése és alkalmazási módszerei a koncepcionális tervezésben*. PhD értekezés ME 2015

HEGESZTÉSI SZIMULÁCIÓK TAPASZTALATAI

EXPERIENCES OF WELDING SIMULATIONS

Dömötör Dávid*, Tóth Dániel*, Farkas Róbert Dávid*, Horváth Dániel**, Dr. Hány András***

ABSTRACT

The goal of the research was to validate a real welding project using measurements and numerical simulation (Final Element Method). The purpose was to confirm that the welding task requirements match the measured behaviour (mainly the displacement and the Heat Affected Zone) and to document the verification process.



1. ábra A lemezek lefogatása

1. BEVEZETÉS

A projekt első szakaszának feladata volt a hegesztési környezet megismerése és a feladat szimulációs körülményeinek feltárása volt. Ezt kezdetekben a szükséges szakmai megalapozás, mint például a kapcsolódó hegesztésméleti szakirodalom kutatása, illetve a szimulációs szoftverek ipari piacon belül betöltött szerepének megismerése jelentette. Ezt követte a szimulációs műveletek kidolgozása és a szimulációk lefuttatása, majd kiértékelése. A kutatás sajátossága volt, hogy a szimulációs környezetet az előzetesen elkészített, valós ipari környezetben létrehozott darabok alapján kellett megalkotni. Ezáltal a kutatás fő eredménye, hogy a létrehozott szimulációs következtetések és a kidolgozott technológiai szimulációs modell alapján további kutatások és pontosabb szimulációk végezhetők a jövőben.

2. A RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ VALÓS TERMÉK ADATOK

2.1. A hegesztés paraméterei

A kutatás feladata annak elemzése volt, hogy azonos technológiai paraméterek mellett, különböző MAG hegesztési technológiák (impulzusos és nem impulzusos) és eltérő hegesztőberendezések hogyan befolyásolják a hegesztett munkadarab deformációját és varratgeometriáját. [1]-[4]

A hegesztési teszthez használt **S235** lemezek mérete 125x100x10 mm volt, melyek összehegesztése tompa varrattal történt, a lemezek 60°-os leélezés került kialakításra.

Az eljárás során alkalmazott hegesztési paraméterek:

- Feszültség: 21 V
- Áramerősség: 130 A
- Huzal előtolás: 4,1 m/perc
- Huzal típus: G3SI 1,2
- Ívhossz korrekció: 1
- Gázáram: 13 l/perc

2.2. Az elmozdulások paraméterei és csiszolati képek

1. táblázat A vizsgálat során mért deformációk

	Megnevezés	Pont pozíció			Relatív elmozdulás (mm)	Hegesztési sebesség (cm/min)
		x	y	z		
I: 1. gép-impulzus	F1	0,184	0,083	2,847	2,862	16,30
	F2	0,086	0,032	1,268	1,271	16,30
	F3	0,241	0,05	1,853	1,869	17,86
	F4	0,089	0,093	0,431	0,45	17,86
	F5	0,198	0,552	0,034	0,587	18,29
II: 1. gép-nem impulzus	FS1	0,08	0,284	0,893	0,94	17,86
	FS2	0,02	0,038	0,652	0,653	17,05
	FS3	0,291	0,154	0,666	0,743	17,44
	FS4	0,127	0,022	0,623	0,636	18,29
	FS5	0,161	0,174	0,53	0,581	16,67
III: 2. gép-impulzus	V1	0,507	0,516	0,963	1,204	17,44
	V2	0,284	0,159	0,584	0,669	19,74
	V3	0,122	0,247	0,191	0,335	19,23
	V4	0,005	0,042	1,267	1,268	17,44
	V5	0,22	0,239	0,216	0,39	19,23

* ZalaZONE Ipari Park Zrt. duális mérnök hallgató – Pannon Egyetem

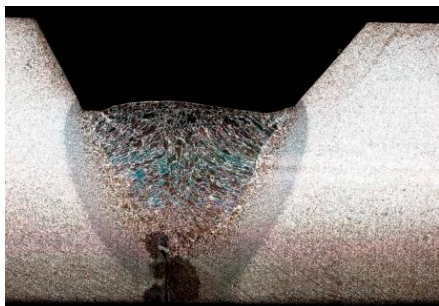
** TC-Zone Mérnöki Kft., vezető mérnök

*** ZalaZONE Ipari Park Zrt. vezérigazgató

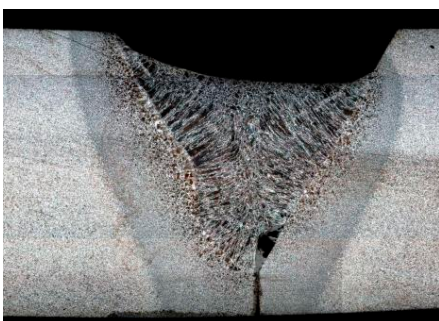
Az elkészült varratok mikroszkópos vizsgálatának képei a 2-4. ábrákon láthatók.



2. ábra 1.gép impulzusos varratgeometria



3. ábra 1.gép nem impulzusos varratgeometria

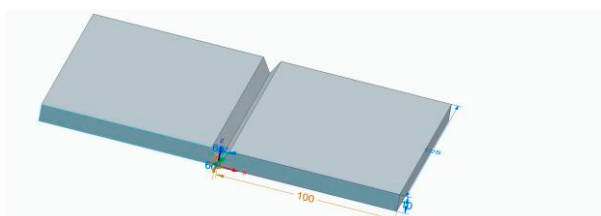


4. ábra 2.gép impulzusos varratgeometria

3. SZIMULÁCIÓ KIVITELEZÉSE

3.1. A modellek megalkotása

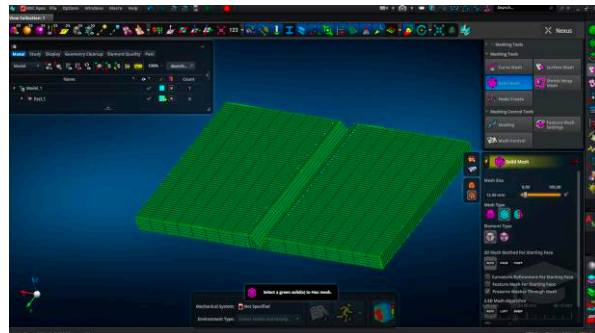
A szimulációhoz szükséges termékmodelleket létre lehet hozni CAD tervező programok segítségével, a jelen esetben ez a *SolidEdge* szoftverrel történt. Fontos volt, hogy ezeket .stl vagy .STEP/ .STP fájlformátumba kellett kimenteni a szimulációs szoftverhez.



5. ábra Az adott lemezek geometriája, összeillesztett állapotban

3.2. A modellek hálózása [Meshing]

A modellek hálózásához a *Hexagon: MSC Apex 2024.1. Student Edition* szoftverét volt ideális alkalmazni, mivel a szimulációhoz használt Simufact Welding ezzel kompatibilis, illetve ez a hálózó szoftver kifejezetten a FEM [Final Element Method] szoftverekhez készült.



6. ábra Modell a hálózási folyamat végétével

A létrehozott, lehálózott modellt .bdf formátumban szükséges exportálni az alkatrészre, ügyelve a helyes SI mértékegység megadására. (A Simufact a továbbiakban a .bdf formátumú modelleket jól tudja kezelni.) A varrat és a hőhatásövezet mentén célszerű minél részletesebb hálózást megadni, mivel a főbb termikus- és azokból létrejövő fizikai/ mechanikai hatások ott jönnek létre [5]-[7]. Annál pontosabb számítást tud létrehozni a szimuláció, minél kisebbek, minél részletesebbek az egyes kvantált részek, ugyanakkor így értelemszerűen nő a számítási idő. A nagyobb rácsozatú hálózás a geometria hátralévő részén, a szimuláció gyorsabb lefuttatását segíti elő. Az eljárás során reprezentatív szimulációkkal tesztelve került meghatározásra, hogy melyik modell adja a legpontosabb és mégis viszonylag gyors szimuláció lefutást.

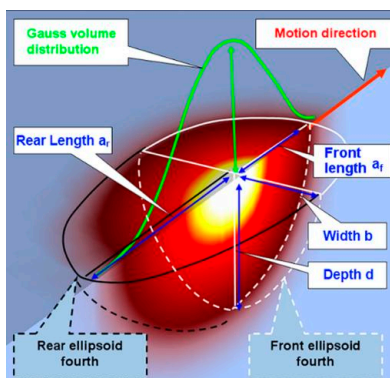


7. ábra Varratgeometria hálózása

3.3. A szimuláció felépítése

A kutatási projekt során alkalmazott Simufact program a gyártani kívánt termékek hegesztési szimulációjával hozzájárul a technológia költséghatékonyságához a gyakorlatban. A szoftver segítségével különféle anyagok hegesztése szimulálható és kimutatható azok hegeszthetősége, valamint elemezhető a geometriai elváltozások mértéke. A

Simufact Welding előnye, hogy több évtizede tesztelt és jóváhagyott hőforrásokat használ. Ezek a hőforrás modellek lényegében az olvadt fémfűrdő belsejében létrejövő energiaeloszlás matematikai leírásai.



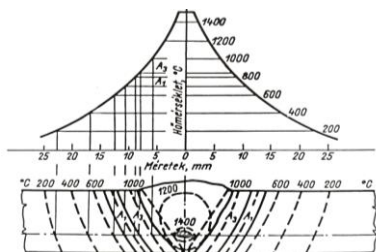
8. ábra Ívhegesztéshez használt Goldak modell paraméterei

Méretek meghatározása a szoftver ajánlása szerint, a valós geometriák méretei alapján történt, ahol:

- b = a hegfűrdő szélességének a fele
- d = varrat magassága
- $a_f = 0,6 \cdot b$
- $a_r = 2 \dots 2,5 \cdot b$ [8]

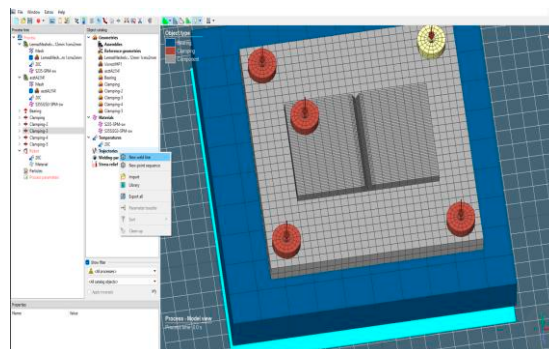
A kialakuló varratgeometria során a következő, szakirodalmi alapú technológiai sajátosságokat vettük figyelembe:

„A hegesztés során olyan hőmérséklet- eloszlással van dolgunk, amelyet a 8. ábrán tüntettünk fel. A vonalkázott folt a hőforrás, ill. a folyékony állapotban lévő anyag pillanatnyi elhelyezkedését jelenti. E körül a legmelegebb folt körül helyezkednek el a kisebb hőmérsékletű izotermák, amelyeket a varrat keresztmetszetének síkjában szemléltetünk. A varrat közelében az alapanyag az ugyancsak bejelölt A_3 hőmérséklet fölé melegszik; itt az alapanyag ausztenitesedik, mégpedig annál durvább szemcsenagysággal, minél nagyobb a hőmérséklet. A réstől távolabb a felmelegedés csak A_1 -et haladja meg, A_3 -at azonban már nem. Ebben a részben az alapanyag perlitje ausztenitté alakul, a ferrit oldódása azonban nem fejeződik be; az alapanyagban az A_1 izotermán is kívül eső részében átalakulás nincsen, itt legfeljebb olyan változás lehetséges, amely A_1 -nél kisebb hőmérsékleten megy végbe (szegregációs folyamatok, öregedés) [9].”



9. ábra A hőmérséklet eloszlása az ívhegesztés körül

A szimulációban létrehozott, a valósággal közel megegyező környezet tartalmazta annak technikai és fizikai paramétereit egyaránt.



10. ábra Geometriák és szimulációs környezet felépítése munkafolyamat közben

3.4. A szimuláció futtatása

A futtatni kívánt szimulációk csoportokra bontása a hegesztési típus, hatásfok, hegesztési sebesség szerint történt. A hegesztés során (oszillátorral) monitorozott áramerősség átlaga, illetve egységes feszültség a 2. táblázatban került összefoglalásra.

2. táblázat

Fő jellemzők	1. gép, Impulzusos			1. gép, Nem impulzusos			2. gép, Impulzus		
Hegesztési paraméter	Áramerősség: 138,63A Feszültség21V			Áramerősség: 139,6A Feszültség21V			Áramerősség: 177,08A Feszültség21V		
Hatásfok	0,75	0,8	0,85	0,75	0,8	0,85	0,75	0,8	0,85
Mért Hegesztési sebesség (v _c) [cm/min]	16,3	16,3	16,3	16,67	16,67	16,67	17,44	17,44	17,44
	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	17,44	19,23	19,23	19,23
	18,29	18,29	18,29	17,86	17,86	17,86	19,47	19,47	19,47
Átlagos Hegesztési sebesség (v _c) [cm/min]	17,322	17,322	17,322	17,462	17,462	17,462	18,616	18,616	18,616

További paraméterként, minden esetben a:

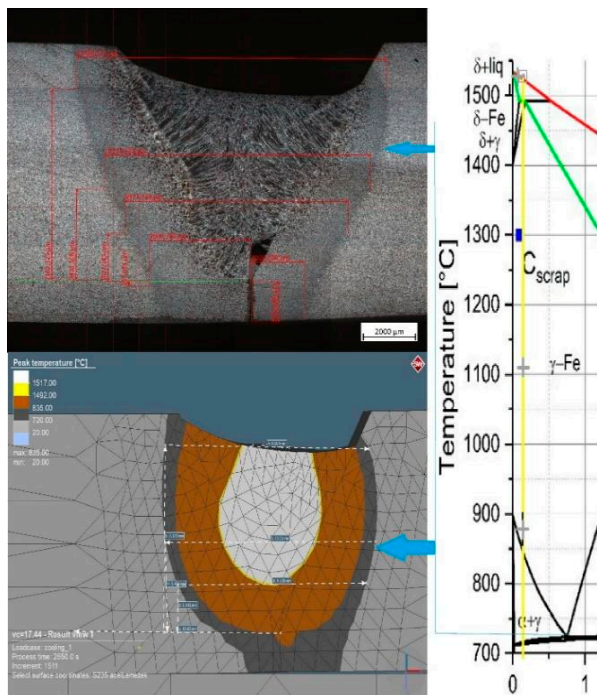
- huzalelőtolási sebességet: 4,1 [m/ perc],
- huzalátmérőt: 1,2 [mm],
- védőgázáramot: 13 [l/perc]

értékre állítottuk be.

A szimulációban egyéb eltérések már csak a varratgeometriákban, illetve a hegesztőhuzal dőlési szögében voltak.

4. EREDMÉNYEK VALIDÁLÁSA

A legjobban sikerült szimulációs eredményeket, melyek deformációban a legkisebb hibaszázalékos eltérést adták összehasonlítva a valós eredményekkel további vizsgálatoknak vetettük alá (hőhatásövezet mérete, beolvadás aránya, fázisátalakulások léptéke). A termikus határokat [8] és [10] szakirodalmak alapján határoztuk meg.



11. ábra A csiszolati- és szimulációs hőhatásövezet összevetése méretekkel

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Mivel a tényleges darabok nem kimondottan erre a hegesztési szimulációs projektre készültek, ezért származtak ebből adódó eltérések, ezek megfontolásai a következők:

- csiszolati képek kimondottan ott készültek, ahol értékelhető hegesztés történt, így azok ideális keresztmetszete került be a szimulációs varratsorra;
- a gyakorlatban készült darabon kézi hegesztést alkalmaztak, amely kevésbé jó minőségű, mint például egy hegesztőroboté;
- kapott 3 db csiszolati kép közül nem volt előzetes információ, hogy azok melyik konkrét hegesztési sebességhez tartozó varrathoz tartoztak, így számos reprezentatív szimulációra volt szükség.

Ezen szimulációk (összesen 42 db) összesen: 723 óra 57 perc 27 másodperc [~30nap] lefutási időt-, és több mint 2TB tárhelyet vettek igénybe.

6. SUMMARY

Since the industrial parts were not specifically prepared for this welding simulation project, there were some challenges and deviations, considerations are:

- the sample images were prepared specifically where the evaluable weld occurred, so their ideal cross-section was used along the simulated weld line;
- manual welding was used, which results in less stable quality than, for example, a welding robot;
- furthermore, among the 3 sample images we received, there was no information forehand, which specific weld belongs to which welding speed, so many representative simulations were needed.

These simulations (42 in total) took a total of 723 hours 57 minutes 27 seconds [~30 days] of runtime and more than 2 TB of storage.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A jelen projekt a ZalaZONE Ipari Park Zrt. és a Pannon Egyetem Zalaegerszegi Egyetemi Központ támogatásával készült. Kiemelt köszönet illeti Dr. Hány András, Horváth Dánielt, Szabó Rolandot, Balogh Diánát és Decsi Pétert a mentorálásért és segítségért.

8. IRODALOM

- [1] Bermejo M. A. V. (2015): Effect of welding position on properties of duplex and superduplex stainless steel circumferential welds; International Institute of Welding; 2015
- [2] Gáspár, M. (2019): Effect of Welding Heat Input on Simulated HAZ Areas in S960QL High Strength Steel; 2019
- [3] Kristóf, Cs. (2017): Ívhegesztés hőbevitelének meghatározása és mérése, Hegesztéstechnika XXVII. Évf. 2017. 3. szám
- [4] Kumar A., Debroy T. (2007): Heat Transfer and Fluid Flow during Gas-Metal Arc Fillet Welding for Various Joint Configurations and Welding Positions; The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International; Vol. 38A pp. 506-519; 2007
- [5] M. Matuszewski, R. Koňár, D. Harmanik, and A. Zaborski, „Computational methods of heat affected zone determination during Arc Weld surfacing”, METAL 2020, 2020, p. 381–386. doi: 10.37904/metal.2020.3531.
- [6] Y.-H. Han, H.-B. Lim, T.-S. Shin, és H.-I. Yang, „Prediction of Welding Deformation Using the Thermal Elastic–Plastic Finite Element Method by Considering Welding Interpass Temperature”, Materials, köt. 17, sz. 15, o. 3656, júl. 2024, doi: 10.3390/ma17153656.
- [7] C. Pyo, J. Kim, és J. Kim, „Estimation of Heat Source Model’s Parameters for GMAW with Non-linear Global Optimization—Part I: Application of Multi-island Genetic Algorithm”, Metals, köt. 10, sz. 7, o. 885, júl. 2020, doi: 10.3390/met10070885
- [8] Simufact Engineering GmbH: Simufact Welding Tutorial, 2018.
- [9] Dr. Verő József, Dr. Káldor Mihály: Vasötvözetek fémtena, MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ, Budapest, 1987, ISBN: 963 10 7160 X
- [10] G. Elzbieta és J. Winczek, „Numerical study of thermal and structural strains in multipass GMAW surfacing and rebuilding”, 2015.

AZ ÁGYÉKI PORCKORONGPÓTLÁS FEJLŐDÉSE

THE EVOLUTION OF LUMBAR TOTAL DISC REPLACEMENT (LTDR): RESEARCH TRENDS OF DEVICE DESIGN, BIOMECHANICS, AND CLINICAL OUTCOMES

Katreen Ebrahim*, Dr. Szabolcs Szávai**

ABSTRACT

Lumbar total disc replacement (LTDR) has emerged as a motion-preserving surgical for treating degenerative disc disease (DDD). This article reviews the evolution of LTDR technology with emphasis on advances in device design, biomechanical research, and clinical performance. The integration of finite element analysis (FEA) and biomechanics has enabled more precise optimization of implant design and material properties. Clinical potential evidence indicates that modern LTDRs can maintain spinal mobility with long-term performance and personalized models challenges. Future research in biomimetic materials, and additive manufacturing (AM), and FEA-based optimization is expected to drive the next generation of personalized, durable disc replacement technologies.

been used in clinical practice in recent years. The age of the ideal TDR candidate is considered to be 18–60 years, optimally below 50 years, with back pain severe enough to impact activities of daily living and work. L-TDR was mainly unitized to one- or two-level discogenic back pain in the absence of radiculopathy. Generally, TDR devices are implanted in the body to achieve therapeutic results since from 1980s–1990s. However, the lack of functional and mechanical properties restricts the clinical outcomes and commercial transformation. The latest advances in structures, materials, and processing technologies are accelerating the development of implants, paving the way for multi-function and high performance, especially with regard to personalized customization.

The present work reviews the evolution of lumbar total disc replacement (LTDR), highlighting major research trends in device design, biomechanical understanding, and clinical performance.

1. INTRODUCTION

Lower back pain (LBP) has increasingly become a worldwide major public health issue. The lifetime prevalence of lower back pain has been reported to be as high as 84%, with nearly a quarter of the population suffering from chronic lower back pain and 11–12% of the population disabled by lower back pain. Lower back and neck pain causes more disability than any other disease, thus leads to serious social and economic consequences. Lower back and neck pain are thought to be closely associated with degeneration of the intervertebral disc (IVD).

Current, clinical treatments for pain and disability due to degenerative disc disease (DDD) generally include the conservative method, surgical intervention, and the tissue engineering approach. Surgical intervention includes fusion and artificial total disc replacement (A-TDR). While fusion surgery has the characteristics of a simple procedure, preserves intervertebral height, and relieves pain, the range of motion (ROM) of the functional spinal unit (FSU) is lost and the degeneration of adjacent discs is potentially accelerated. Unlike fusion, A-TDR not only maintains segmental height but also preserves the segmental ROM and slows the degeneration of adjacent segments, thereby effectively resolving the shortcomings of fusion in some patients. The technique has commonly

2. EVOLUTION OF DEVICE DESIGN:

Lumbar total disc replacement (L-TDR) devices offer good biomechanical properties and exhibits satisfactory patient clinical results. Since 1966 and Fernström's first TDR implantation, many designs and concepts have been proposed. In this section, the structural design, biomaterials, functionality, mechanical properties, and main advantages and challenges associated with L-TDR devices are summarized chronologically in detail:

2.1 Early Generation Devices (1990s–2000s):

The kinematics of early generation was ball-on-socket type (BOS). According to the materials used in this type, there is metal-on-metal type (MoM), ceramic-on-ceramic type (CoC), metal-on-polymer (MoP), and polymer-on-polymer (PoP) as shown in Figure1. The endplates include keels or teeth to provide initial fixation, and titanium or hydroxiapatite coatings for promoting long-term bone growth.

MoM-type devices (such as: Kineflex-L, Flexicore, Maverick-L...) have great fatigue resistance, and good biocompatibility with materials: titanium alloys (Ti6Al4V), cobalt-chromium-molybdenum (CoCrMo) alloys. It has also favorable stiffness, ductility, durability, pain relief, ROM restoration, and disc height

* PhD Student, University of Miskolc

** associate Professor, University of Miskolc

preservation. But in clinical application they don't absorb shock, so there are also metal wear debris, artifacts, osteolysis, migration, subsidence, heterotopic ossification, and inability to replicate structural features. Devices with CoC type (such as Min-T from zirconia) are preferable wear resistance, and disc height preservation, with challenges of Limited load-bearing ability and brittleness.

MoP-type devices (such as: ProDisc-L, Activ-L, CHARITÉ™, M6-L....) with polymeric cores (polyethylene (PE), Ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE), polycarbonate urethane (PCU).....) and metallic endplates materials (Ti, CoCrMo alloys) have high strength, good viscoelasticity, durability, pain relief, ROM restoration, and disc height preservation. Among the challenges polymeric wear debris, heterotopic ossification, isotropy, and the connection between the polymer core and endplate still existing.

Devices with PoP type (such as ORBIT™-R), with many different polymeric materials used in this type (e.g. PE, PCU, Polyetheretherketone (PEEK)) have uniform stress distribution, avoiding the risk of mechanical failure and delamination, and good ROM, with challenges of polymeric wear debris, isotropy, and osteolysis.



Figure 1. Major product classifications of L-TDR devices.

2.2 Second Generation / Viscoelastic Designs (2010s–Present):

The second generation of LTDR was 1-piece type. Because the healthy human intervertebral disk has a deformable elastic structure with 6 degrees of freedom, elastomeric one-piece intervertebral prostheses might be the most physiological implant for mimicking physiologic levels of shock absorption and flexural stiffness.

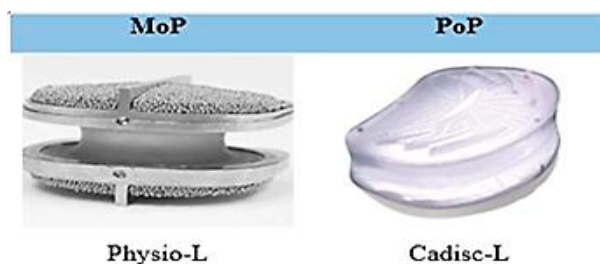


Figure 2. Major product classifications of 1 piece L-TDR devices.

In these designs, there is no articulation between the components, and the materials could be metal-on-polymer (e.g. Freedom-L, Physio-L....), or polymer-on-polymer (e.g. Cadisc-L, 3DF-L....) as shown in Figure 2. These models with polymeric cores and viscoelastic layers are closer replication of physiological motion and load distribution. In clinical application of the two generations of implants reveals that both designs have biomechanical advantages and limitations.

2.3 Emerging Trends:

To avoid the challenges resulting from clinical complications in the first and second generation of artificial discs, many ideas and possible modifications have been proposed in recent studies, both in designs and in the materials used. The possible trends can be classified as follows:

2.3.1 Bioinspired materials and hybrid structures:

Tissue engineering (TE) technology provides a promising alternative to restore physiological functionality of damaged intervertebral disc (IVD). Some studies engineered a biomimetic integrated scaffold, which was biomimetic annulus fibrosus and nucleus pulposus (AF-NP) composite with circumferentially oriented poly (ϵ -caprolactone) microfibers seeded with AF cells, with an alginate hydrogel encapsulating NP cells as a core.

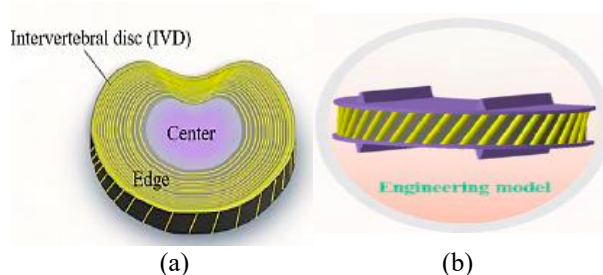


Figure 3. Schematic overview of natural disc and the BIVD-L structural design. (a) Structural characteristics of the natural IVD. (b) A bionic engineering model composed of distinct constructs that mimic the structure of natural IVD.

This engineered biomimetic AF-NP composites have potential application for IVD replacement. And further researches are needed to test the outcome of TE-IVD organization and integration.

Because current A-TDR devices lack the unique structure and material characteristics of natural intervertebral discs (IVDs), they fail to replicate the multidirectional stiffness and characterize anisotropic behavior (figure 3-a).

For this purpose, a bioinspired intervertebral disc (BIVD-L) (figure 3-b) has been developed from advanced polymer biomaterials (functional gradient materials (FGMs)) with various Shore hardness values and fabricated using a commercial multimaterial 3D printer to reproduce the multidirectional stiffness needed for the most common physiological kinematic behaviors. This approach may provide new inspirations for the design and fabrication of A-TDR devices for both engineering and functional applications.

2.3.2 Additive manufacturing (AM) (3D printing) for patient-specific geometry:

Manufacturing strategies are also critical to the implanted devices. Additive manufacturing (AM), especially multi-material additive manufacturing (MM-AM), can control the formation of complex structures and achieve the combination of multiple materials in multiple length scales. Recently, because it offers rapid prototyping and personalized manufacturing, it has also been applied to the field of biomedical engineering. In addition, as a new branch of AM technology, bioprinting technology provides reconstruction and regeneration capabilities. For example, the engineering model in (figure 3-b) had been manufactured by the Polyjet multimaterial 3D printer shown in Figure 4.

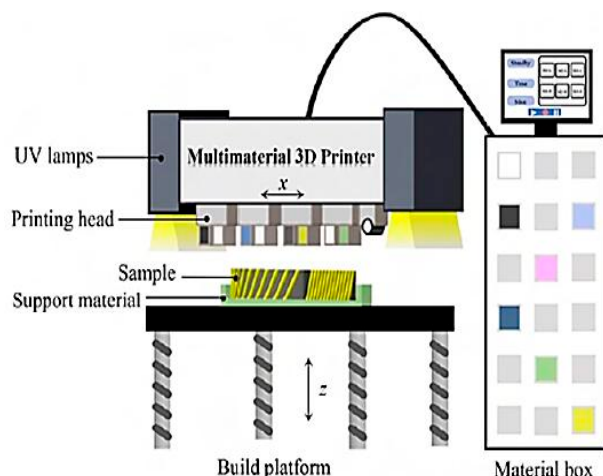


Figure 4. Illustration of the fabrication of an engineering model by the Polyjet multimaterial 3D printer.

The required geometry to be printed can be obtained from shape parameters from CT images, or from CAD models reconstructed from the magnetic resonance

imaging (MRI) results as in the study [1], where a monolithic total disc replacement (MTDR) was made of two types of thermoplastic polyurethane (TPU 87A and TPU 95A) and fabricated using a 3D printing approach: fused filament fabrication as shown in figure 5.

In addition, a novel artificial intervertebral disc implant with modified “Bucklicrystal” structure was designed and 3D printed using thermoplastic polyurethane in the study [2].

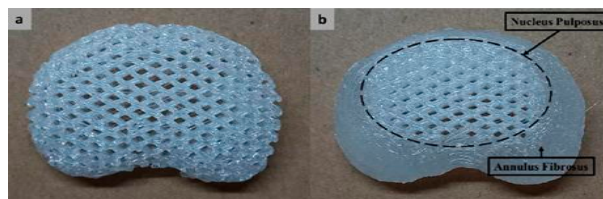


Figure 5. Representative products of two lattice configurations of MTDRs fabricated using a 3D printing approach for TPU 87A.

2.3.3 Incorporation of FEA-based optimization and biomechanical Research:

Recent advances in finite element analysis (FEA) have become integral to the design optimization and biomechanical evaluation of lumbar artificial disc devices. Early prostheses were primarily designed through experimental and mechanical prototyping, but modern development integrates computational modelling at every stage from conceptual geometry to predict the performance under complex spinal loading. FEA technique allows designers to simulate the biomechanical behavior of the implant, thereby reducing the need for extensive in vitro testing.

Some recent researches employed FEA to evaluate a novel artificial intervertebral disc. For example, in the study [3], they evaluated the effect of a novel artificial intervertebral disc geometry on stress, deformation and strain on lumbar segments to restore movement of the spine. The proposed geometry include endplates of titanium alloy (Ti6Al4V), polycarbonate urethane (PCU) core, and 3 titanium rings to replicate natural spinal biomechanics, including variable center of rotation (COR) and load distribution. The TIC's (Titanium Conix) design may reduce risks of implant loosening, wear, and adjacent segment degeneration, so the need for patient-specific customization using FEA simulations before clinical trials is advocated.

Al though, FEA is used also for the biomechanical analysis and assessing structural modification of current lumbar disc prostheses as in the study [4], where the structure of the Mobidisc-L was modified (Figure 6), resulting in the development of two new intervertebral disc prostheses with CoCrMo endplates: Movcore (a metal ring to restrict the center of rotation of the ball and socket), and Mcopro (includes an artificial annulus structure of UHMWPE, 4 ~50 MPa).

The Mcopro prosthesis is advantageous for patients with facet joint concerns due to its ability to reduce operative-level mobility and facet stress and long-term clinical studies are needed to validate its efficacy.

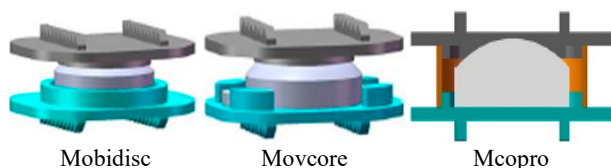


Figure 6. Mobidisc, Movcore, and Mcopro artificial discs.

As well as, the new elastomeric discs which reproduce better normal disc kinematics can be evaluated by FEA as in study [5] where the biomechanical performance of a new TDR (ADDISC) design: CoCr28Mo6 alloy endplates, intermediate piece: 2 PCU inlay instead of 1 piece in normal (ADDISC) had been evaluated for design, validation, and dynamic loading. For the clinical potential, the new disc mimics healthy disc biomechanics while addressing long-term issues of existing TDRs (e.g., wear, facet joint damage) making it a promising candidate for lumbar disc replacement.

Additionally, it's important to mention here the significant role of material properties in lumbar artificial disc functions, research studies try to integrate the design modification, selected materials, in vitro testing, and the FEA technique in both current and proposed models to reach the best promising candidate for long-term lumbar disc replacement. The study [6] aimed to explore the potential application of Entangled Porous Titanium Alloy Metal Rubber (EPTA-MR) as a nucleus pulposus material in artificial lumbar disc prostheses (Figure 7). It evaluated the biomechanical properties, fatigue life, and damping capabilities of EPTA-MR to determine its suitability for spinal non-fusion technology. For clinical potential, EPTA-MR combines high elasticity, wear resistance, and biocompatibility, addressing limitations of current polymer/metal prostheses (e.g., wear-induced failure).

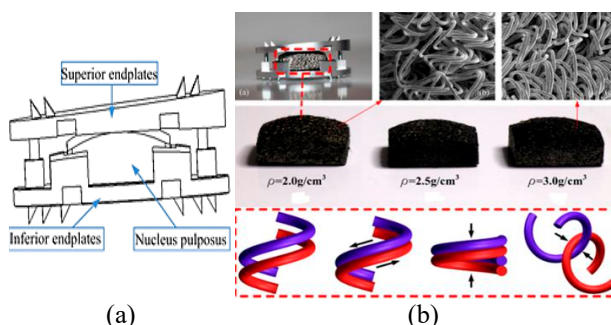


Figure 7. a) Structural design of non-fusion prosthesis
b) EPTA-MR products and microstructure

Current research also employs patient-specific FE models reconstructed from CT/MRI data which help in predicting individual postoperative outcomes. In parallel,

coupled experimental–computational frameworks are increasingly applied. The synergy between FEA-based optimization and biomechanical experimentation represents a pivotal trend in LTDR evolution, enabling more reliable and personalized prosthetic design with enhanced functional outcomes.

3. SUMMARY

Lumbar total disc replacement (LTDR) has progressed from ball-on-socket to elastomeric motion-preserving implants. Modern devices use hybrid materials to mimic natural disc function and clinical potential is promising though challenges such as wear, long-term stability and performance. Finite element analysis (FEA) and biomechanical studies guide design optimization and performance evaluation of lumbar total disc replacement (LTDR). Future LTDR innovations will focus on biomimetic materials, additive manufacturing, and personalized implant design.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg

5. REFERENCES

- [1] Nadhif, Muhammad, Ghiffary, Muhammad, Irsyad, Muhammad, Mazfufah, Nuzli, et al: *Anatomically and Biomechanically Relevant Monolithic Total Disc Replacement Made of 3D-Printed Thermoplastic Polyurethane*, Polymers, Vol. 132, No. 19, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14194160>
- [2] Jiang, Yulin, Shi, Kun, Zhou, Luonan, He, Miaomiao, Zhu, Ce, et al: *3D-printed auxetic-structured intervertebral disc implant for potential treatment of lumbar herniated disc*, Bioactive Materials, Vol. 20, pp. 528–538, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2022.06.002>
- [3] A. Khanna, P. Jain and C. Paul: *Predicting the biomechanical behavior of lumbar intervertebral Discs: A comparative finite element analysis of a novel artificial disc design*, Journal of Clinical Neuroscience, Vol. 132, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2024.110960>
- [4] Ke, Haibo, Guo, Yuan, Zhang, Xushu, Yin, Long, Nie, Wenbin et al: *Structural modification and biomechanical analysis of lumbar disc prosthesis: A finite element study*, Clinical Biomechanics, Vol. 116, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2024.106266>
- [5] Vanaclocha, Amparo, Vanaclocha, Vicente, M., Carlos, Jorda-Gomez, Pablo, Diaz-Jimenez, Cristina et al: *ADDISC lumbar disc prosthesis: Analytical and FEA testing of novel implants*, Heliyon, Vol. 9, No.2, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13540>
- [6] Z. Ren, J. Huang, H. Bai, R. Jin, F. Xu and J. Xu: *Potential Application of Entangled Porous Titanium Alloy Metal Rubber in Artificial Lumbar Disc Prostheses*, Journal of Bionic Engineering, Vol. 18, pp. 584–599, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42235-021-0039-6>

FATÜZELÉSŰ KANDALLÓKÁLYHA ÉGÉSLEVEGŐ SZABÁLYOZÁSÁNAK AUTOMATIZÁLÁSA

AUTOMATION OF COMBUSTION AIR CONTROL FOR WOOD STOVES

Fodor Péter*, Dr. Bihari Zoltán**

ABSTRACT

Fireplace Ltd. is a 100% Hungarian-owned company with a history spanning 35 years. The main profile of the company is the design and manufacture of solid fuel stoves. One segment of its continuous development is focused on design. The other segment aims to optimize the efficiency of burning process. The goal of this paper is to present a real accessory that automatically regulates the amount of air required for ideal combustion. In the future, the use of equipment with similar functions will be mandatory among environmental regulations.

1. BEVEZETÉS

A Fireplace Gyártó és Kereskedelmi Kft. egy 100% magyar tulajdonú vállalat. Fő profilja a kandallókályhák fejlesztése és gyártása. A Fireplace Kft. megmunkáló-berendezései tekintetében kiemelkedő a nagy teljesítményű lemezmegmunkáló géppark, amely magába foglal számos CNC vezérlésű lézervágó és élhajlító gépet. A további megmunkálási folyamat (hegesztés, festés), valamint az összeszerelés azonban nagymértékben támaszkodik a kétkezi munkaerőre.

A cég által forgalmazott termékek maradéktalanul megfelelnek az aktuális nemzetközi környezetvédelmi előírásoknak. Egy friss francia szabvány [1] szerint Franciaországban csak olyan kandallókályha kerülhet mindennapi felhasználásra, amely leégés szabályozásába a vásárló/felhasználó nem tud beavatkozni. Ez gyakorlatilag automata égésszabályozó rendszer alkalmazását jelenti.

Ez a megkorlátás a fő motivációja egy ilyen, önműködő rendszer fejlesztésének, amely a jövőben nagy piaci előnyt jelenthet.

A kutatás célja tehát egy olyan – az RE2020 szabványnak is megfelelő – automata szabályozó-rendszer megalkotása, amelynek elektronikus részegységei megvásárolhatók, a mechanikus alkatrészek pedig a Fireplace Kft. gépparkjával legyárthatók.

2. HATÁRÉRTÉKEK

A jelenleg hatályos, fatüzelésű helyiségfűtő berendezések legfontosabb kibocsátási határértékeit az EN 16510-1:2022-es szabvány írja elő [2]. Fontos megemlíteni, hogy a CO₂-re nincs kibocsátási határérték, azonban a koncentrációja nagymértékben befolyásolja a mért adatokból számított hatásfokot, tehát a gyártóknak törekedniük kell a szén-dioxid érték magasán tartására, mivel az nagy hatékonyságú égést jelent.

1. táblázat Az EN 16510-es szabványban rögzített kibocsátási határértékek

Szén-monoxid (CO)	1500 mg/m ³
Nitrogén-oxidok (NOx)	200 mg/m ³
Elégetlen szénhidrogének (OGC – Organic Gaseous Carbon = szerves gázneű szén)	120 C /m ³

3. AZ ÁTALAKÍTOTT KANDALLÓKÁLYHA BEMUTATÁSA

Az átalakításhoz kiválasztott berendezés egy fatüzelésű, szabadon álló külső levegős kandallókályha, amely a Fireplace Kft. kínálatából, amely a „Santa Fe” fantázianevet kapta (1.ábra). Méretei (Magasság x Szélesség x Mélység) 1000 mm x 500 mm x 385 mm, tömege nagyjából 85 kg.

A termék egy ún. Paris-típusú tüztérrel szerelt, amelynek belső alapterülete 400 mm x 255 mm. Ez a méret azonban jelentősen lecsökken a hőszigetelő vermikulit anyagú tüztérbélés alkalmazása miatt, amely méretei egyedileg a termékhez igazítva kerültek meghatározásra. A rostély öntöttvasból készült, a füstjárat viszonylag egyszerű, két szerelt és két hegesztett terelőlemezzel került kialakításra.

A tüztérajtó hagyományos, korrózióálló acél kilinccsel nyitható, a záródást (ajtó behúzását) azonban egy húzórugó segíti, amely a burkolat alatt, az alsó zsanér mellett kapott helyet.

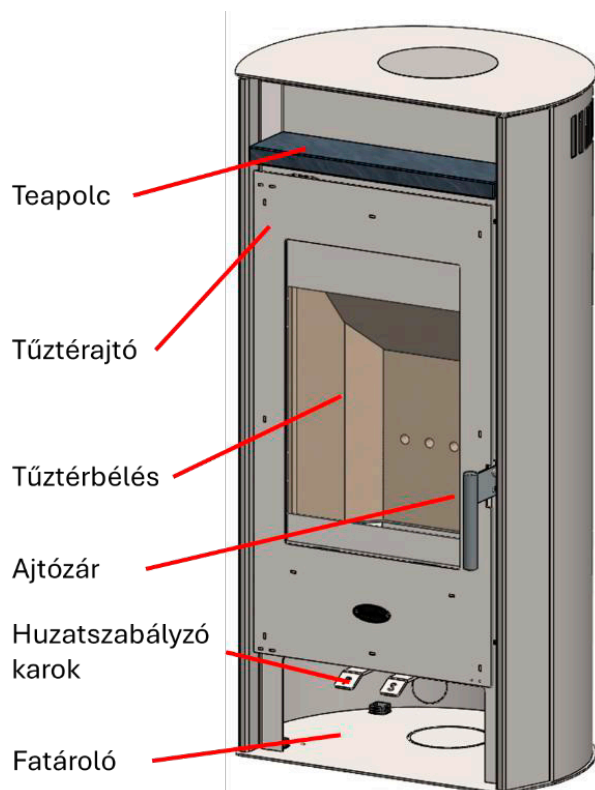
A kályha tüztérajtó feletti részén egy zsírkő borítású teapalc található, az ajtó alatt pedig egy fatároló kapott helyet, amely magába foglalja a huzatszabályozó

* MSc termékfejlesztő szakos hallgató

**egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

karokat is. Ezek feladata, hogy lineáris elmozdulásuk révén az égéslevegő mennyiségét módosítsák (részvezérlés).

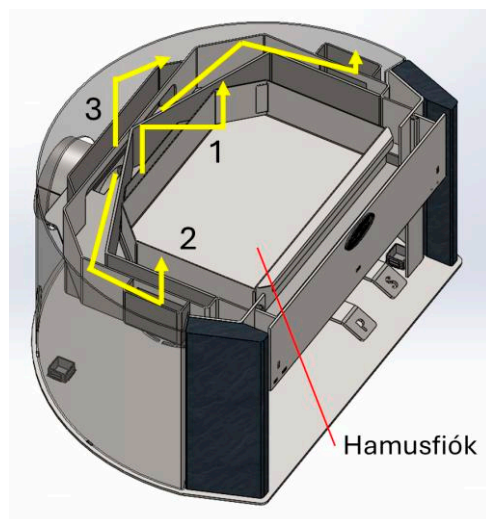
A fűtőberendezés burkolata az alapverzió esetében lézervágott, élhajlított és hengerített acéllemez. Elérhető azonban a Fireplace Kft. kínálatában olyan változat, amelyben az ajtók melletti (kb. 10-15 cm széles), illetve a tető burkolatai zsírkőből készülnek. A köves tetőburkolatok közül a felhasználó egy teljes tetőt beborító és egy „félíg köves” termék közül választhat.



1. ábra. „Santa Fe” kandallókályha

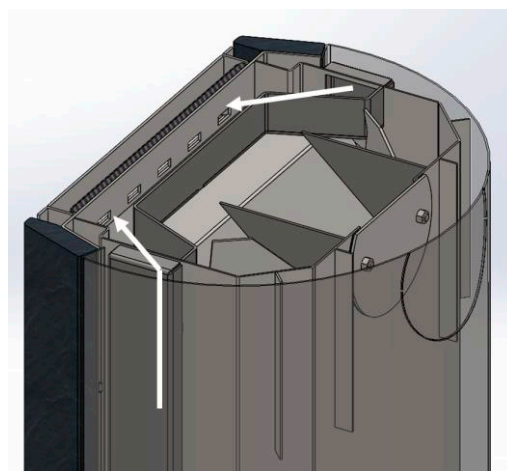
4. AZ ÉGÉSLEVEGŐ BEVEZETÉSE

Az égéshez szükséges levegő három irányból érkezik a tűztérbe (2. ábra). Az elsődleges (primer) levegő a hamusfiókot megkerülve a rostélyon keresztül áramlik be. Ennek fő funkciója a tüzelőanyag izzítása, az éghető gázok (CO , H_2 , CH_4) felszabadítása a fából. A tűztér külső, de a burkolat alatti részén (3. ábra) felvezetett, a tűztérajtó felső része felől érkező másodlagos (szekunder), vagy gyakran üvegöblítő levegőnek nevezett levegőáramlás az izzítás során felszabadult éghető gázok elégetésére szolgál. További feladata (ahogy az elnevezésből sejthető) biztosítani, hogy az égés olyan térrészben (a tűztér felső részében) menjen végbe, ahol az elősegíti az ajtóüvegre és a tűztérbélésre esetlegesen lerakódott korom leégetését.



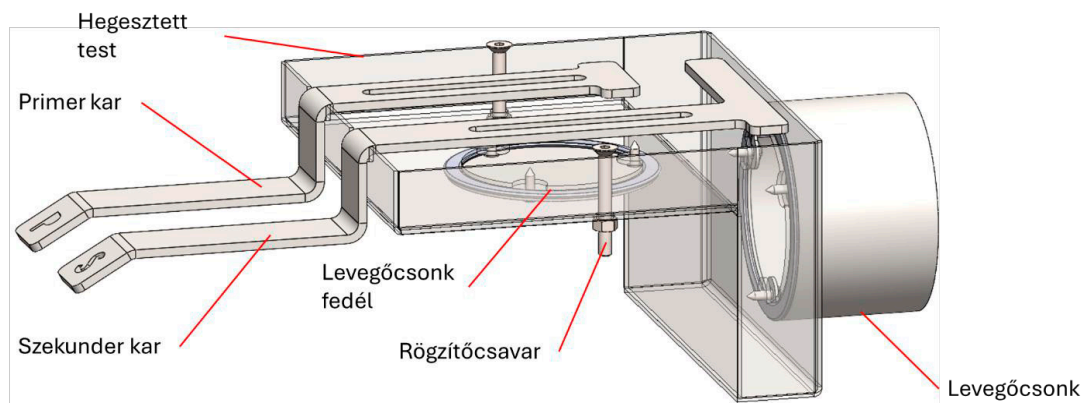
2. ábra. Alsó szekunder csatorna

A harmadlagos (tercier) levegő a szekunderhez hasonlóan a tűzér külső oldalán kerül felvezetésre és a tűztér hátsó részéből érkezik. Feladata az égéstér hátsó részében megrekedő, másodlagos levegőárammal nem találkozó éghető gázok meggyújtása. Látványos jelenség, hogy bár az éghető gázok megfelelő hőmérsékleten jelen vannak a tűztérben, azok nem gyulladnak meg, csak amikor az égés harmadik feltétele, az oxigén jelenléte is teljesül. Ez olyan látványt kelt, mintha a tűz a fa felett 10 cm-rel égne.



3. ábra. Oldalsó és felső szekunder csatorna

A levegődoboz lehetővé teszi az égéshez szükséges levegő külső környezetből történő bevezetését. Esetünkben ez a hamus fiók alatti lemezen került kialakításra. A szerkezet két csavarral rögzül a kályhatesthez, a levegő bevezetése egy 100 mm átmérőjű csonton keresztül történik. A légdoboz tűztérfenékhez illeszkedő élére hőálló tömítőzsinór szerelhető, ezáltal a (szabályozás előtti) fals levegő beáramlása kiküszöbölhető. A tömítés további feladata a két acéllemez alkatrész elválasztása, így csökken a hőátadás, valamint a fatárolóban kialakult hőmérséklet is.



4. ábra. Légdoboz és a huzatszabályozó karok (P – primer, S – szekunder)

5. AZ ÖNMŰKÖDŐ RENDSZER ELEKTRONIKUS RÉSZEI

A vezérlő elektronika egy külső ipari partnertől származik, amely a két cég között megkötött titoktartási szerződés miatt nem publikus.

A szabályozó karokat működtető egység egy a svájci Belimo által gyártott, 2 Nm forgatónyomatékú hajtóműves motor. A kapcsolójeleket az alábbi érzékelők biztosítják:

- füstgázhőmérséklet érzékelő
A K-típusú hőelem egy bimetal lemez határfelületén a hőmérséklet változására bekövetkező potenciálkülönbségből határozza meg a hőmérsékletet.
- ajtónyitás érzékelő
Az induktív közelségérzékelő egy érintkezésmentes szenzor. Az aktív (vezérlőbe bekötött) részegység elektromágneses teret indukál maga körül, és ha a passzív fél bekerül az elektromágneses térbe, megváltoztatja a mágneses teret. Ebből a változásból számítja ki a vezérlő elektronika, hogy a két fél elég közel van-e egymáshoz (az ajtó zárva van), vagy sem.

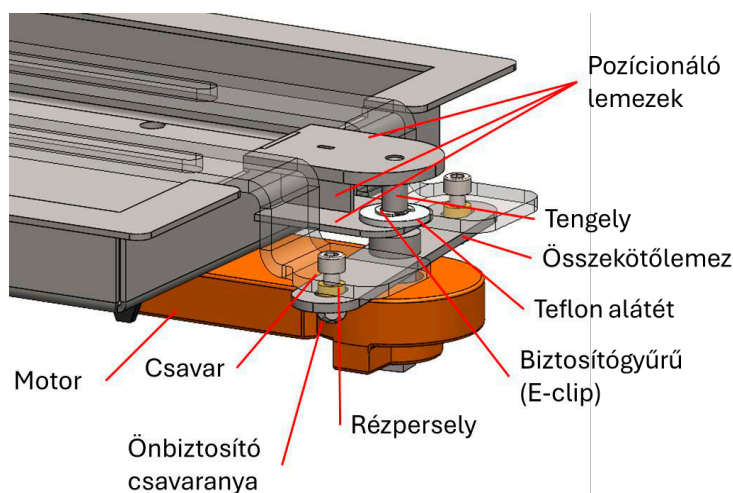
- szobahőmérséklet érzékelő
Az NTC – Negative temperature coefficient = negatív hőmérséklet együttható – típusú termisztor (hőellenállás) egy olyan áramköri elem, amely ellenállása a hőmérséklet emelkedésével csökken, az ellenállás értékéből pedig számítható a pillanatnyi hőmérséklet.

6. AZ ELEKTRONIKUS RENDSZER ALKALMAZÁSÁHOZ SZÜKSÉGES ÁTALAKÍTÁSOK

A módosítások során fontos szempont volt, hogy az a meglévő helyére könnyen felszerelhető legyen, illetve az elektromos szabályozórendszerrel nem rendelkező típusok esetében is elő kellett készíteni az utólagos „felokosítás” lehetőségét.

A módosítások alapvetően az elektronikus alkatrészek (motor, vezérlő, szenzorok) rögzítésére, elhelyezésére irányulnak.

A konstrukció legjelentősebb módosításai a légdobozon történtek, a korábbi két független, lineáris kar helyett egyetlen működtető kart alkalmaztunk, azok összekötését és az átalakítás további alkatrészeit az alábbi ábra mutatja meg:



5. ábra. Az önműködő rendszerhez fejlesztett légdoboz és huzatszabályozó karok

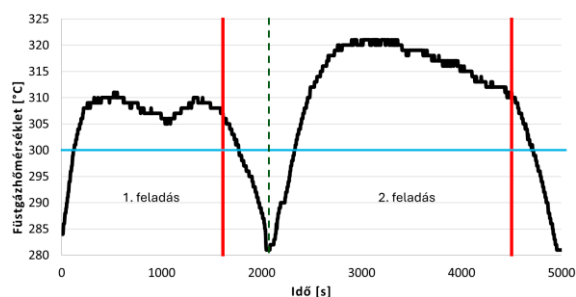
A szabályozókarokat egy ovális nyitásokkal ellátott lemezzel kötöttük össze. Ez a lemez egy forgácsolt tengelyre rögzül hegesztett kötéssel, a tengely megvezetését pedig a légdobozon kialakított pozicionáló furatok biztosítják. A tengely alacsony súrlódású forgását egy teflonból készült alátét, rögzítését pedig egy „E” alakú biztosítógyűrű segítségével valósítottuk meg. A szabályozókarok és az összekötőlemez kötése, valamint az erőátvitel érdekében felülről egy-egy csavar kapott helyet a karokban. Ezekre alulról egy sárgarézből készült perselyt helyeztünk az ovál-nyitásokba úgy, hogy az abba munkált furaton a csavar átmenjen. Ennek rögzítésére, illetve a szomszédos, elmozduló lemezek távolságának beállítása érdekében egy önbiztosító csavaranyát helyeztünk a menetes orsóra.

További változtatások történtek az érzékelők és a további elektronikus alkatrészek elhelyezése érdekében, azonban ezek kifejtését a terjedelmi korlátok nem teszik lehetővé.

7. LABORATÓRIUMI VIZSGÁLAT

A mérési adatok és az idő-füstgázhőmérséklet diagramok a Fireplace Kft. saját kalibrált, de nem hitelesített laboratóriumában készültek, az elektronikus szabályozórendszer finomhangolása előtt.

Az első esetben a mérés az előírások szerinti tüzelőanyag feladásával történt. A mérési görbén (6. ábra) látható, hogy a hőmérséklet változása szabályosan ciklikus, a tűz leégésekor (függőleges vastag vonal) a hőmérséklet folyamatosan csökken, ezzel együtt a CO és CO₂ értékek is kedvezőtlenül változnak.



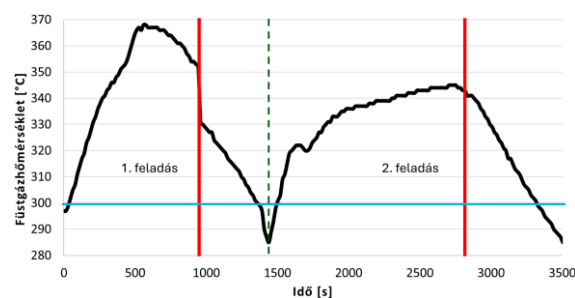
6. ábra. Füstgázhőmérséklet-idő diagram ideális tüzelőanyag feladás esetén

Hogy ez a rosszabb kibocsátású időszak rövidebb legyen, a leégésszabályozó automata a 300 °C-ra hűléskor (vízszintes vonal) több primer levegőt juttat a tüztérbe, ezzel javítva a károsanyag kibocsátást.

A 7. ábrán egy olyan mérési görbe látható, ahol a feladott tűzifa tömege és mérete előírás szerinti, a fadarabok behelyezése a tüztérbe azonban szabálytalan.

Erről a görbéről az olvasható le, hogy a hőmérséklet feladásonként egymástól jelentősen eltérő a maximum

érték, valamint a leégés lefutásában is számottevő különbség figyelhető meg.



7. ábra. Füstgázhőmérséklet-idő diagram előírásoktól eltérő tüzelőanyag feladás esetén

Ez esetben nem működne az optimális körülmények között beállított 300 °C-os hőmérséklet küszöb. Például az 1. feladás során mire a füstgázhőmérséklet kellően lecsökken, a tűz már kialudt, az újragyújtása időtartama bizonytalan, közben végig rossz kibocsátási értékeket produkálva.

8. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBI FEJLESZTÉSI IRÁNYOK

A kutatómunka alapján elmondható, hogy a fatüzelésű kandallókályhák leégés-szabályozásának van létjogosultsága. A füstgázhőmérséklet alapján történő vezérlés azonban csak és kizárólag akkor működik hatékonyan, ha az előírások szerinti mennyiségű és méretű fahasábokat helyezünk a tüztérbe az előírt pozícióban. Amennyiben a felhasználó a legkisebb mértékben is eltér a kezelési útmutatóban foglaltaktól (márpedig életszerű, hogy eltér), akkor a kibocsátási értékek biztosan nem lesznek jobbak, mint a mechanikus szabályozórendszer esetén. Ami mégis előnyös a mechanikus karokkal szemben, hogy a felhasználó nem tud tetszőleges (rossz) beállításokat alkalmazni (tapasztalataink alapján ez gyakori eset).

Jövőbeli fejlesztési irány egy oxigénérzékelő alkalmazása, amellyel közvetve a CO₂ tartalomra következtethetünk, amely jóval kevésbé érzékeny a tüzelőanyag mennyiségére, minőségére.

9. IRODALOM

- [1] <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reglementation-environnementale-re2020>, RE 2020, (letöltés dátuma: 2025.09.11)
- [2] CEN: EN 16510-1:2022 - Residential solid fuel burning appliances, 2022.
- [3] KÓSZÓ J.: *Kandallók*, Budapest, 1990, ISBN 963 740 541-0

DFX TECHNIKÁK ALKALMAZÁSA A GÉPTERVEZÉS SORÁN

APPLICATION OF DFX TECHNIQUES DURING MACHINE DESIGN

Dr. Gotthard Viktor, PhD*

ABSTRACT

The theory and methodology of DFX techniques are not fully known and widespread among machine designers. However, I believe that they do have a place in the toolbox of design engineers.

That is why I set myself the goal of better presenting DFX techniques and their main directions to machine designers, highlighting which direction can be applied during which machine design step or phase. The article is informative, the length is not suitable for a detailed description of DFX techniques, but it is enough for a basic introduction and an overview of application possibilities.

1. BEVEZETÉS

A géptervezés folyamata egy összetett, több lépésből álló mérnöki tevékenység, amelynek célja egy új gép vagy berendezés megalkotása, illetve egy meglévő továbbfejlesztése. A tervezés folyamatát és fázisait mutatja be a cikk első része.

A cikk második része a DfX-technikákat mutatja be, irányait, elméletét és a főbb jellemzőit foglalja össze.

A harmadik rész pedig kettő metszéspontjaira mutatja be, azaz a DfX technikák egyes ágainak alkalmazását a géptervezés fázisai során.

2. A GÉPTERVEZÉS FOLYAMATA ÉS FŐBB FÁZISAI

A géptervezésnek elméletben alapvetően négy szakasza van, az első az *igény- és problémadefiníció*, ez az induló fázis, ahol meghatározzuk, milyen igényeket kell kielégíteni és milyen problémát kell megoldani. A második fő rész a *funkció- és hatáselvkérés*, ennek során keresünk megoldási elveket és definiáljuk a funkcionális követelményeket. A harmadik szakasz az *alternatív megoldások kidolgozása* és értékelése, ennek során több lehetséges megoldást dolgozunk ki és értékelünk műszaki és gazdasági szempontok alapján. Végül pedig következik a *részletes kidolgozás és megtervezés*, amelynek során részletesen kidolgozzuk a kiválasztott megoldás tervét és létrehozuk a tervdokumentációt.

A DfX technikákat igen elterjedten alkalmazzák napjainkban a terméktervezés és a géptervezés során

A gyakorlatban az ipari alkalmazás során több lényeges fázist különböztettünk meg, ezeket mutatja be a következő táblázat: a fázisok megnevezését, a leírásukat a lényeges jellemzőkkel és a fázis lezárásakor elérendő célt [1].

1. táblázat. A tervezés főbb fázisai.

TERVEZÉSI FÁZIS	LEÍRÁS	CÉL
Feladat pontosítás	Probléma megfogalmazás, célkitűzés	Egyértelmű kiindulási igény és keretek meghatározása
Tervező csapat	Teamtagok, vezető, szerepek kiosztása, célcsoport meghatározása	Szakmailag és szervezetenként megfelelő csapat összeállítása
Specifikáció	Probléma, igények, keretek, követelmények meghatározása	A feladat tisztázása, célok kijelölése, követelmények meghatározása
Koncepció alkotás	Funkciók feltérképezése, elvi megoldások keresése, morfológiai mátrix	Többféle működési elv vagy rendszer- struktúra létrehozása
Főterv	Lehetséges változatok kidolgozása, értékelése	Optimális megoldás kiválasztása
Megtervezés	Részletek, anyagok, kapcsolatok meghatározása	Műszaki megvalósítás részletei
Finomítás és ellenőrzés	Szimulációk, értékelések, költség- és biztonsági vizsgálatok	A terv validálása és véglegesítése
Dokumentálás	Műszaki rajzok elkészítése	Terv-dokumentáció

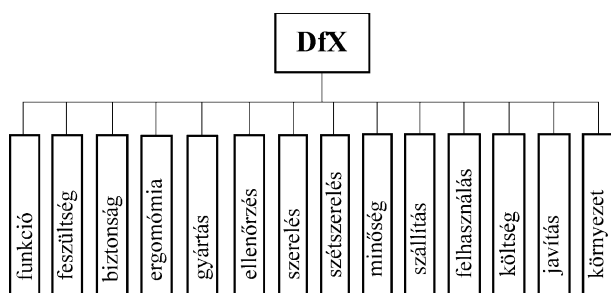
A táblázatban vastaggal emeltem ki azokat a fázisokat, amelyek során alkalmazhatóak a DfX technikák egyes ágai és módszerei.

3. A DFX-TECHNIKÁK BEMUTATÁSA

A DfX technikák elnevezés eredete az angol „Design for X” kifejezés és valamilyen szempontból helyes vagy optimális tervezést jelent, fogalmazhatunk úgy is, hogy *fókuszált tervezés* [2].

A DfX technikák ismertebb és elterjedtebb ágai az 1. ábrán [3] láthatóak.

*egyetemi adjunktus BME Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék



1. ábra. A DfX technikák irányai

Fontos megjegyezni, hogy a fókuszált tervezés kétféle folyamatot takar. Az egyik egy teljesen új berendezés kifejlesztése, a másik pedig egy meglévő irányított optimalizálása, azaz továbbfejlesztése.

Az 1. táblázatban vastaggal kiemelt fázisok a géptervezés lényeges, főbb szakaszai, ezek során dől el a követelményekre és igényekre választ adó megoldás, azaz a megtervezett berendezés szerkezeti felépítése és működési elve.

4. A DfX-TECHNIKÁK ALKALMAZÁSA A GÉPTERVEZÉS KÜLÖNBÖZŐ FÁZISAIBAN

Ebben a fejezetben a DfX-technikák egyes ágait mutatom és azok alkalmazási lehetőségeit az egyes géptervezési lépések és fázisok során.

2. táblázat. DfX irányok és alkalmazási fázisuk.

DfX irány	Koncepció	Főterv	Megtervezés	Finomítás
DFM – gyártáshelyes			X	X
DFA – szerelshelyes	X	X	X	
DFFM – rugalmas és moduláris	X	X		
DFO – használati fókusz		X	X	X
DfE – környezet	X	X	X	X

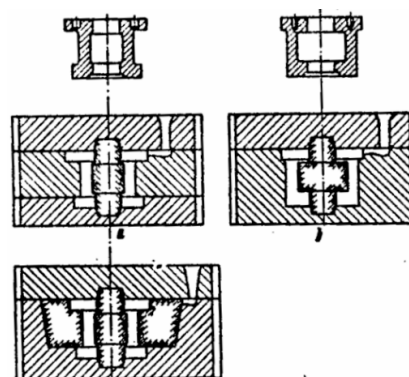
Természetesen több DfX irány között vannak átfedések (pl. gyártáshelyes és szerelshelyes tervezés) és az egyes DfX irányok elveit egyszerre akár több géptervezési fázis során is lehet alkalmazni.

4.1. Gyártás- és szerelshelyes tervezés

A gyártás- és szerelshelyes tervezés, röviden DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) két irányt foglal magába. Az egyik a gyártáshelyes tervezés (DFM) a másik pedig a szerelshelyes tervezés (DFA).

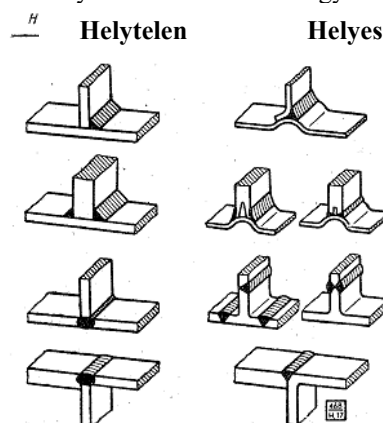
A DFM az egyes gyártástechnológiai folyamatok és sajátosságok szempontjából közelíti meg a tervezést. Ennek első lépése a gyártástechnológia megismerése és ezáltal az alkatrészek optimális geometriájú és kialakítású megtervezése. Mivel ez az ág elsősorban alkatrészek kialakítására nyújt támogatást, a felsorolt géptervezési főbb szakaszok közül a megtervezés és a finomítás során alkalmazhatjuk hatékonyan. A gyártáshelyes tervezés elmélete végigveszi valamennyi

alkatrészgyártási technológiát: öntészet, kovácsolás, porkohászat, hidegfolytatás, lemezalakítás, forgácsolás, hegesztés. A következő ábrán [1, 3] például öntés szempontból optimalizált konstrukciót láthatunk.



2. ábra. Többrészes forma és mag elkerülése konstrukciós módosítással.

A következő ábrán [1, 3] pedig hegesztés szempontjából helyes és helytelen kialakításokat figyelhetünk meg.



3. ábra. Hegesztés szempontjából helyes és helytelen kialakításokra példák.

Mindezek csak kiragadott példák, a DFM alaposan és részletesen taglalja a különféle gyártástechnológiák folyamatát, jellegét és ebből adódóan tesz javaslatot az optimális kialakításokra.

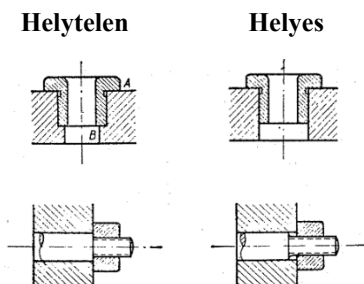
A DFA pedig a szerelshelyes kialakítás szerinti megtervezést támogatja. Ezzel egyrészt az összeszerelés optimális körülményeire, de akár az újbóli szétszerelhetőségre és ezáltal a karbantartásra, javításra vagy a végső kivonás során az eltérő anyagú komponensek könnyű szétválasztására és reciklálására is javaslatot tesz. Ezzel érintve további DfX irányokat, amelyek a további alfejezetekben lesznek olvashatóak.

A szerelési hatékonyság (E_{ma}) (más néven DFA-index) a szerelt egység bonyolultságára és szerelésére ad egy jellemző értéket:

$$E_{ma} = N_{min} \cdot \frac{t_a}{t_{ma}} \quad (1)$$

ahol N_{min} a minimális alkatrész-szám, t_a az alkatrészenkénti szerelési alapidő (=2,93 sec) és t_{ma} teljes konstrukció tényleges szerelési ideje.

A DFA-index minden konstrukció esetén kiszámítható és bizonyos elvek mentén optimalizálható, ezt támogatja a DFA irányú módszertana. A DFA módszer jól alkalmazható a főbb géptervezési szakaszok közül a koncepció, főterv és megtervezés során. A következő ábrán [1, 3] szerelés szempontból helyes és helytelen kialakításokra láthatunk példákat.



4. ábra. Szerelés szempontjából helyes és nem helyes kialakítások.

A DFA során az alkatrészek száma is optimalizálásra kerül: bizonyos alkatrészek leghagyhatók vagy összevonhatók (ezzel is csökkentve komponensek számát és ezzel a szerelési műveleteket), ha az ún. hármas szabályból egyik sem áll fenn a két érintett alkatrész esetén: el kell mozduljanak egymáshoz képest, eltérő anyagból kell legyenek (pl. elektromos vezetésszigetelés) vagy lehetetlen lenne szerelni, ha nem lenne két különálló alkatrész.

4.2. Rugalmas és moduláris elvű tervezés

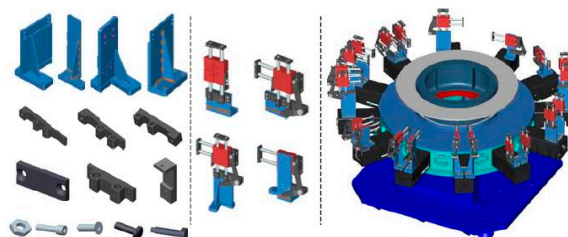
A DFFM (Design for Flexibility and Modularity) szintén két tervezési elvet ötvöz. A rugalmas elvű tervezés a DFF (Design for Flexibility) alkalmazása napjainkban igen fontossá vált, hiszen gyakran szükséges hogy egy megoldás a kezdeti igények szerint konfigurálható legyen illetve, hogy később a használat során akár átalakítható, azaz újrakonfigurálható legyen. Ezt úgy lehet elérni, hogy standard elemekből vagy ún. moduláris egységekből tervezzük meg, amelyet a DFM (Design for Modularity) azaz a moduláris elvű tervezés támogat.

A moduláris rendszer elemeinek, azaz potenciális moduljainak meghatározásához meg kell válaszoljuk a következő kérdéseket. Milyen változatai vannak most? Milyen változatok szükségesek? Milyen változatok lehetségesek?

3. táblázat. Modul típusok és jellemzőik.

MODUL TÍPUS	JEL	FUNKCIÓ, JELLEMZŐ
Alapmodul	A	Nem változik, mindig szükséges
Segédmodul	S	Csatoló, illesztő és határoló egységek
Speciális modul	SP	Feladatfüggő, speciális kiegészítők
Illesztő modul	I	Más rendszerhez integráláshoz szükséges
Egyedi elem	E	Egyedi igények esetén

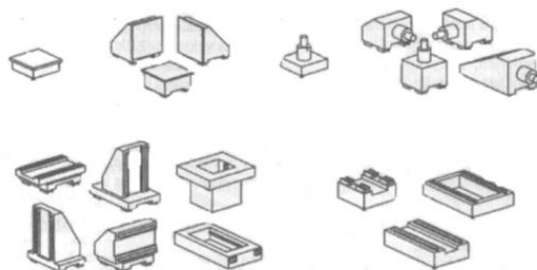
Az ezekre a kérdésekre adott válaszok alapján lehet felállítani a modulok előzetes rendszerét, amelyekből majd fel tudjuk építeni a teljes moduláris rendszert. Ezzel a módszerrel a 3. táblázatban látható modul típusokra kell felosztani a tervezendő moduláris rendszer elemeit, amelyekből majd utána építkezni tudunk.



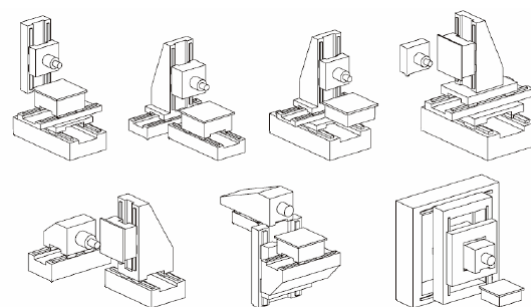
5. ábra. Moduláris elvű gépcsald komponensei, egységei és egy konfigurációjuk [4].

A moduláris elemekből álló elemkészlet moduljai adott határokon belül tetszőlegesen változtathatóak, azaz variálható az elemek lehetséges kombinációja. Az ilyen elemekből felépített berendezés összeszerelése vagy beüzemelése során flexibilisen változtathatóak a moduloktól függő egyes paraméter-értékek (pl. pozíciószám, lökethossz), akár az állítható egységek segítségével, akár a modulok gyors és egyszerű cseréje révén.

A következő két ábra [3, 5] nagyon jó szemléltető példa az egyes standard alapmodulokból kialakítható eltérő konfigurációk sokaságára.



6. ábra. Szerszámgépek moduláris egységei.



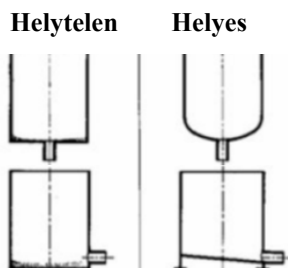
7. ábra. Eltérő szerszámgép kialakítások építhetők standard moduláris egységekből.

A DFFM elveit már a tervezés korai szakaszában le kell fektetni, azaz a főbb tervezési szakaszok közül a koncepció és a főterv kialakítása során. Meg kell határozni és a DFFM elvei szerint kell kialakítani az egyes szükséges modulok csoportját, mennyiségét és jellemzőit, mindezekkel elérni a kívánt rugalmasságot.

4.3. Használat szempontú tervezés

A DFO (Design for Operation) a használat, alkalmazás szempontból helyes tervezés. Ennek alágai a kopás, korrózió és karbantartás szempontjából helyes tervezés.

Az első kettő esetében, ahogy már a gyártáshelyes tervezésnél láthattuk, az alapelv itt is azonos. A DFO először a kopások és korróziók fajtáit, okait és ezután az elkerülési vagy mérséklési módjaikat mutatja be és tesz javaslatot az optimális kialakításra.



8. ábra. Felületi korrózió szempontjából helyes és helytelen kialakítások [1, 3].

A karbantartás szempontból helyes tervezés esetén pedig szétszerelhetőség, az irányított tönkremenetel és a szükséges karbantartandó részekhez megfelelő hozzáférés kialakítására tesz javaslatokat. Valamennyi DFO elv több betervezett és összeszerelt alkatrész egymáshoz képest optimális kiválasztását és kialakítását célozza meg, így inkább a részletek megtervezésekor, azaz a főterv, a megtervezés és a finomítás során alkalmazhatóak hatékonyan.

4.4. Környezethelyes tervezés

A DFE (Design for Environment) a környezethelyes tervezés több alapelve foglal magában. Az egyik a LCA (Life Cycle Assessment) az életciklus elemzés, amely végig kíséri a terméket az életútján, és hozzárendeli az egyes szakaszokban a környezeti hatásokat, az előállításától a recycling-ig (pl.: alumínium esetén a bauxit bányászatától a nyomásos öntésen keresztül az újrahasznosításig).

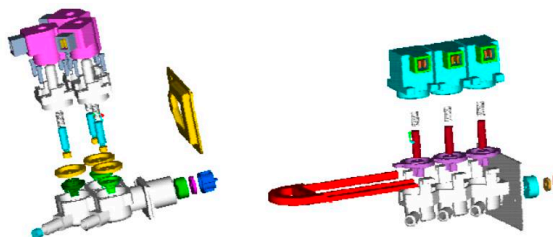
A másik ilyen elv a MET-pontok, amely egy termék vagy anyag életciklus elemzése (LCA) alapulnak. A módszer a környezeti információkat kompakt formában foglalja össze. A MET-pontok egyik előnye, hogy tovább osztja a pontokat M (Material, ritka anyagok használata), E (Energy, energia fogyasztás) és T (Toxic, mérgező kibocsátás) részekre, így módon több információt ad a kihatás természetéről. A DFE elvek alkalmazása valamennyi tervezési szakaszban indokolt és elvárt.

5. A DFX TECHNIKÁK GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

A DFX technikák alkalmazására manapság célszoftverek és online felületek is rendelkezésre állnak.

A szoftver alkalmas arra, hogy egy tervezendő vagy egy optimalizálandó berendezés komponenseit szerelési családfa-szerűen betápláljuk. Ennek során számos

szerelési jellemzőre információt kell adjunk (pl. a már említett hármas szabályra vonatkozóan, komponensek száma, szerelési sorrend, szerelési nehézség, segédanyagok ...), amelyek segítségével a szoftver kiszámolja az egység DFA-indexét, valamint javaslatot tesz konstrukciós módosításokra, mint például komponensek összevonása vagy elhagyása.



9. ábra. DFA-szoftver segítségével áttervezett mosógépszelep [3].

A 9. ábrán a DFA-szoftver alkalmazására látható egy példa, amely magért beszél: alkatrészek száma 38-ról 16-ra, a kötések száma 112-ről 42-re, míg az eltérő típusú kötések száma 4-ről 1-re csökkent.

A DFE-szoftver alkalmazásával hasonló eredményeket lehet elérni a például a berendezés MET-pontok számértékének (károsanyag-kibocsátás a teljes életpálya során vagy recikálhatóság a kivonáskor) a tekintetében.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben áttekintésre került a géptervezés folyamata, fázisai és kiemelt szakaszai. Majd bemutatásra került a DfX technikák alapelve és a módszer főbb irányai.

Ezután egyesével bemutattam az egyes DFX irányokat, azok jellemzőit és az egyes géptervezési szakaszok során az alkalmazhatóságukat. Igyekeztem mindenhol egy-egy vizuális példával szemléltetni a módszereket. Végül kitértem a DFX technikák alkalmazását támogató szoftverek elérhetőségére és az így elérhető eredményekre is mutattam be példát.

Szerencsére napjainkban újra előtérbe kerül a DFX technikák megismerése és a módszerek alkalmazása a tapasztalt tervezők körében is, amelyre az ipar szereplői lehetőséget is kaphatnak a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a Gép- és Terméktervezés Tanszék felnőttképzési programjában.

7. IRODALOM

- [1] Pahl G., Beitz W.: A géptervezés elmélete és gyakorlata, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981
- [2] Bischof A., Blessing L.: 18. Symposium „Design for X”, Neukirchen, 2007
- [3] Dr. Horák P., Dr. Gotthard V.: DFX technikák oktatási anyagok, BME, GT3, 2025
- [4] Dr. Gotthard V.: Moduláris felépítésű gyártósorok tervezésének elmélete és gyakorlata, PhD értekezés, BME, 2008.
- [5] Németh I.: 3-tengelyes szerszámgépek felépítési változatainak tervezése, BME, GTT 2004

RADIÁLISAN GRADIENS ORTOTROP TÁRCSÁK FESZÜLTSG- ÉS ELMOZDULÁSMEZŐINEK SZÁMÍTÁSA

DETERMINATION OF STRESSES AND DISPLACEMENT IN ORTHOTROPIC RADIALY GRADED DISKS

Dr. Dávid Gönczi*

ABSTRACT

This paper deals with the determination of stress distribution and displacement field of radially graded disks. The material behaviour is linearly elastic and orthotropic, the thin disk is subjected to combined mechanical and thermal loading. The material distribution is arbitrary function of the radial coordinate and the temperature field, while the temperature distribution and the thickness profile of the thin disk depend on the radial coordinate. A system of differential equations is derived, then reformulated to transform the steady-state thermoelastic problem to a system of initial value problems. A stress function is used to solve the axisymmetric problem, then different boundary conditions are investigated. The solution is derived, when the displacement values at the cylindrical boundary surfaces are given (e.g. fixed or prescribed).

1. INTRODUCTION

Functionally graded materials (FGMs) represent a class of advanced engineered materials characterized by a continuous variation in composition, which in turn causes a corresponding gradation in material properties aligned with the functional requirements of the structural component, typically along a single spatial direction. The graded interface between constituent phases ensures a smooth transition from one material to another, thereby imparting enhanced mechanical performance and improved thermal resistance. Owing to these advantageous characteristics, the concept of FGMs has attracted increasing attention in recent decades. FGMs are important in case of inverse design, which is a computational approach where the desired behaviour of a material or structure is specified first, and then the material distribution (or geometry) is determined to achieve that target. Inverse design is particularly valuable in this case, because it allows engineers to tailor the spatial variation of material properties - such as stiffness, thermal behaviour or strength - to meet specific functional requirements.

A substantial body of research has investigated the mechanics of functionally graded materials from diverse

perspectives. Comprehensive treatments of linearly elastic problems in non-homogeneous solids can be found in several monographs [1–4]. In addition, numerous studies have reported analytical, semi-analytical, and numerical solutions to thermomechanical problems in a variety of geometries, including hollow spheres, disks, cylindrical shells, beams, such as [5–7]. A substantial body of research has been devoted to the thermoelastic and mechanical analysis of functionally graded and orthotropic disks, employing analytical, semi-analytical, and numerical methodologies. Early contributions include the work of Pen and Li [8], who investigated steady-state thermoelastic problems in isotropic radially graded disks with arbitrary radial non-homogeneity, formulating the solution as a Fredholm integral equation. Stampoulouglou and Theotokoglou [9] derived exact solutions for hollow circular cylinders and disks with exponential and power-law variations in shear modulus, based on compatibility and equilibrium equations. Subsequent studies expanded the range of loading and geometric conditions. For instance, the analysis in [10] considered displacement and stress fields in radially graded hollow disks subjected to angular acceleration and thermal effects using a semi-analytical approach. Boğa and Yildirim [11] employed the method of complementary functions to study disks with parabolic thickness profiles, while Gönczi [12] proposed a numerical scheme for the steady-state thermoelastic response of isotropic hollow circular disks with arbitrary radial gradation. Rotating disks have received particular attention. Zheng et al. [13, 14] analysed radially graded isotropic and fiber-reinforced rotating disks, applying finite difference methods to compute displacements and stress distributions. Eraslan et al. [15] developed analytical solutions for orthotropic disks with power-law property profiles, transforming the governing relations into hypergeometric differential equations. More recent works have addressed orthotropic and specially tailored material distributions. Yildirim [16] applied the complementary function method to thermomechanical problems of orthotropic disks, while Allam et al. [17] introduced semi-analytical formulations for specific gradation patterns. Variational approaches on discretized domains were also adopted in [18, 19] to investigate the

* senior lecturer, University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Institute of Applied Mechanics

thermoelastic response of orthotropic disks. Collectively, these studies underscore the variety of mathematical tools - ranging from integral equation formulations to complementary function methods, finite difference schemes, and variational techniques - that have been developed to capture the complex behaviour of radially graded and orthotropic disks under diverse mechanical and thermal loading conditions.

The subject of this study is the solution of a thermoelasticity problem for cylindrically orthotropic, radially graded disks. The structural element is subjected to combined thermal and mechanical loading, which can be described by an axisymmetric model. The time dependence is neglected, therefore, the problem can be treated as a decoupled thermoelastic one. Due to the geometry and loading conditions, the disk is in a state of plane stress. The sketch of the axisymmetric disk is shown in Fig. 1. Here, the outer radius is denoted by R_2 , the inner radius by R_1 , and the thickness profile in the axial (z) direction is represented by $h(r)$, which is an arbitrary function of the radial coordinate.

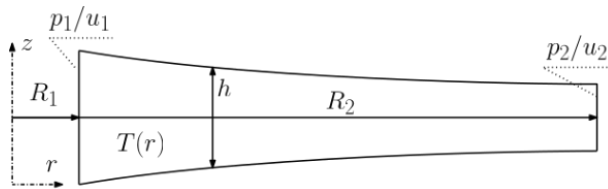


Figure 1. The sketch of the problem

The applied loads on the structural element consist of a temperature field depending arbitrarily on the radial coordinate, as well as a body force acting in the radial direction. In addition, constant radial surface tractions may be applied on the inner and outer curved boundaries (p_1, p_2), or alternatively, prescribed radial displacements may be imposed on these boundaries (u_1, u_2 as “loading alternatives”). The numerical solution method employed reduces the problem to a combination of three initial-value problems, relying on the linearity of the governing system of equations and boundary conditions. The material properties $C_{ij}(r, T)$ are considered as arbitrary functions of both the radial coordinate and the temperature field.

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

Let's consider a cylindrical coordinate system (r, φ, z) . The formulated disk problem is treated as a linear problem. Small deformations are assumed, however, due to the nature of the structure and loading, the displacement field has only a radial component. The kinematic equations of the problem are

$$\varepsilon_r(r) = \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{du_r(r)}{dr}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_\varphi(r) = u_r r^{-1}. \quad (2)$$

In our previous equations u_r is the radial displacement, $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ denote the radial and circumferential normal strains. In our axisymmetric case, the nonzero equilibrium equation (in the radial direction)

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\varphi) + b_r = 0 \quad (3)$$

leads us to

$$\frac{d}{dr} [r \sigma_r(r) h(r)] - h(r) \sigma_\varphi(r) + h(r) b_r = 0, \quad (4)$$

where the body forces are expressed as the product of the thickness of the disk and a body force function b_r . In case of rotating disk, we have $b_r = \rho(r) \omega^2 r^2$, where ρ is the density of the material. From Eq. (4) the stress function of the problem can be derived. Let's denote the stress function by S , which can be expressed as

$$\sigma_r(r) = S(r) r^{-1} h^{-1}(r), \quad (5)$$

$$\sigma_\varphi(r) = \frac{dS(r)}{dr} \frac{1}{h(r)} + b_r(r) \quad (6)$$

for our axisymmetric disks. The cylindrically orthotropic thermoelastic constitutive behaviour, the Duhamel-Neumann equation [4] is expressed in Voigt's engineering notation as $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\beta}\vartheta$, where the 6×6 stiffness matrix $\mathbf{C}$ contains nine independent material parameters. $\vartheta = T - T_{eq}$ is the temperature difference function, where the absolute temperature is compared to the equilibrium temperature T_{eq} . In the governing equations, the temperature distribution is arbitrary, but necessarily a function of the radial coordinate. This assumption is justified by the disk's small thickness and by prescribing identical third-kind boundary conditions on the upper and lower curved surfaces, which yield, to a good approximation of such temperature profile. Considering linearly elastic, orthotropic materials, the nonzero components of the stress tensor in the cylindrical coordinate system are given as follows [4]

$$\sigma_r(r) = C_{11}(T, r) \varepsilon_r(r) + C_{12}(T, r) \varepsilon_\varphi(r) + C_{13}(T, r) \varepsilon_z(r) + \beta_{11}(T, r) \vartheta(r), \quad (7)$$

$$\sigma_\varphi(r) = C_{12}(T, r) \varepsilon_r(r) + C_{22}(T, r) \varepsilon_\varphi(r) + C_{23}(T, r) \varepsilon_z(r) + \beta_{22}(T, r) \vartheta(r), \quad (8)$$

furthermore, the plane stress state of the disk leads us to the normal stress

$$\sigma_z = 0 = C_{31} \varepsilon_r + C_{32} \varepsilon_\varphi + C_{33} \varepsilon_z + \beta_{33} \vartheta, \quad (9)$$

$$\varepsilon_z = -C_{31}^{-1} C_{33}^{-1} \varepsilon_r - C_{33}^{-1} C_{32} \varepsilon_\varphi - \beta_{33}^{-1} C_{33}^{-1} \vartheta. \quad (10)$$

Let's introduce the following notations for the material properties

$$\begin{aligned} C_1 &= C_{11} - C_{33}^{-1}C_{13}^2, C_2 = C_{12} - C_{33}^{-1}C_{23}C_{13}, \\ C_3 &= C_2 = C_{21} - C_{33}^{-1}C_{31}C_{23}, C_4 = C_{22} - C_{33}^{-1}C_{23}^2, \\ B_1 &= \beta_{11} - \beta_{33}C_{33}^{-1}C_{13}, B_2 = \beta_{22} - \beta_{33}C_{33}^{-1}C_{23}. \end{aligned} \quad (11)$$

Using these new constants we have

$$\sigma_r(r) = C_1(T, r)\varepsilon_r(r) + C_2(T, r)\varepsilon_\varphi(r) + B_1(T, r)\vartheta(r), \quad (12)$$

$$\sigma_\varphi(r) = C_2(T, r)\varepsilon_r(r) + C_4(T, r)\varepsilon_\varphi(r) + B_2(T, r)\vartheta(r) \quad (13)$$

for the nonzero normal stress components. From the combination of Eqs. (1), (2), (5) and (12) we have our first equation as

$$\frac{du}{dr} = C_{11}^{-1}r^{-1}h^{-1}S - C_2C_{11}^{-1}r^{-1}u - B_1C_{11}^{-1}\vartheta. \quad (14)$$

From Eqs. (1), (2), (13), (14) and (6) the second differential equation of our system of initial value problem can be determined as

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dr} &= C_2C_{11}^{-1}r^{-1}S + (C_4 - C_2^2C_{11}^{-1})hr^{-1}u + \\ &+ (B_2 - B_1C_2^{-1}C_{11}^{-1})h\vartheta - hb_r. \end{aligned} \quad (15)$$

To solve the system of differential equations of (14) and (15), we can use different approaches. These techniques solve two initial value problems - for example with Runge-Kutta-Fehlberg method -, from which the actual initial values of the stress function and radial displacement of the original problem can be calculated. When there are traction boundary conditions at both boundaries (R_1, R_2), we can use a similar approach to the one presented in [12]. We can make it more efficient, when for the first calculation we use the initial data ($u_1^1 = 1, S_1^1 = 0$) and calculate the values of u_2^1, S_2^1 . In our second calculation we use ($u_1^2 = 0, S_1^2 = 1$) and determine (u_2^2, S_2^2). From this we can compute the solution of the problem as described in [12] for a similar problem. When we have kinematic boundary conditions $u_r(r = R_1) = u_1, u_r(r = R_2) = u_2$, we need the data $u_1^1 = u_1, S_1^1 = 1$ in our first initial value problem and calculate the values of u_2^1, S_2^1 . In our second calculation we use ($u_1^2 = u_1, S_1^2 \neq S_1^1$: arbitrary value) and determine u_2^2, S_2^2 . From this calculation the initial value of the stress function is

$$S_1 = (S_1^1 - S_1^2)(u_1 + u_2)(u_2^2 - u_2^1)^{-1} + S_1^1. \quad (16)$$

For the mixed boundary conditions, we can utilize a similar approach, which is based on the linear combination of first two solutions.

3. NUMERICAL EXAMPLE

For the numerical example, the material properties (M) have the following (power-law based) form:

$$M(r) = M_0 \left(\frac{r}{R_1} \right)^m,$$

where the data are

$$\begin{aligned} C_1^0, C_2^0, C_3^0 &= 0.45, 0.3, 16 \text{ GPa}; \beta_1^0 = -12500 \frac{\text{N}}{\text{m}^2\text{K}}, \\ \beta_2^0 &= -32000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2\text{K}}, \lambda_0 = 20 \frac{\text{W}}{\text{mK}}, q_0 = 70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}, \\ T_{en}(r) &= 95 - 3000r^{1.8}[\text{K}], \vartheta_1 = 120\text{K}, \vartheta_2 = 20\text{K}, \\ R_1 &= 0.02\text{m}, R_2 = 0.1\text{m}, h(r) = r^{-0.2}[\text{mm}], \\ p_1 &= 40\text{MPa}, p_2 = 5\text{MPa}, m = 12. \end{aligned}$$

In the previous expressions λ and q denote the heat transfer and heat exchange coefficients, T_{en} is the environmental temperature along the radial direction. The numerical method to calculate the temperature field is presented in [12] or we can use finite element method to determine it. We are going to validate the equations of the kinematic boundary conditions by calculating the result from the traction boundary conditions (p_1, p_2), then using the computed displacements u_1 and u_2 as kinematic boundary conditions to get the original traction values of p_1, p_2 back. In this example the dominant stress coordinate is the tangential normal stress. Figure 2 shows the relative tangential normal stress distribution ($\sigma_\varphi(r)/p_1$). It is in good agreement with the analytical solution. When we used the displacement values (0.35, 0.1 mm), we got back the radial normal stresses $\sigma_r(r = R_1) = -39.9 \text{ MPa}$, and $\sigma_r(r = R_2) = -5.05 \text{ MPa}$.

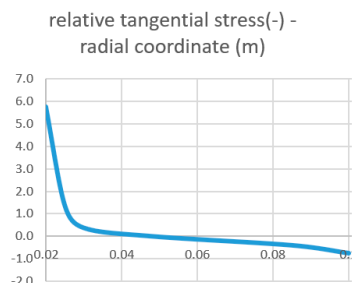


Figure 2. The tangential normal stress distribution

4. SUMMARY

The determination of the displacement field and normal stresses of radially graded orthotropic disks was investigated. Plain stress assumption and Voigt notation was used to formulate the problem. Stress functions were derived and used to transform the problem into a system of initial value problems. Due to the linearity of the problem, the solution can be calculated by solving two initial value problems, then the actual initial values can be calculated and used to solve the thermoelastic problem (e.g. by utilizing Runge-Kutta-Fehlberg method). The presented method works for an arbitrary temperature

function and thickness profile, that depends on the radial coordinate, while the material parameters can be arbitrary functions of the radial coordinate and the temperature distribution. A numerical example was considered (that is based on power-law functions), where the solutions of two different boundary conditions were tested on the same problem. The results were in good agreement.

5. REFERENCES

- [1] Hetnarski R. B., Eslami M. R.: *Thermal Stresses – Advanced Theory and Applications*, Springer, New York, USA, 2010, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10436-8>
- [2] Lekhnitskii S. G.: *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*, Mir Publishers, Moscow, 1981, <https://doi.org/10.12677/ASS.2021.105163>
- [3] Noda N., Hetnarski R. B., Tanigawa Y.: *Thermal Stresses*, Lastran Corporation, Rochester, New York, USA, 2000, <https://doi.org/10.1115/1.1349549>
- [4] Shen H-S.: *Functionally Graded Materials: Nonlinear Analysis of Plates and Shells*, CRC Press, London, UK, 2009, <https://doi.org/10.1201/9781420092578>
- [5] Ecsedi I., Gönczi D.: *Determination of the deformation of beams under the action of axial and thermal loads*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 21 (3), 2023, pp. 39-42,
- [6] Kiss L. P., Messaoudi A.: *Assessments of the non-linear instability of arches with imperfect geometry*, STRUCTURES, 71:108031, 2025, pp.17, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108031>.
- [7] Sorohan S., Constantinescu D. M., Apostol D. A.: *On the tailoring of radially FGM hollow spheres cylinders and disks*. The Romanian Journal of Technical Sciences. Applied Mechanics., 69(2-3), 2024, pp. 167-190, <https://doi.org/10.59277/RJTS-AM.2024.2-3.05>
- [8] Pen X., Li X.: *Thermoelastic analysis of functionally graded annulus with arbitrary gradient*, Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 30 (10), 2009, pp. 1211-1220, <https://doi.org/10.1007/s10483-009-1001-7>
- [9] Stampoulglou I. H., Theotokoglou E. E.: *The radially nonhomogeneous thermoelastic axisymmetric problem*, International Journal of Mechanical Sciences, 120, 2017, pp. 311-321, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.010>
- [10] Dai T., Dai H.-L.: *Thermo-elastic analysis of a functionally graded rotating hollow circular disk with variable thickness and angular speed*, Applied Mathematical Modelling, 40, 2016, pp. 7689-7707, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.03.025>
- [11] Boğa C., Yildirim V.: *Application of the Complementary Functions Method to an Accurate Elasticity Solution for the Radially Functionally Graded (FG) Rotating Disks with Continuously Variable Thickness and Density*, Solid State Phenomena, 251, 2016, pp. 100-105, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.251.100>
- [12] Gönczi, D.: *Thermoelastic analysis of functionally graded anisotropic rotating disks and radially graded spherical pressure vessels*, Journal of Computational and Applied Mechanics, 19 (2), 2024, pp. 85-104, <https://doi.org/10.32973/jcam.2024.004>
- [13] Zheng Y., Bahaloo H., Mousanezhad D., Mahdi E., Vaziri A., Nayeb-Mashemi H.: *Stress analysis in functionally graded rotating disks with non-uniform thickness and variable angular velocity*, International Journal of Mechanical Sciences, 119, 2016, pp. 283-293, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.10.018>
- [14] Zheng Y., Bahaloo H., Mousanezhad D., Mahdi E., Vaziri A., Nayeb-Mashemi H.: *Displacement and Stress Fields in a Functionally Graded Fiber-Reinforced Rotating Disk With Nonuniform Thickness and Variable Angular Velocity*, ASME, J. Eng. Mater. Technol., 139(3), 2017, <https://doi.org/10.1115/1.4036242>
- [15] Eraslan A.N., Kaya Y., Varli E.: *Analytical solutions to orthotropic variable thickness disk problems*, Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, Vol. 22(1), 2016, pp. 24-30, <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.91979>
- [16] Yildirim V.: *The Complementary Functions Method (CFM) Solution to the Elastic Analysis of Polar Orthotropic Rotating Discs*, J. Appl. Comput. Mech., 4(3), 2018, pp. 216-230, <https://doi.org/10.22055/jacm.2017.23188.1150>
- [17] Allam MNM., Tantawy R., Zenkour AM.: *Thermoelastic stresses in functionally graded rotating annular disks with variable thickness*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 56(4), 2019, pp. 1029-1041, <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.56.4.1029>
- [18] Sondhi L., Thawait AK., Sanyal S., Bhowmick S.: *Stress and Deformation Analysis of Variable Thickness Clamped Rotating Disk of Functionally Graded Orthotropic Material*, Materials Today: Proceedings, 18(7), 2019, pp. 4431-4440, <https://doi.org/10.2478/mme-2019-0027>
- [19] Nayak P., Bhowmick P., Saha K.N.: *Elasto-plastic analysis of thermo-mechanically loaded functionally graded disks by an iterative variational method*, Engineering Science and Technology, an International Journal, 23(1), 2020, pp. 42-64, <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2019.04.007>

EMELŐFÜLEK VÉGESELEMES ANALÍZISÉNEK NÉHÁNY KÉRDÉSE

A STUDY ON THE FINITE ELEMENT MODELLING OF LIFTING LUGS

Dr. Gönczi Dávid*

ABSTRACT

The study focuses on the numerical investigation of structural components (primarily with cylindrical contact surfaces) used in the lifting of various structural elements. The model is developed using the finite element software Abaqus CAE. Several fundamental issues related to the modeling of lifting lugs are discussed. The paper demonstrates how boundary value problems with highly nonlinear boundary conditions can be implemented in Abaqus and highlights features and common difficulties encountered in the numerical analysis of contact problems involving cylindrical surfaces.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki gyakorlatban sok helyen találkozhatunk emelőfülekkel (vagy emelőszemekkel, angolul *lifting lugs* vagy *lifting eyes*). Ezek olyan szerkezeti elemek, amelyeket nehéz berendezések, tartályok, gépházak, acélszerkezetek vagy egyéb komponensek biztonságos emelésére, mozgatására és rögzítésére terveznek. Alapvető szerepük, hogy az emelés során fellépő erőket és nyomatókakat biztonságosan átadják a fő szerkezetre, miközben megakadályozzák a lokális anyagkárosodást vagy instabilitást. Különböző változataik léteznek, melyeknek egyszerűbb kialakításait különböző nemzetközi szabványok rögzítik. Ilyenek az ASME több szabványa, mint a BTH-1 (Design of Below-the-Hook Lifting Devices), AISC 360 ASD, vagy éppen az ISO 16841 vonószemekre vonatkozó előírásai.

Számos szakkönyv és tanulmány foglalkozik az emelőfülek, és a hozzájuk kapcsolódó feladatok megoldásával különféle szempontokból. Az alapvető problémák leírásait megtalálhatjuk például az [1-3] könyvekben, de találunk megoldásokat számos specifikus szerkezet esetén is, mint amilyenek az [4-8]. Manapság szintén népszerű az emelőfülek különböző szempontok szerinti optimalizációja is. Ezekre találunk példákat a [9, 10] tanulmányokban. A kontaktfeladatok végeselemes analízise (pl. [11, 12]) is releváns mérnöki probléma, melyek a szilárd testek érintkezésének modellezését célozzák, ami az erős nemlinearitása révén az egyik legösszetettebb numerikus problémakör, iteratív, konvergenciára érzékeny algoritmusokat igényel, amelyek jelentős számítási erőforrást követelnek. A mérnöki tervezés során az

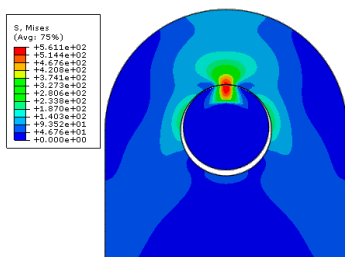
alapfeladatokban legtöbbször az emelőfülek geometriáját, méreteit és anyagát az emelési terhelés, az emelési szög, valamint a függeszték és a daru konfigurációja alapján határozzák meg. Az emelőfülek helyes tervezése nemcsak a statikus teherbírást, hanem az üzembiztonságot és kezelhetőséget is szolgálja. A helytelenül elhelyezett vagy alulméretezett fül balesetveszélyt jelenthet.

Számos olyan esettel találkozhatunk, ahol a szabványok közvetlenül nem alkalmazhatók, vagy más jellemzőkre is kíváncsiak vagyunk (pl. feszültségeloszlás) így numerikus szimulációkat kell alkalmaznunk a tervezési folyamat során. Ez a tanulmány a különböző szerkezeti elemek emeléséhez használt (főként hengeres) kontaktfelületek numerikus vizsgálatával foglalkozik. A probléma modelljét az Abaqus CAE, kereskedelmi forgalomban kapható végeselem szoftverrel készítjük el. Körbejárunk néhány alapvető kérdést az emelőfülek modellezésével kapcsolatban. Megvizsgáljuk a modern végeselemes szoftverrendszerek által nyújtott néhány modellezési lehetőséget, valamint ezek alkalmazásainak lehetőségeit komplexebb problémák esetére, mint amilyenek a optimalizációs és szimuláció automatizálási feladatok, vagy éppen a modern mérnöki anyagok (pl. kompozitok és funkcionálisan gradiens anyagok) alkalmazása.

2. KÉTDIMENZIÓS MODELL

Egyszerű geometriájú esetekben az érintkezési viszonyok is könnyen számíthatók az alapvető képleteink segítségével (pl. [1], [2]). Amennyiben végeselemes szoftverben szeretnénk megvizsgálni a problémát, síkfeszültségi állapotot tudunk használni. Vegyük az egyes ábrán látható emelőfület. Legyen a rendszer mindkét komponensének anyaga acél ($E = 200 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$). A csap átmérője 30 mm, a fül furata 32 mm, a külső pereme 85 mm átmérőjű. A vastagsága legyen 2 mm. Ebben az esetben az elmozdulás vezérlés működik stabilan, amennyiben erőt szeretnénk a belső csapra előírni, a szoftver általában nem fog megoldást találni és hibával kilép. Ez azt jelenti, hogy a csapra előírunk egy adott síkbeli irányú elmozdulást, amíg az emelőfület lerögzítjük (a mi esetünkben az alsó sík peremfelületet befalaztuk). Az 1. ábrán látható a 8,4 kN vonóerő (0,1 mm érintkezés utáni elmozdulás) esetén kialakuló feszültségeloszlás. Az így kapott értékek jó

* adjunktus, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet



1. ábra. A kétdimenziós, síkfeszültségi modell

egyeztetést mutatnak az analitikus megoldásokkal.

A síkalakváltozási feladatok ritkán használhatók a geometriai és terhelési megkötések miatt. Természetesen a kétdimenziós modellek nagy előnye, hogy rendkívül gyorsan megoldhatók és egyszerűek.

A kontaktfeladat definiálására több lehetőségünk is van az Abaqus CAE szoftverben [13]. Az általános kontakt (*General Contact*, melyet a kezdeti konfigurációban adunk meg) esetén egyetlen definícióval a modell számos vagy akár minden régiója között érvényesíthetők az érintkezési előírások. Kontaktpárok (*Contact Pairs*) esetén csak felületpárok közötti kontaktus írható le, ezeket a felhasználónak kell definiálnia. A harmadik típus a kontaktelemelek (*Contact Elements*) módszere. Mindegyik megközelítésnek megvannak a maga előnyei és korlátai. Az általános kontakt sokkal rugalmasabb módszer, mivel egyetlen interakcióval leírható az egymástól független testtartományok közötti érintkezés. A kontaktpárok ezzel szemben nagyobb körültekintést igényelnek a felületek definiálásakor, és számos korlátozás vonatkozik az alkalmazható felülettípusokra. Az Abaqus programban a felhasználónak minden kontaktpárhoz meg kell adnia egy master felületet és egy slave felületet. A két típus közötti különbségek között említhetjük általánosságban, hogy a slave felület csomópontjai nem hatolhatnak át a master felületen. Az analitikus merev felületek és a merev elemalapú felületek mindig master felületként kell, hogy szerepeljenek. A csomópontalapú felületek slave felületként működhetnek, és mindig csomópont-felület típusú kontaktust alkalmazunk. Egy kontaktpárban mindkét felület nem lehet merev. Általában, ha egy kisebb felület érintkezik egy nagyobbal, célszerű a kisebb felületet slave-ként definiálni. A master felületek legyenek sima függvényekkel leírható geometriájúak. A slave felület hálóját legyen finomabb. Azonos hálósűrűség esetén a slave felületet úgy érdemes kiválasztani, hogy az alacsonyabb merevségű legyen. Ha a két felület összehasonlítható merevségű szerkezeteken helyezkedik el, a master felület legyen a durvább hálójú oldal. A szerkezeti merevséget (nem csak az anyagot) is érdemes figyelembe venni a master-slave viszony kijelölésekor.

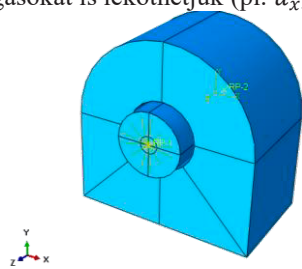
Az általános kontakt előírás esetében a program automatikusan rendeli hozzá a master és a slave szerepeket a felületekhez, de a felhasználó felülbíráhatja bizonyos beállításokat más opcióval együtt.

A kontakt előírásokhoz interakciós tulajdonságokat (*interaction properties* [13]) kell rendelnünk, amelyeknél megadhatjuk az érintkezés jellegét. A mi esetünkben normál irányban (amerre a behatolással szembeni ellenállást írhatjuk elő) *hard contact*-ot használtunk, felületi irányban pedig súrlódásmentes és súrlódásos eseteket is vizsgáltunk. Emellett hőkontakt is előírható termomechanikai feladatokhoz. Ezek esetében különböző függőségek is megadhatók [13]. Az érintkezés leírásához három alapvető karakterisztikát kell kiválasztani. A kontakt diszkrétizációjának jellegét, amely lehet csomópont-felület, vagy felület-felület. A csomópont - felület (*node-to-surface*) diszkrétizáció esetében minden slave csomópont a kontaktfelület túlfelületén lévő master felületen egy projekciós ponttal lép kölcsönhatásba adott előírásoknak megfelelően. Felület-felület interakció figyelembe veszi mind a master, mind a slave felület geometriáját, így pontosabb eredményeket szolgáltat, mint az előző módszer. A kontaktfeltételeket a slave csomópontok környezetében átlagolt régiókra írja elő, ami kis lokális behatolásokat enged csak meg, de nagyobb áthatolásokat megakadályoz, és a közelben lévő slave csomópontok átlagolt felületi normálvektorára támaszkodik. A másik fontos módszer a kontaktkövetés, amely jelentős hatással van arra, hogyan lépnek kölcsönhatásba a kontaktfelületek. Ez lehet véges csúszás vagy kis elmozdulás. A véges csúszású (*finite sliding*) követési módszer a legáltalánosabb megközelítés, amely lehetővé teszi a kontaktfelületek tetszőleges elválását, csúszását és elfordulását. A módszer során a jelenleg aktív kontaktfeltételek kapcsolódása a felületek relatív elmozdulása során változik. Ezzel szemben a kis elmozdulású (*small sliding*) módszer a master felület lineáris közelítését használja minden egyes kontaktfeltételhez, ezért csak kis relatív elmozdulást enged a felületek között, és akkor használandó, ha csökkenteni szeretnénk a számítási igényt és ezzel a megoldási időt. Az általunk használt általános kontaktelőírás alapértelmezett felület - felület típusú, véges elmozdulású kontaktformulációt alkalmaz.

3. HÁROMDIMENZIÓS MODELLEK

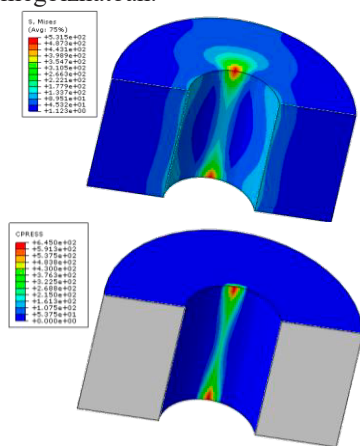
Tekintsük az előző feladatunkat, de egészítsük ki a 2. ábrán látható módon. A csap vizsgált hossza legyen 70 mm, a fül vastagsága 50 mm. Ebben az esetben csap két sík peremfelületét hozzákötöttük egy-egy referenciaponthoz. Ezt az Abaqus CAE szoftverben többféleképpen is megtehetjük. Amennyiben elmozdulást szeretnénk előírni, kinematikai kapcsolatot (*coupling*), amennyiben erőt szeretnénk előírni egy felületre egy ponton keresztül kontinuum kapcsolatot ajánlott alkalmazni. Ezt szemlélteti a 2. ábra RP1 referencia pontra vonatkozó előírása. Ebben az esetben is általános kontaktot írtunk elő, a súrlódási tényező kezdeti értéke 0,3 volt. A kezdeti hézag a két elem között legyen 1 mm. Írjunk elő a csapon 1,1 mm elmozdulást y irányban (az RP-1 és RP-2 referencia-

pontokon, és azokon keresztül a szélső sík peremeken), ezen felül ugyanitt a z és x irányú elmozdulásokat és/vagy a forgásokat is leköthetjük (pl. $u_x, u_{rot\ z}$).



2. ábra. A probléma háromdimenziós geometriája

Először a közelítő számításokhoz egy durvább hálót (4104 lineáris *hexahedral* elem) alkalmaztunk, amely esetén a maximális von Mises redukált feszültség 303 MPa, a maximális kontaktnyomás 479 MPa lett. A konvergenciavizsgálat elvégzése után az alkalmazott finomabb (optimálisabb) háló 16032 elemből állt. Az így kapott eredményeket szemlélteti a 3. ábra. A háromdimenziós eloszlásokat tekintve jól látható, hogy a változóink függenek a z iránytól, így ebben az esetben a kétdimenziós megközelítés már nem ad pontos megoldást. A súrlódási tényező hatására ($\mu = 0,3; 0,15; 0$) a maximális redukált feszültség (531,534,557 MPa), a kontaktnyomás maximuma (645,599,579 MPa) értékeket vett fel. Ebben az esetben is elmondható, hogy tisztán erő megadásával a szimuláció nem fut le, azaz ismét az elmozdulásvezérlés használható megbízhatóan.

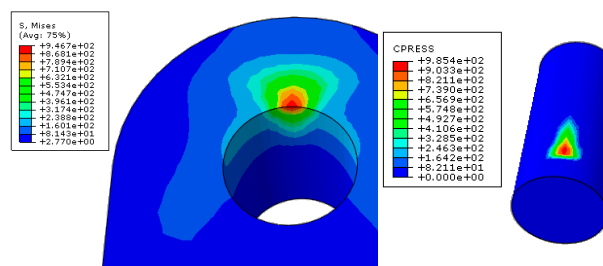


3. ábra. Az emelőfül eredményei, a von Mises-féle egyenértékű feszültség és a kontaktnyomás

Így inverz módon a reakcióerőkből történő visszszámolással tudhatjuk meg az erő értékét, amihez használhatjuk a két referenciapontunkat (az Abaqus CAE csomóponti *field output* opciója segítségével). Az emelőfül falvastagságát is érdemes vizsgálnunk a tervezés folyamán. Ennek vizsgálatához az Abaqus CAE preprocessorát tudjuk használni, amely egy grafikus felhasználói felület (GUI) réteggel biztosítja az interaktív modellező környezetet, a menüket és a nézetablakot a geometria, a hálózás és az eredmények vizualizálásához. A GUI C++ nyelven van

implementálva, és Python-horgokkal kombinálva, így gyakorlatilag minden GUI-művelet megfelel egy Python parancsnak. Ezen API réteg révén a felhasználó hozzáfér a program számos funkciójához, objektumához és metódusához. Az Abaqus/CAE-ben található egy beágyazott Python interpreter, ami a „ragasztó” szerepét tölti be a GUI és a szimulációs megoldó modul (*solver*) között, lehetővé téve a teljes automatizálást, testreszabást, valamint a külső munkafolyamatokkal történő integrációt. Az Abaqus CAE rendszer a beépített Python csomagokat több mint 500 osztállyal (objektummal) és számos, ezek között működő metódussal bővíti [14]. A felhasználók külső szkripteket használhatnak, például adatokat exportálhatnak fájlokba, feldolgozhatják azokat külső vagy a szoftver beépített Python környezetében, majd visszatölthetik az Abaqus-ba. Ez az API architektúra objektum-orientált, lefedi a geometriát, hálózást, terhelést, analízist és utófeldolgozást. Számos fontos alkalmazási terület van a Python szkriptelés számára. Ilyen lehet az emelőfüleknel is aktuális parametrikus modellezés, amely során a geometriai modelleket és hálókat programozott módon, bemeneti paraméterek alapján hozhatjuk létre, amit utána optimalizációs eljárásokhoz használhatjuk, hiszen az eredmények feldolgozása is lehetséges szkriptek segítségével (*odb* objektumokon keresztül). Batch futtatások is megoldhatók velük, automatizálható több szimuláció beállítása és végrehajtása, például tervezési tanulmányoknál, amikor sok modellvariánst kell elemezni manuális beavatkozás nélkül, vagy neurális hálózatok betanításához szükséges adatok generálásakor.

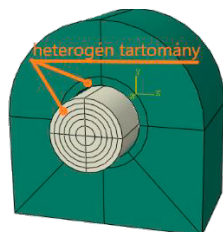
A következő kérdés, hogy mi történik akkor, amikor az erő nem az emelőfül (xy) síkjában ébred, hanem van annak z irányú komponense is. Ebben az esetben a csap elmozdulása nem tisztán y irányú. Mivel az erővel történő vezérlés általában nem működik, így más megoldást kell használnunk. Az egyik lehetőségünk, hogy a csap egyik oldalát egy adott pozícióban lerögzítjük gömbcsuklóval (pl. RP-2-nél), a másik referenciaponton keresztül kontinuum elosztással pedig előírhatunk koncentrált erőt. Ezzel akár azon szélsőséges esetek is modellezhetők, amikor a csap hirtelen egy kisebb felületen érintkezik a füllel. A 4. ábra azt az esetet mutatja, amikor az RP-2 oldalt a fül furatához pozícionáltuk és rögzítettük a translációit, majd 50 kN terhelést tettünk y irányba a másik (RP-1) peremre, miközben a súrlódási tényező kis értékű(0,05).



4. ábra. A ferde erő hatása a kontaktra

Itt megjegyzendő, hogy nagyobb sűrűdési tényezők esetén a szimuláció nem futott le. A modellhez lineáris anyagmodellt használtunk, amennyiben képlékeny állapotegyenleteket is bevetünk, a feszültségeloszlás más lett volna. Ha a képlékeny alakváltozást tönkremeneteli feltételnek vesszük, ez a rész egyébként sem releváns számunkra, ezt a terhelést csak nagyszilárdságú acélok viselnék el.

Amennyiben elő akarunk írni ferde elmozdulást, akkor a két referenciaponton különböző elmozdulásértékeket kell beállítanunk. Alternatívaként hozható még a csap egy belső hengeres részének kiválasztása (mint partíció) és annak az elmozdulásmezőjének az előírása. Amennyiben a teljes csap elmozdulásmezőjét megadjuk, az nem tud deformálódni, így merev testként viselkedik. Ekkor célszerűbb diszkrét merev testmodellt alkalmazni, hiszen az analitikusan merev megközelítés a kontakt miatt nem szerencsés. Amennyiben modern mérnöki anyagokat használunk, mint a kompozitok, vagy éppen a funkcionálisan gradiens anyagok, a szkriptelő környezetet tudjuk használni. Itt említhető, hogy funkcionálisan gradiens anyagok esetén például az összetétel változásának megfelelően a geometriát felparticionálhatjuk (programozott módon), majd ezekhez hozzárendelhetők homogén anyagi szekciók, hogy közelítsük az eredeti anyagi viselkedést. Erre mutat példát az 5. ábra, ahol egy radiálisan gradiens csapot egy kompozit fülbe helyeztünk.



5. ábra. A heterogén anyagu szerkezet egy példája

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány a különböző szerkezeti elemek emeléséhez használt (főként hengeres) kontaktfelületek numerikus vizsgálatával foglalkozik Abaqus CAE programrendszer segítségével. Néhány példán keresztül ismertettük a modell elkészítésének kérdéseit, a szoftverrendszer által nyújtott lehetőségek (mint amilyen a szkriptelési környezet) alkalmazási lehetőségeit.

5. SUMMARY

The study focused on the FE investigation of structural components used in the lifting of various structural elements using Abaqus CAE. A few basic examples with their numerical difficulties are presented. Furthermore, several modeling capabilities provided by modern finite element software systems are examined, along with their potential applications to more complex problems, such as optimization, simulation automation

tasks, and the use of advanced engineering materials (e.g., composites and functionally graded materials).

6. IRODALOM

- [1] Timoshenko S. P., Goodier, J. N.: *Theory of Elasticity*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1970
- [2] Boresi A. P., Sidebottom O. M., Seely, F. B., Smith, J. O.: *Advanced Mechanics of Materials*, 3rd ed., Wiley, New York, 1978
- [3] ASME: *Below-the-Hook Lifting Devices*, ASME, New York, ASME B30.20, 2025, ISBN: 9780791876923
- [4] Duerr D.: *Lifting lug with pinhole bushing*. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 23(2), 2018, 04018008, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000367](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000367)
- [5] Williams, D. K.: *Proposed design criterion for vessel lifting lugs in lieu of ASME*, B30., 20., 2007.
- [6] Joo-Sung L.: *On the Design of Lifting Lugs Based on the Ultimate Strength*, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, 29(1), 2016, pp. 29-36, <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2016.29.1.29>
- [7] Ham, J. H.: *The basic structural design guides on the lifting lug of ship block*. In ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, 1998, pp. ISOPE-I-98-339.
- [8] Samir Mohamed Mohamed Soliman E.: *Modal and stress behavioral for CFRP composite lifting lug*. World Journal of Engineering, 22(2), 2025, pp. 307-321, <https://doi.org/10.1108/WJE-08-2023-0312>
- [9] Lee S. M., Roh M. I., Kim K. S., Ham S. H.: *Optimum design of lug arrangement based on static and dynamic analyses for block lifting*. Journal of Ship Production and Design, 34(02), 2018, pp. 119-133, <https://doi.org/10.5957/JSPD.160043>
- [10] He Q., Guo Y., Jian Z., Zhou H., Li L.: *Research and Optimization on Arranging Lifting Lugs Algorithm in Designing Hull Block Lifting Scheme Based on SPD Secondary Development*. Journal of Ship Production and Design, 41(2), 2025, pp. 47-64, <https://doi.org/10.5957/JSPD.05240014>
- [11] Kiss L. P.: *The Effect of Various Imperfections on the Buckling of an Aerosol Can*. Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering, 13(1), 2020, pp 49-52
- [12] Gönczi, D.: *The Influence of the Boundary Conditions on the Buckling of Thin-walled Cans during Manufacturing*. International Journal of Engineering and Management Sciences, 7(4), 2022, pp. 41-50, <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2022.4.4>.
- [13] *Abaqus 6.13 online documentation*. Dassault Systems. 2015.
- [14] *Abaqus 2016. Scripting user's guide*. Dassault Systems. 2016.

KORREKCIÓS TÉNYEZŐ CSAPÁGYBEPRÉSELÉS LINEÁRIS ÉS NEMLINEÁRIS STATIKAI SZIMULÁCIÓ EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSÁHOZ

CORRECTION FACTOR FOR COMPARING LINEAR AND NONLINEAR STATIC SIMULATION RESULTS OF BEARING PRESS-FIT

Dr. Heteyi Csaba*

ABSTRACT

This study analyzes the press fitting process of a ball bearing into an output housing, focusing on stress distribution around the bearing seat fillet. Simulations were performed using various overlap values ($G = 0.005 - 0.025$ mm) with both linear and nonlinear static FE methods. Based on the comparison of stress results, a linear to nonlinear correction factor ($K_{L2NL} = 1.05 - 1.25$) was defined to adjust linear static's results for improved accuracy.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki szerkezetek egyik központi elemei a csapágyak, melyek beszerelése során kritikus mechanikai folyamatok játszódnak le, amelyek hatással vannak a szerkezet élettartamára. A golyóscsapágyak bepréslése során a csapágy gyűrűje és vele szoros illesztésben álló test között az átfedések miatt lokális feszültségcsúcsok alakulhatnak ki. E feszültségcsúcsok többek között az átfedés mértékétől és a csapágy környezetének geometriájától függhetnek. Jelen cikkben egy mélyhornyú golyóscsapágy bepréslését ismertetem egy váltó kihajtóházába, különös tekintettel a csapágyülék lekerekítésében kialakuló feszültségi állapotokra. A vizsgálatot két különböző szimulációs módszerrel végzem, lineáris statikai és nemlineáris statikai végelelemes szimulációval.

A csapágy ház belső átmérője kisebb, mint a csapágy külső átmérője, így a két átmérő átfedése miatt szoros illesztés alakul ki. A két felület egymásnak nyomódik olyan erővel, hogy azok üzemi körülmények között nem tudnak egymáshoz képest elmozdulni. E csapágybepréslési folyamat többféle módon történhet, jelen esetben hidraulikus prést alkalmaznak.

A préselési folyamat során az egymásnak nyomódó részekben mechanikai feszültség ébred, melyek mértéke függ az átfedés nagyságától [1]. A beprésléshez szükséges erő szintén függ a geometriai átfedéstől, a testek merevségétől és mechanikai tulajdonságaiktól (pl., rugalmassági modulus, Poisson szám), valamint a két

érintkező felület közötti súrlódási erőtl. A préselési erő meghatározása egy szereléstechológiai paraméter, mely ha túl kicsi a csapágybepréslés során a csapágy csak részben préselhető be helyére, míg, ha túl nagy akkor nem kívánt károsodás is előfordulhat. Jelen tanulmányban a préselési erőt fix értéken tartottam, és nem változtattam az átfedések függvényében.

Csapágybepréslés során az átfedések függvényében képlékeny feszültségek, így maradó alakváltozások is előfordulhatnak, extrém esetben repedések és mikrotörések is kialakulhatnak. Végelelemes módszer segítségével, még a szerelési folyamatok megkezdése előtt a csapágybepréslés vizsgálható, így a csapágyház feszültségi állapota gyártás és valós körülmények közötti tesztek nélkül kiértékelhetőek. A csapágybepréslés folyamata és az átfedések feszültségre gyakorolt hatása ismert folyamat. Ipari körülmények között, nem e tényezők mechanikai hatását szokás vizsgálni, hanem a gyártott termékben keletkező feszültségeket és azok hatását az élettartamra.

A csapágybepréslés folyamata és az átfedések feszültségre gyakorolt hatása szakirodalmi szempontból jól ismert és dokumentált [1-4]. Jelen tanulmány azonban gyakorlati megközelítést alkalmaz, egy sebességváltó példáján keresztül vizsgálva a már ismert mechanikai folyamatokat.

2. VÉGESELEMES MODELL CSAPÁGYBEPRÉSELÉSHEZ

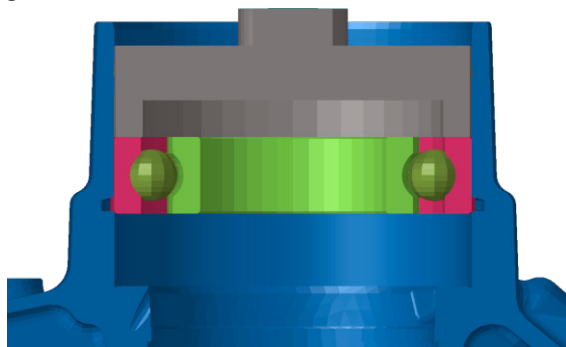
A csapágybepréslési folyamathoz két különböző végelelemes módszert használtam, lineáris statikát és nemlineáris statikát.

Lineáris statikai szimuláció során általánosságban megállapítható, hogy a végelelemes modell egyszerűbb, kisebb a számolási erőforrásigénye (kevesebb a számítási idő, kisebb memória szükséglet), míg a nemlineáris statikai szimuláció komplexebb modellezési lehetőséget tartalmaz, többféle és nagyobb mértékű nemlinearitások (geometriai-, kontakt-, peremfeltétel- és anyagmodell) vizsgálhatóak.

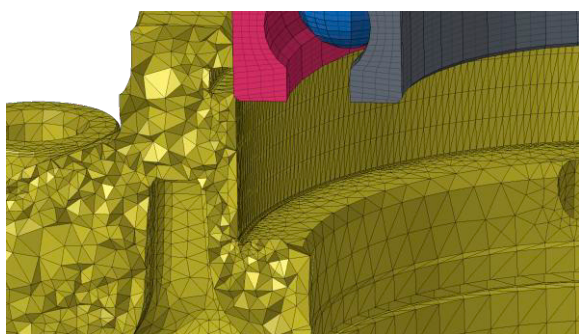
*Szimulációs mérnök, ZF Hungária Kft.

A lineáris statikai és nemlineáris statikai szimulációk funkciói nagyban függenek a végeleemes megoldóba a gyártó által implementált funkcióktól. Szigorúan véve a lineáris statikai szimuláció nem tartalmaz nemlinearitásokat, azaz két egymáson elcsúszó és egymáshoz deformálódó felület kontaktanalízise nem a lineáris statikai része, mivel ez egy nemlineáris folyamat. Egyes gyártók az ilyen kontaktmodellezést nem építik be az alap lineáris statikai moduljukba, csak egy kibővített verzióba. A lineáris statikán belüli kontaktanalízis korlátja, hogy az alakváltozások és elmozdulások csak kis mértékűek lehetnek. Ezzel szemben a nemlineáris statikai szimulációk lehetővé teszik a nagy elmozdulások és jelentős alakváltozások modellezését. Jelen feladathoz PERMAS (v20.00.189) végeleemes megoldót használtam, mely a lineáris statika esetén egy bővített eszköztárral rendelkezik, így képes a kontaktanalízis elvégzésére relatív kis elmozdulások esetén. [5-6]

A szimuláció során öt egymástól elkülönített háló régiót definiáltam, (1) a kihajtóháza, (2) a csapágy belső gyűrűje, (3) a csapágy külső gyűrűje, (4) a csapágygolyók és (5) egy egyszerűsített présszerszám. E régiók az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra Sebességváltó kihajtóháza (részben ábrázolt kék komponens), a beprésselni kívánt csapágy (rózsaszín, világos és sötétzöld komponensek) és egy egyszerűsített présszerszám (szürke komponens) végeleemes szimulációhoz.

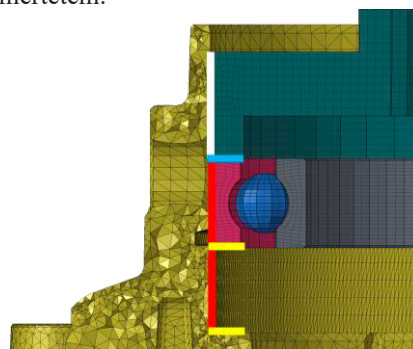


2. ábra Vizsgált lekerekítés régiója

Ez az öt komponens 1.8 millió szilárdtest elemet tartalmazott, mellyen felül a modell stabilitásához lágy rugókat és az erő bevezetéséhez RBE elemeket is használtam. A hálózás során két stratégiát alkalmaztam, a csapágyház lekerekítésénél a háló finomságát szilárdságtani szemponton alapján, míg a kihajtóház további részein, a csapágy régióiban és az egyszerűsített

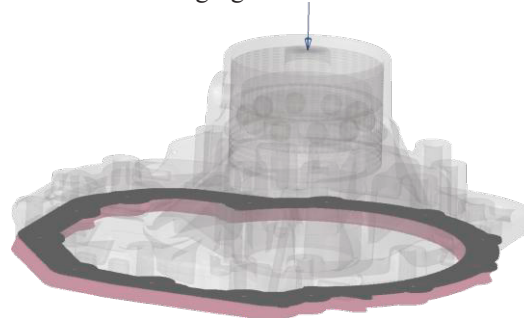
présszerszámnál merevségi szempontok alapján készítettem el [5]. A csapágyfenék környezetének hálóját a 2. ábrán látható.

A 3. ábrán láthatóak a kontakt régiók. Sűrűlódásmentes kontaktot alkalmaztam a világoskék színnel jelölt felületek között (présszerszám és a csapágy), valamint a fehér színnel jelölt (présszerszám és csapágyház), és a sárga színnel jelölt (csapágygyűrű „alja” és az ülék alja) felületek között. A piros színnel jelölt felületek esetén (külső csapágygyűrű és csapágyfészek) sűrűlódásod kontaktfelületeket definiáltam. A „piros” felületek között a sűrűlódási tényező 0,2 volt. Ezen felületek között a geometriai áthatást nem a geometria módosításával, hanem a Contact Gap funkción belül negatív kontakt hézaggal modelleztem. Az ipari folyamat vizsgálata során a sűrűlódási tényező értékét is módosítottam, viszont jelen tanulmányban csak a $\mu_{statikus} = \mu_{dinamikus} = 0,2$ esetet ismerttetem.



3. ábra Kontakt régiók

A kihajtóházat az „alján” rögzítettem DOF123-as kinematikai kényszerrel, míg présezőt egy RBE2-es elem segítségével vezettem be a présszerszám „tetején”. Az erőbevezetés és a megfogás a 4. ábrán látható.

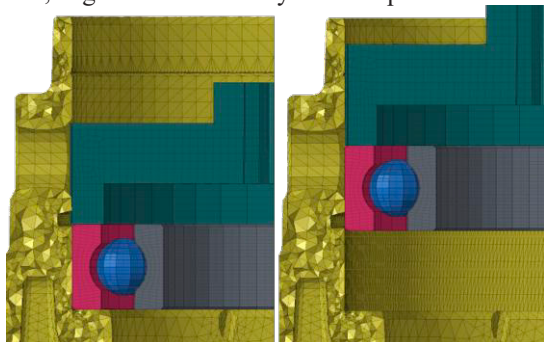


4 ábra. Kihajtóház kinematikai kényszerzése és a présező bevezetése

A két különböző szimulációtípus eltérő kezdeti geometriát igényelt. A lineáris statikai szimulációhoz a csapágybeprésselés majdnem végállapotát vettem alapul, azaz a csapágy és a csapágyfészek között 0,001 mm-es hézagot állítottam be. Ezzel szemben a nemlineáris statikai szimuláció esetén a kiinduló állapot a csapágy és a csapágyfészek első érintkezési pontja volt. Ebben az esetben a csapágy beprésselésének axiális útja 19,85 mm volt. E két kezdeti geometria az 5. ábrán látható.

A PERMAS megoldó lehetőséget biztosít arra, hogy a lineáris statikai szimuláció több lépésben történjen,

miközben a kontaktállapotokat és kontakt erőket CASO (Contact Analysis Status Output) fájlkon keresztül tovább viszi a következő lépésbe. Ezt kihasználva, a szimulációt több lépésként építettem fel, először aktiváltam a kontaktokat áthatás nélkül, majd bekapcsoltam az interferáló (negatív hézagú) kontaktokat, ezt követte a terhelési erő bevezetése történt, végül a súrlódási tényezőt kikapcsoltam.



Lineáris statika Nemlineáris statika
5. ábra Kezdeti geometriák lineáris statikai és nemlineáris statikai szimulációkhoz

Ez a megközelítés gyorsabb konvergenciát eredményezett, mivel a kontaktállapotok újrafelhasználása csökkentette az iterációk számát. Nemlineáris statikai szimuláció esetén kismértékű kontaktváltozások mellett a CASO fájlok alkalmazása hasonlóan előnyös lehet. [6]

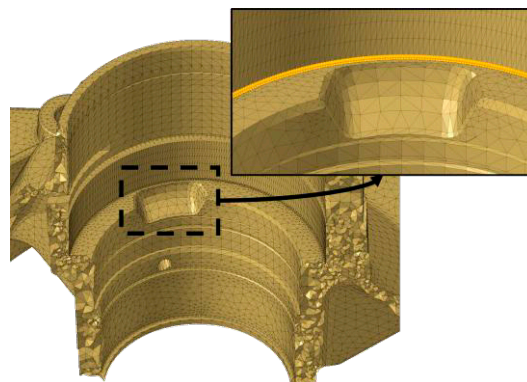
Kétféle anyagmodellt alkalmaztam a szimulációk során. A lineáris statikai szimulációhoz lineárisan rugalmas, izotropikus acélt ($E = 210\,000\text{ MPa}$, $\nu = 0,3$) és alumíniumot ($E = 75\,000\text{ MPa}$, $\nu = 0,35$) használtam, míg a nemlineáris statikai szimuláció esetén az alumínium anyagmodellje elasztó-plasztikus (képlékeny) anyagmodell, amely a fenti rugalmas paramétereken túl egy multi-lineáris feszültség - alakváltozás ($\sigma - \epsilon$) görbével lett definiálva, mely az 1. táblázatban látható.

1. táblázat Alumínium képlékeny anyagmodellje a rugalmassági határ felett

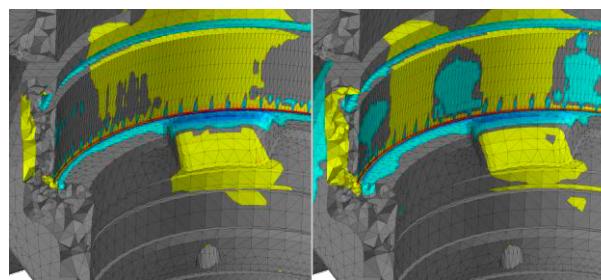
Feszültség (MPa)	Alakváltozás (-)
160	0
170	0,0001
200	0,0030
250	0,0050
990	0,0060

3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A szimulációkat lefuttatva a csapágyfészek alján található lekerekítésben ébredtek a legnagyobb feszültségek és azon belül is a kivágás környezetében annak feszültséggyűjtő hatása miatt. E régió a 6. ábrán látható, illetve e régió a feszültségi állapota a 7. ábrán látható.

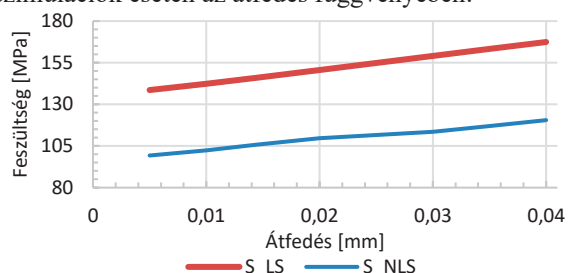


6. ábra Veszélyes régió a csapágyház alján található lekerekítés környezetében



Lineáris statika Nemlineáris statika
7. ábra Feszültségi állapot a kivágás környezetében

A csapágyfészek lekerekítésében ébredő legnagyobb feszültségérték nem azonos helyen ébredt. A 8. ábrán egy szabadon választott node-ban ébredő feszültségértékek láthatóak lineáris statikai és nemlineáris statikai szimulációk esetén az átfedés függvényében.



8. ábra Feszültség a csapágyfészek lekerekítésében egy kiválasztott ponton az átfedés függvényében

Kiértékelési szempontból a nemlineáris statikai szimuláció eredményeit tekintem mérvadónak, mivel ebben az esetben a megoldás az aktuális időlépésben az előző állapottól függ, azaz időlépéses megközelítést alkalmaz, mely kiterjed a kontaktállapotokra, valamint az anyagmodell nemlinearitásán felül a geometriai nemlinearitásra is (a szimulációt „Large Displacement”- azaz nagy elmozdulás funkcióval futtattam). A nemlineáris szimuláció feszültségértékeihez képest a lineáris statikai szimuláció a kiválasztott csomóponttól függően $\approx 130\text{-}140\%$ -kal túlbecsülte a feszültség értékeket.

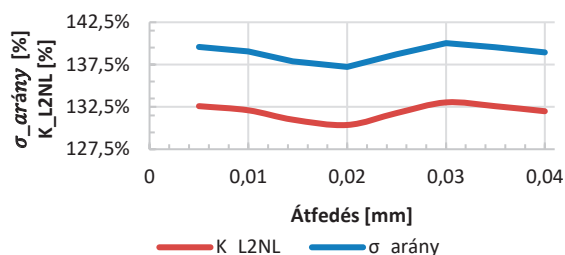
A lineáris statikai szimuláció előnye, hogy kisebb számítási erőforrást igényel, kevesebb pre- és posztprocesszási időt vesz igénybe, valamint stabilabb futást biztosít. A nemlineáris szimulációk esetében

előfordult, hogy a számítás nem futott le hibamentesen, és az időlépések finomhangolására volt szükség a konvergencia eléréséhez.

Az előbbi tényezők miatt hasonló feladatok esetén célszerű lehet a lineáris statikai (σ_{LS}) szimuláció alkalmazása, amelyet a nemlineáris (σ_{NLS}) eredményekhez viszonyított korrekciós szorzótényezővel lehet pontosítani. A két feszültség érték arányát az (1)-es egyenlet ismerteti.

$$\sigma_{arany} = \sigma_{LS} / \sigma_{NLS} \quad (1)$$

Az feszültség arány alakulása és az általam javasolt biztonsági tényező ($K_{L2NL} = \sigma_{arany} \cdot 0,95$) az átfedés függvényében a 9. ábrán láthatóak.



9. ábra Feszültségek aránya és K_{L2NL} aránya

A K_{L2NL} korrekciós tényező túlbecsüli a valós feszültséget a biztonsági irányába. E korrekciós tényező értéke ≈ 120 - 135% közötti, az átfedés és a vizsgált pozíció függvényében. A korrigált feszültség (σ_{kor}) érték a (2)-es egyenlettel számítható ki.

$$\sigma_{kor} = \sigma_{LS} / K_{L2NL} \quad (2)$$

A számolás 16 CPU magon futott párhuzamosítva. Az átlagos számolási idő lineáris statika esetén átlagosan 2,4 óra volt, míg nemlineáris statika esetén 88,9 óra. A leghosszabb számolási idő lineáris statikánál 3,5 óra, míg nemlineáris statika esetén 170,4 óra volt. Ezek az értékek egy mag esetén értendők, valós emberidőben ezek az értékek a magok számával osztandóak.

A pre- és posztprocesszási idő jelen feladatnál nem volt mérve. A sikertelen futások esetén az időlépések nagysága és az időfüggvények finomhangolása miatt a nemlineáris statika többlet időt igényel a lineáris statikához képest.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás célja egy golyóscsapágy bepréslési folyamatának vizsgálata egy váltó kihajtóházába. A csapágyfészek lekerekítésében kialakuló feszültségi állapotokat különböző átfedések ($G = 0,005 - 0,025$ mm) mellett vizsgáltam lineáris és nemlineáris statikai szimulációval. A nemlineáris modell pontosabb eredményeket adott, mivel komplexebb modellezési lehetőségeket tartalmaz, míg a lineáris gyorsabb és stabilabb futást biztosított.

A két módszer közötti eltérés alapján korrekciós szorzótényezőt határoztam meg (K_{L2NL}), amely lehetővé teszi a lineáris statikai szimulációk eredményeinek pontosítását egy 5%-os biztonsági tartománnyal. A

módszer segítségével a nemlineáris szimulációk részben kiválthatók, és csak kritikus esetekben szükségesek.

4. SUMMARY

This study investigates the press fitting process of a ball bearing into the output housing of a gearbox. Stress distribution around the bearing seat fillet was analyzed using linear and nonlinear static simulations across various overlap values ($G = 0.005-0.025$ mm). The nonlinear model provided more accurate results due to its ability to incorporate more complex modeling features and functions, while the linear model ensured faster and more stable simulation runs.

Based on the differences between the two methods, I determined a correction factor (K_{L2NL}), which allows the refinement of linear static simulation results within a 5% safety margin. With this method, nonlinear simulations can be partially replaced and are only necessary in critical cases.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a haszongépjárműves divízió szimulációs osztályának Simulation technology/Methodology research projektjén belül készült el a ZF Hungária Mérnöközpontjának és a magyarországi szimulációs csapat vezetésének támogatásával.

6. IRODALOM

- [1] OSWALD F. B., ZARETSKY E. V., POPLAWSKI J. V.: *Interference-Fit Life Factors for Ball Bearings*, NASA Technical Memorandum, NASA/TM—2010-216913, Glenn Research Center Cleveland, Ohio, USA, 2010
- [2] IZARD E., GARCÍA-MARTÍN R., RODRÍGUEZ-MARTÍN M., LORENZO M.: *Finite Element Analysis of Friction-Induced Stress Concentrations in Press Fits with Chamfer Hubs*, Lubricants Vol. 13, No. 5, 2025, pp. 231. DOI: 10.3390/lubricants13050231
- [3] LACROIX R., KERMOUCHE G., TEISSEIRE J., BARTHEL E.: *Plastic deformation and residual stresses in amorphous silica pillars under uniaxial loading*, Acta Materialia Vol. 60, No. 15, 2012, pp. 5555-5566. DOI: 10.1016/j.actamat.2012.07.016
- [4] DELLA CORTE C., STANFORD M. K., Jett T. R.: *Rolling Contact Fatigue of Superelastic Intermetallic Materials (SIM) for Use as Resilient Corrosion Resistant Bearings*, Tribology Letters, Vol. 57, No. 26, 2015, pp. 1-15. DOI: 10.1007/s11249-014-0456-3
- [5] MADIER D.: *Practical Finite Element Analysis for Mechanical Engineers*, FEA Academy, ISBN 978-1999047504, 2021.
- [6] INTES GmbH.: PERMAS - User's Reference Manual (PERMAS Version 20.00.189), INTES GmbH, Stuttgart, 2024.

Elektromágnesek modellezéséhez szükséges mérőberendezés fejlesztése

Development of a special-purpose measurement system for electromagnet modeling

Kapitány Pálma*, Dr. Szabó Tamás**, Dr. Rónai László***

ABSTRACT

This paper reports on research related to an energy-based modeling process of electromagnets. It presents the development of a special-purpose measurement system designed to perform three types of measurements on solenoids. First type is force-measurement with respect to the current and position values of iron core. The second type investigates the pull-in phenomenon, while the third measurement is related to drop test. Article includes the design of mechanical elements and conception, electrical consideration and the method of data acquisition.

1. BEVEZETÉS

A behúzótekercesek alkalmazásának számos területe ismert, mint például gépjárművek indítómotorjában, relék és mágneskapcsolók használata, hidraulikus- és pneumatikus szelepek vezérlésében, ipari automatizálásban reteszelési, adagolási és pozicionálási feladatokban, biztonsági rendszerek esetében pedig ajtózárok, mágneszárok, vészleállító mechanizmusok működtetésében.

A behúzótekercesek modellezése segíti a pontosabb tervezést, figyelembe venni a dinamikus viselkedést és a nemlineáris hatásokat a működés során. A modellezés csökkenti a prototípusgyártás idejét és költségeit, lehetőséget biztosít a határfok és a megbízhatóság növelésére, továbbá támogatja a diagnosztika és kutatás-fejlesztés folyamatát. A behúzótekercesek modellezése több módszer segítségével is történhet. Az analitikus módszer egyszerűsítéseket alkalmaz, gyors számításokat tesz lehetővé, a reluktancia (mágneses ellenállás) és induktancia alapján becsül behúzóerőt és lökethosszt; a módszer erősen idealizált [1], [2]. A numerikus módszerek, mint például a végeelem (FEM), a végestérfogat (FVM) vagy határelem (BEM) módszer során mind a mágneses tér alakulását, mind a kölcsönhatásban résztvevő elemek anyagtulajdonságát figyelembe veszi [3] – [5]. Az ilyen típusú módszerek előnye, hogy pontos eredményeket szolgáltat a Maxwell-egyenletek megoldásával, hátrányai között szerepel a nagy számítási kapacitás igénye, illetve a modellezett alkatrészek anyagi jellemzőinek pontos ismerete. A

harmadik modellalkotási szemlélet részben analitikus, részben pedig empirikus, ún. energia-alapú. A módszer erő-áram-löklet karakterisztika méréseken alapul, továbbá a mérési pontok sűrítése érdekében interpolációt alkalmaz. Az ilyen modellezés előnye a gyakorlati pontosságban rejlik, hátránya pedig az, hogy csak az adott geometriával rendelkező behúzótekercesekre alkalmazható.

Az alábbi cikk egy olyan kutatáshoz kapcsolódik, amely az utóbb említett modellezési eljárást alkalmazza [6]. Állandó mágneset is tartalmazó behúzótekercesek vizsgálata érdekében egy speciális mérőberendezés tervezése és fejlesztése történt meg, amely három típusú mérést tesz lehetővé a felszereléstől és a beállításoktól függetlenül. A mérőberendezés lehetővé teszi, hogy

- rögzített vasmagpozíciók mellett mérni lehessen a vasmagra ható erő nagyságát, a tekercsen folyó áram erősségét és a vezérlő kapocsfeszültségeket;
- gerjesztetlen tekercs esetén a vasmag adott pozíciókból való beejtését elvégezve mérhető legyen a tekercs végpontjain a mozgásból adódó indukált feszültség mértéke és a vasmag pozíciójának változása az idő függvényében;
- a különböző kapocsfeszültségek hatására, eltérő kezdeti pozíciók esetén a vasmag berántása megtörténjen és eközben mérhető legyen a tekercs áramfelvétele és a vasmag pozíciójának változása az idő függvényében.

A behúzótekerces házának rögzítése és a vasmag pozicionálása gépészeti tervezést igényelt, erről számol be részletesen az alábbi cikk 2. fejezete. A kapocsfeszültség vezérlése, a mérőkörben elhelyezett szenzorok kalibrálása és a mérési adatok rögzítésére szolgáló mérőkártya integrálása elektronikai megfontolásokat igényelt, erről a cikk 3. fejezetében lehet olvasni. A tanulmány végén található a tapasztalatok összegzése és a jövőre irányuló tervek.

A modellalkotás során mind a három típusú mérést szükséges elvégezni egy behúzótekerces esetében. A kapott erőfüggvényt a vasmag pozíciója szerint integrálva kiegészítő mágneses energiát lehet előállítani.

A bővített Hamilton-elv és mért indukált feszültség segítségével előállíthatók a mechanikai és elektromos paraméterek. A szimulációs eredményeket pedig össze lehet hasonlítani a berántás kísérleti mérési adataival.

* egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék

** óraadó, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék

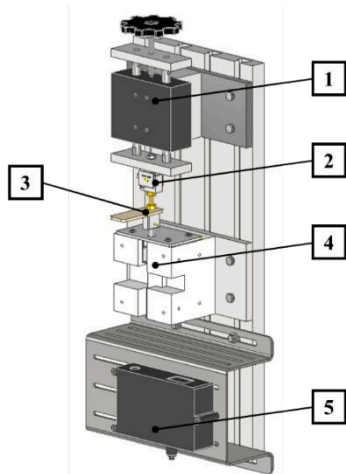
*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék

2. GÉPÉSZETI TERVEZÉS

Az alábbi fejezet a mérőberendezés gépészeti tervezésével foglalkozik.

2.1. Rögzített vasmagpozíciók mellett végzett erőmérés

Az 1. ábrán látható az elektromágnesek modellezéséhez szükséges erőmérés első konstrukciós vázlat. A mérés során az elektromágnes háza rögzítve van a 4 jelű, polioximetilén (POM) műanyagból készült tartóba, amely egyedi gyártásának köszönhetően több különböző behúzótekercs rögzítésére képes, csupán 90 fokkal elfordítva kell beszerelni az egységet. Az ábrán látható egy lehetséges elrendezés, amely során a vasmag pozicionálását az 1 jelű egység végzi. Ez egy ikerdugattyús pneumatikus munkahengert tartalmaz a megvezetés érdekében, az egyik végén egy menetesszárral fokozatmentesen állítható az emelés mértéke, míg az alsó kapcsolódási pontján a 2 jelű, S-típusú erőmérő szenzor csatlakoztatható. A pozicionáló egység végső elemcsoportja a 3 jelzést kapta, feladatai között szerepel, hogy nem ferromágneses (Al, Cu) fémes anyag segítségével kapcsolódjon a vasmag az erőmérő cellához, továbbá, hogy a vasmaghoz legközelebb egy lemez segítségével felületet biztosítson a lézeres távolságmérő számára. Ez utóbbi érzékelő az ábrán 5 jellel szerepel.

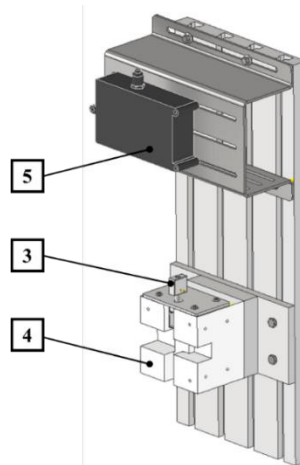


1. ábra: A mérőrendszer 3D-s modellje rögzített vasmagpozíciók mellett végzett erőmérésekhez

Ez a konstrukció statikus mérések elvégzését teszi lehetővé tetszőleges vasmag-pozíciókban. A használat során először ütközésig kell engedni a vasmagot a ház belsejébe. Majd a menetesszár segítségével adott értékkel kintebb mozdítható a vasmag. Ezt követően automata kapocsfeszültség vezérlés mentén mérhető a tekercs áramfelvétele, az erőmérő szenzor adatai és a vasmag pozíciójának esetleges változása is. A pozícióváltás és automata adatgyűjtés iteratív ismételt az elektromágnes teljes lökethosszán. Az automata mérés folyamata a 3. fejezetben olvasható.

2.2. Indukált feszültség mérése beejtési kísérlettel

Az energia-alapú modell felállításához szükség van olyan ejtőtestek elvégzésére is, amely során meghatározható a tekercs gerjesztetlen állapota esetén, csupán a vasmag mozgásából indukálódó feszültség csúcsértékére. Ezen ejtőtestek során továbbra is alkalmazni kell az 5 jelű lézeres távolságmérő szenzort, amely a vasmag pozícióját figyeli.



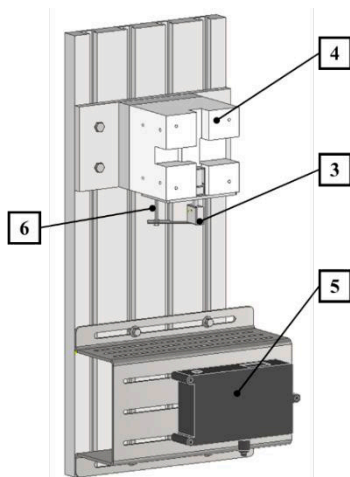
2. ábra: Mérőrendszer kialakítása indukált feszültség méréséhez beejtési kísérlettel

Ahogy az a 2. ábrán is látható, ebben az esetben is függőleges elrendezést alkalmazunk, legfelül helyeztük el a távolságmérőt, lentebb pedig megtalálható a 4 jelű, rögzítőhasáb, benne az elektromágnes házával. A 3 jelű kötőelem a vasmaggal együtt mozog, megfelelő felületet biztosítva a lézersugárnak a távolságméréshez.

2.3. Behúzási folyamat mérése

A moduláris mérőberendezés behúzási kísérletekhez készült koncepcióvázlata látható a 3. ábrán. Ebben az esetben is függőleges elrendezést részesítjük előnyben annak érdekében, hogy a tekercs kezdeti, gerjesztetlen állapota esetén a vasmag nyugalmi helyzetét a gravitációs erő biztosítsa. A 6 jelű ütköző egység egy menetes szár segítségével fokozatmentesen képes állítani az ütközőlemez magasságát, mely meghatározza a vasmag kezdeti helyzetét. A tekercsre kapcsolt kapocsfeszültség mágneses teret indukál, amely hatására a vasmag függőlegesen felfelé mozdul el, és adott esetben megtörténik a teljes behúzás.

Ezt a berántási folyamatot a már említett lézeres távolságmérő is figyeli, így a kísérlet végeztével megkapható a tekercs áramerősségének és a vasmag pozíciójának változása az idő függvényében. Mind az ejtőtestek, mind a teljes behúzás folyamatát végző mérések esetében szükséges alkalmazni egy olyan segédelemet, amely a 4 jelű rögzítőhasábot kitéríti a korábbi felfogatási pontjához képest, így a vasmagot a távolságmérő sugarába kényszeríti.



3. ábra: Behúzási kísérletek elvégzéséhez kialakított mérőrendszer

Az elektromágnesek modellezéséhez szükséges mérőberendezés fejlesztése során egyedi alkatrészek kerültek tervezésre, köztük találhatók lemezalkatrészek és forgácsolástechnikával előállított darabok is.

A triangulációs távolságmérő szenzor rögzítésénél olyan lézervágott és élhajlított alkatrész látható, amely a hosszirányú kikönnnyítések mentén másfajta felszerelést is biztosít, míg a merevségének köszönhetően megfelelő stabilitást nyújt. További, alumíniumból legyártott lemezalkatrészeket használunk az elektromágnes házának rögzítéséhez, és a behúzási kísérletek pozicionálásához is. Az ilyen típusú lemezalkatrészek gyártását az AR-Robotics Kft. támogatta. A polioximetilén rögzítőhasáb, az alumínium szerelőlapok, réz kötőelemek és ütköző elemek egyedi gyártását a Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet CNC megmunkálóállomásain gyárthattuk le. Az elkészült mérőberendezés látható a 4. ábrán.

3. ELEKTRONIKAI TERVEZÉS

Az elektromágnesek modellezéshez készített mérőberendezés két mechanikai- és két elektromos mennyiség mérését hivatott szolgálni, továbbá a kísérletek kapcsán mért adatok rögzítését az idő függvényében: erő, elmozdulás, valamint áramerősség és kapocsfeszültség. A mérések kalibrált szenzorokkal, egyedileg tervezett analóg céláramkörrel és egy mérési adatgyűjtő kártyával történtek.

A statikus kísérletek esetében a vasmagra ható erő mérését egy DYLY-106, S-típusú erőmérő szenzor végzi, amely egy beépített Wheatstone-híd kapcsolással és nyúlásmérő bélyegek segítségével képes a csavarodásból származó erőket kioltani, így csak a tengelyirányú erőkkel arányos analóg feszültségértéket szolgáltat. A szenzor feszültségforrása 12 V, és az érzékenysége 2 mV/V, a kalibrációját pedig hitelesített mérő súlyokkal végeztük el. A vasmag pozíciójának figyelésére egy Micro Epsilon optoNCDT-2220 típusú háromszögletű

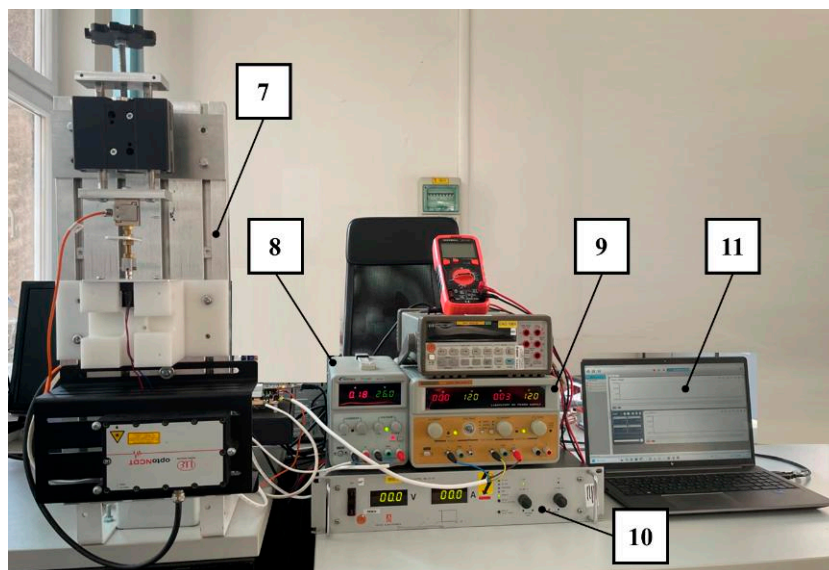
lézeres távolságmérő került beépítésre, amelynek mérési tartománya ± 100 mm, analóg kimeneti jele arányosan ± 5 V.

Mindkét szenzor analóg mérőjelét a kifejlesztett céláramkör LM358 típusú, általános célú műveleti erősítők segítségével felerősíti az MC-USB-205 típusú mérési adatgyűjtő kártya analóg bemeneteihez. Az eszköz analóg mérési tartománya ± 10 V, 12 bit felbontással maximum 500 kS/s mintavételi sebességgel rendelkezik. Mivel négy különböző csatornát használtunk, így ez utóbbi mennyiség maximum 125 kS/s értékre korlátozódott.

A vizsgált tárgyat képező behúzótekeres – ami akár állandó mágnessel szerelt kivitelű is lehet – áramfelvételének mérését az áramkörbe helyezett 0,1 Ω -os mérőellenálláson eső feszültség méréssel végeztük. INA181 típusú árammérő és LM358 műveleti erősítő segítségével tettük érzékelhetővé a jelet, mivel a legtöbb vizsgált elektromágnes áramfelvétele a 100 mA-es intervallumba esett. Abban az esetben, amikor ennek az 1-2 szerese volt jellemző, akkor két 0,1 Ω -os mérőellenállást kapcsolunk párhuzamosan, mint mérőellenállást és az LM358 műveleti erősítők ellenálláspárjait változtattuk meg. A kísérletek során a 12 V és 14 V üzemi feszültséggel rendelkező behúzótekereseket vizsgáltunk, így a kapocsfeszültség ellenőrzését feszültségosztó kapcsolással kötöttük a mérőkártya bementére.

A mérőkártyához tartozó DAQami szoftver segítségével definiáltuk a csatornák konfigurálását és a mintavételi frekvenciát. Az adatrögzítés trigger-jelét külső jel gyanánt definiáltuk, melyet egy Cypress PSoC 5LP CY8CKIT-059 típusú fejlesztői platform vezérelt. A céláramkör ezt az eszközt is magába foglalta, programozása által pedig a statikus mérések automata mérését valósította meg. A vasmag pozíciójának beállítását követően egyetlen gombnyomás indította a mérést: trigger-jelet kapott a mérőkártya, a fejlesztői platform pedig analóg kimenetén keresztül az SM35-45 típusú szabályozható tápegységet vezérelte. Ez utóbbi biztosította a stabilizált kapocsfeszültséget a tesztelt behúzótekeres számára. Adott vasmag-pozíció esetén az automata mérés során a kapocsfeszültség nulláról indult, 0,5 V-os lépésekben, melyek 80 ms ideig tartottak elérte az üzemi maximális kapocsfeszültséget. Eközben mind a négy adat mérésre és rögzítésre került, a szoftver segítségével pedig .csv formátumban exportálásra.

Az egyedi mérőberendezés látható a 4. ábrán, ahol a 7 jelű egység a korábbi fejezetekben bemutatott moduláris szerelőplatform. A céláramkör és szenzorok energiaforrását a 8 és 9 jelű laboratóriumi tápegység biztosítja (stabilizált 26 V és ± 12 V), míg a 10 jelű a szabályozható SM35-45 feszültségforrás. A mérésadatgyűjtőhöz tartozó DAQami szoftver a 11 jelű számítógépen működött.



4. ábra: Elektromágnesek modellezéséhez fejlesztett mérőberendezés

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a tanulmány olyan mérőberendezés fejlesztéséről számolt be, amely elektromágnesek modellezéséhez kapcsolódó erőmérésekre, ejtési és behúzási kísérletek elvégzésére alkalmas, miközben rögzíti: az áramerősség, a vasmag pozíció, kapocsfeszültség és vasmagra ható erő értékeit az idő függvényében. Részletes ismertetésre került a moduláris szerelhető platform a különböző típusú kísérletek céljából. Továbbá egyedi céláramkör tervezését is ismertetette, ami az a szükséges szenzorjelek feldolgozását és a kapocsfeszültség vezérlését hajtja végre. A mért értékeket az alkalmazott mérőkártya szoftveres beállításain keresztül lehetett rögzíteni és exportálni adatfájlként. Ezen adatok szükségesek az energiaalapú modell és szimuláció validálásához.

5. SUMMARY

This study reported on the development of a measuring device that is suitable for force measurements related to the modeling of electromagnets, for performing drop and pull-in experiments, while recording: current, core position, terminal voltage and force acting on the core as a function of time. The modular mounting platform for different types of monitoring was described in detail. Furthermore, the design of a custom target circuit was described, which performs the necessary sensor signal processing and terminal voltage control. The measured values could be recorded and exported as a data file through the software settings of the applied measuring card. These data are necessary for the validation of the energy-based model and simulation.

6. IRODALOM

- [1] TIAN H., ZHAO Y.: *Coil Inductance Model Based Solenoid on-off Valve Spool Displacement Sensing via Laser Calibration*, Sensors, 2018, Article 4492, <https://doi.org/10.3390/s18124492>
- [2] Demarchi A., Farçoni L., Pinto A., Lang R., Romero R., Silva I.: *Modelling a Solenoid's Valve Movement*, RoboCup 2017: Robot World Cup XXI, pp. 290-301, https://doi.org/10.1007/978-3-030-00308-1_24
- [3] DÜZGÜN E., ŞEFKAT G.: *The Design and Analysis of a Proportional Solenoid with Experimental Validation of Static and Dynamic Behavior*, Applied Sciences, 2024, Article 11990 <https://doi.org/10.3390/app142411990>
- [4] YUNHONG Z., ZONGJIE Z., and RONGSHENG D.: *Simulation and optimisation design of the solenoid valve*, The Journal of Engineering, Vol. 2019, No. 23, <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9087>
- [5] HUCKO S., TAO X., SCHMITZ K.: *Real-Time Models of Valve Solenoids: an Evaluation of Measurement And Simulation-Based Parameter Identification*, 14th International Fluid Power Conference, 2024, <https://doi.org/10.13052/rp-9788770042222C84>
- [6] KAPITÁNY P.: Mérőeszköz fejlesztése állandó mágneset tartalmazó elektromágnes vizsgálatához, XXVI. Tavaszi Szél Konferencia 2023: Tanulmánykötet I., pp. 494-500.

GŐZFEJLESZTŐ HŐÁTADÓ CSÖVEK SZERKEZETINTEGRITÁSI ÉRTÉKELÉSÉNEK FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE A NYOMOTTVIZES ATOMERŐMŰVEKBEN

EVOLUTION OF STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF STEAM GENERATOR HEAT TRANSFER TUBES IN PRESSURIZED WATER REACTORS

Kasó Ferenc Áron*, Dr. Zwierczyk Péter Tamás**

ABSTRACT

The evaluation of degradation mechanisms in steam generator heat transfer tubes, the identification of failure modes, and the associated assessment methodologies have undergone significant developments compared to those applied in early pressurized water reactors. The objective of this study is to summarize the methodological approaches and found in the literature and present them in a structured format that is comprehensible even to non-expert readers. In addition to reviewing the evolution of assessment techniques, the study also highlights opportunities for further methodological development to improve early detection and monitoring of degradation processes.

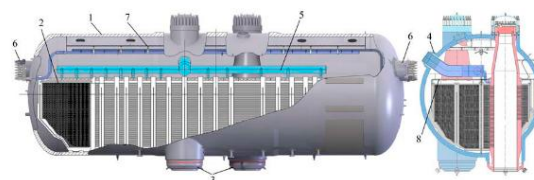
1. BEVEZETÉS

Az első kereskedelmi célú atomerőmű üzembe helyezése óta eltelt több mint hetven év során a reaktorok generációs fejlődéseken mentek keresztül. A kezdeti villamos- és hőenergiatermelő képesség többszörösére nőtt, a legnagyobb villamos teljesítményű reaktorok ma már meghaladják az 1600 MW-ot. [1]

A nyomottvizes reaktorok (pressurized water reactor - PWR) – amelyek vízhűtésű és vízmódorálású rendszerek – az 1970-es évektől kezdődően váltak dominánssá a kereskedelmi célú villamosenergia-termelésben. Jelenleg az üzemelő reaktorok mintegy 73%-a [2] ezen technológia alapján működik.

Nyomottvizes reaktorok kétkörös felépítésűek, a reaktorból elszállított hőt a hűtőközeg a gőzfejlesztő hőátadó csövein keresztül adja át a primer körtől hermetikusan elválasztott szekunder körnek. A gőzfejlesztők kulcsszerepet töltenek be a hőátadásban, a radioaktív anyagok primer körön belüli tartásában, valamint a remanens hő elvonásában. A különböző tervezési filozófiák ellenére – például az orosz WVER (water - water energetic reactor, de általánosan elfogadott a VVER megnevezés is) típusú blokkok és az amerikai

eredetű PWR rendszerek között – a gőzfejlesztők alapvető funkciói azonosak [3].



1 - tartály, 2 - hőátadó csövek, 3 - hideg- és melegági kollektor, 4 - tápvíz csomópont, 5 - tápvíz elosztó kollektor, 6 - szerelőnyílás, 7 - cseppleválasztó

1. ábra. WWER 1000 gőzfejlesztő PGV-1000MKP [4]

Az 1. ábra az előbbi csoportba tartozó WWER-1000 típusoknál alkalmazott gőzfejlesztőt és annak részeit mutatja be.

A gőzfejlesztők belsejében található több ezer hőátadó csövek leggyakrabban U alakban [4] kerülnek beépítésre. Ezeket úgy tervezték, hogy elegendő hőátadó felület tartálékkal rendelkezzenek az erőmű tervezett élettartamára. [5] Amennyiben a hőátadó csöveket érő különféle degradációs mechanizmusok szivárgást idéznek elő, a sérült elemeket ki kell zárni a rendszerből a primer kör hermetikusságának fenntartása érdekében. A legelterjedtebb gyakorlat szerint az érintett csöveket mechanikusan lezárják, dugózzák, ezáltal megakadályozva a radioaktív közeg átszivárgását a szekunder körbe. Ugyanakkor a csőkizárások közvetlen hatással vannak az erőmű gazdasági és energetikai teljesítményére, mivel a rendelkezésre álló hőátadó felület csökkenése a blokk hatásfokának romlását és rosszabb esetben funkcióinak elvesztését eredményezheti. Ennek megfelelően a hőátadó csöveket érő hatások pontos ismerete, a tönkremeneteli mechanizmusok mélyreható megértése, valamint a csőkizárások számának minimalizálása kiemelt jelentőséggel bír a nyomottvizes reaktorok tervezése, üzemeltetése és üzemidő-hosszabbítása szempontjából. [6]

* óráadó, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék, kaso.ferenc@gt3.bme.hu

** egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék, z.peter@gt3.bme.hu

2. A HŐÁTADÓ CSÖVEK INTEGRITÁSVIZSGÁLATÁNAK FEJLŐDÉSE ÉS JÖVŐBELI IRÁNYAI

2.1. A hőátadó csövek meghibásodásának diagnosztikai és kezdeti értékelési módszerei

A gőzfejlesztők hőátadó csöveinek integritására vonatkozó előírások és követelmények már a nyomottvízes erőművek üzemeltetésének korai szakaszában megjelentek. E szabályozások elsődleges célja a csőtörések bekövetkezésének valószínűségének minimalizálása, valamint a csőtörés esetén a primer körből a szekunder körbe történő hűtőközeg-átáramlás mértékének csökkentése volt.

A hőátadó csöveket erő domináns mechanikai terhelést a primer és szekunder kör közötti nyomáskülönbségből adódó belső nyomás jelenti. A csövek gőzfejlesztőkhöz történő rögzítése – mechanikus felperemezés, hidraulikus tágitás vagy robbantásos hegesztés révén – további maradó feszültségeket eredményez, amelyek szintén hozzájárulhatnak a csövek tönkremeneteléhez. Emellett a normál üzemi körülmények között fennálló hőmérsékleti viszonyok, valamint az üzemi események során fellépő nyomás- és hőmérsékletingadozások is gyorsítják a degradációs folyamatokat. A csövek károsodásában jelentős szerepet játszanak továbbá a primer és szekunder oldali közegek kémiai összetétele és korrozív tulajdonságai.

A hőátadó csövek integritásának vizsgálatára a kezdeti időszakban különböző nem destruktív módszereket alkalmaztak. A WWER típusú blokkok esetében például levegővel, héliummal vagy fluoreszkáló nyomjelző anyaggal végzett buborékpróbák, valamint magas nyomású hidrosztatikus nyomáspróbák szolgáltak a csőhibák detektálására. A hibásnak minősített csöveket ezt követően mechanikusan lezárták a kollektor oldaláról, ezzel biztosítva a primer kör hermetikusságát. [4], [7]

Mind a PWR, mind a WWER típusok esetében léteznek olyan korszerű, roncsolásmentes vizsgálati módszerek, amelyek nagy megbízhatósággal képesek detektálni nemcsak az átrepedt, hanem a szerkezeti hibával terhelt, de még nem szivárgó hőátadó csöveket is. A legszélesebb körben alkalmazott technika az örvényáramos vizsgálat, amelyet kiegészíthetnek ultrahangos, elektromágneses és különböző vizuális elveken alapuló ellenőrzési eljárásokkal. [4]

A roncsolásmentes vizsgálatok eredményeinek kiértékelése alapján szükséges a hőátadó csövek károsodott szakaszainak azonosítása, és indokolt esetben azok kizárása a primer körből a hermetikus zártság fenntartása érdekében. A szerkezetintegritási értékelések korai szakaszában jellemzően konzervatív szemléletet alkalmaztak, amely a biztonság elsődlegességét helyezte előtérbe. Ennek egyik példája a 40%-os kritérium, amely szerint a cső külső átmérőjének csökkenése nem haladhatja meg a 40%-ot; e határérték túllépése esetén a cső kizárásra került a rendszerből. [8]

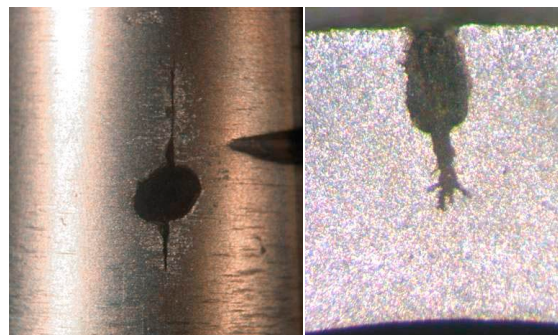
A meghibásodó hőátadó csövek nagy száma miatt, az Electric Power Research Institute (EPRI) összesítése szerint az Egyesült Államokban a 130 üzemelő PWR blokkból 78-ban [4] kellett gőzfejlesztőt cserélni. Az Oroszországban üzemelő WWER-440 blokkokban a hőátadó csövek 1,8 százalékát kellett ledugózni, míg a WWER-1000 esetében a csövek 0,7 százalékát 2005-ig bezárólag [4]. A paksi WWER-440 blokkok hasonló arányban rendelkeznek ledugózott hőátadó csövekkel a 2023-as adatok szerint [5].

2.2. Hőátadó csövek károsodási mechanizmusainak értékelése

Egy nyomottvízes blokkban 2-6 gőzfejlesztő helyezkedik el. Az EPRI által kiadott útmutató [8] szerint két típusra bontható a gőzfejlesztő hőátadó csövek vizsgálata. Minden elemet szükséges üzembe helyezés előtt átvizsgálni, illetve az első üzem közbeni vizsgálat során is a teljes terjedelmet szükséges ellenőrizni. További vizsgálatokra csak kampányok közötti időszakokban van lehetőség. Általánosan kijelenthető, ha nincs üzem során detektált szivárgás, akkor a csövek csak egy kisebb részét vizsgálják át előre meghatározott ütemterv szerint. Oroszországban a WWER reaktorokat a tervező intézet ajánlása szerint, amennyiben nincs a korábban detektált degradációs állapotokban változás, akkor minden gőzfejlesztőt négyévente kell ellenőrizni annak érdekében, hogy 12 év alatt 100%-os lefedettséget [4] érjenek el. Az ellenőrzés terjedelmét és gyakoriságát növelni kell, ha a mintavételes vizsgálatok során degradációt észlelnek.

Az eltelt évtizedek alatt különböző degradációs mechanizmusokat azonosítottak, amelyek a hőátadó csövek tönkremeneteléhez vezetnek. WWER blokkok esetén a meghibásodások a következő okokra lettek visszavezetve [7]:

- gyártási folyamatból eredő károsodások,
- általános korrózió,
- pitting,
- feszültségkorróziós repedés,
- pitting és feszültségkorróziós repedés kombinációja (2. ábra).

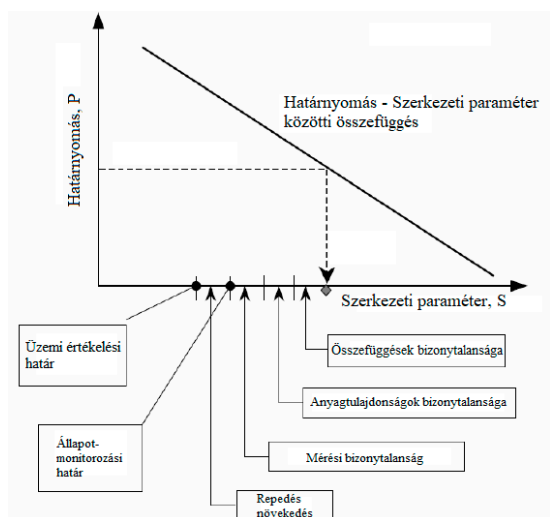


2. ábra. Feszültségkorróziós repedés és pitting kombinációja (Dél-ukrajnai atomerőmű) [7]

Ezen degradációs mechanizmusok részletes ismerete elengedhetetlen a tönkremeneteli folyamat időbeli azonosításához, valamint a csövek aktuális szerkezeti állapotának megbízható értékeléséhez. A károsodások értékelése során úgynevezett teljesítménykritériumok alkalmazása szükséges, amelyek meghatározzák, hogy a vizsgált cső megfelel-e a biztonságos üzemeltetéshez szükséges feltételeknek. [4], [7], [9]:

- szerkezetintegritási kritérium;
- üzem közbeni szivárgási kritérium;
- baleset indukált szivárgási kritérium.

A szerkezeti integritási kritérium teljesítése determinisztikus és valószínűségi megközelítés alapján egyaránt szükséges. A módszertan lényege, hogy a cső „burst pressure” (határnyomás, cső felhasadásához tartozó nyomás) értéke megfeleltethető legyen egy mérhető szerkezeti paraméternek, például a repedésméretnek vagy a falvastagságnak. Ez lehetővé teszi annak igazolását, hogy a cső a várható üzemi terhelések mellett biztonságosan tovább üzemeltethető. A kritérium alkalmazása során figyelembe kell venni a repedésterjedés előrejelzett alakulását, valamint a mérési eljárások és anyagjellemzők bizonytalanságait (3. ábra).



3. ábra. Határnyomás és a mérhető szerkezeti paraméter közötti összefüggés [7]

Az üzem közbeni szivárgási teljesítménykritérium előírja, hogy a primerköri közeg szivárgása normál üzemi körülmények között ne haladja meg a szabályozási előírásokban rögzített értékeket. A megfelelőség igazolása folyamatos monitoring és mért adatok alapján történik.

A baleseti szivárgási teljesítménykritérium célja, hogy korlátozza a primer-köri közeg szekunder körbe történő szivárgását olyan tervezési alaphelyzetek során, amelyek nem járnak csőtöréssel. A megfelelőség igazolása számításokon alapul, amelyek előre jelzik a különböző baleseti forgatókönyvek során várható szivárgás mértékét. [9]

WWER gőzfejlesztők esetén a csövek degradációjának előzetes értékelése a leállás előtt

történik, célja a meglévő hibák és új degradációs mechanizmusok azonosítása. Ez alapján határozzák meg a vizsgálati módszereket és mintavételi stratégiát. Az integritásértékelés minden leálláskor kötelező, és biztosítja, hogy a teljesítménykritériumok teljesüljenek. Két fő eleme az állapotmonitorozás és az üzemi értékelés. Az állapotmonitorozás a csövek aktuális állapotát vizsgálja az előző ciklusra vonatkozóan, míg az üzemi értékelés a következő időszakra prognosztizálja az integritás fenntarthatóságát. Nem megfelelő eredmények esetén okfeltárás és korrekció szükséges, melyek visszacsatolásként szolgálnak a jövőbeli vizsgálati tervekhez. [7]

Ha az üzemi értékelés során a teljesítménykritériumok sérülnek akkor az adott cső javítását vagy kizárását kell elvégezni. PWR blokkok esetén alkalmazásra kerülhetnek még különböző megelőző technikák, amik a csövek degradációját hivatottak lassítani, például az U alakú csövek lokális feszültségmentesítése vagy a melegági hőmérséklet mérséklése, ezáltal a korrózió folyamatok lassítása. [4]

2.3. Új módszerek a hőátadó csövek szerkezetintegritási értékelésében és az alkalmazásukhoz szükséges feltételek

A második generációs nyomottvízes blokkok eredetileg tervezett élettartama 30-40 év volt. Az üzemidő-hosszabbítási programok révén azonban számos, az 1970-es és 1980-as években épült blokk további 20 évig is biztonságosan üzemeltethetővé vált. Az elkövetkező évtizedben esedékes újabb üzemidő-hosszabbítási ciklusok, valamint a hosszú távú üzemeltetés lehetőségeit teremtenek a hőátadó csövek degradációs mechanizmusainak értékelésére szolgáló módszerek továbbfejlesztésére. Az új műszaki eredmények, például a korszerű anyagvizsgálati technikák, numerikus modellezési eszközök és megbízhatóság-alapú értékelési eljárások integrálása révén lehetőség nyílik a szerkezetintegritási vizsgálatok pontosságának növelésére, valamint a csőkizárások számának optimalizálására.

BERGANT és szerzőtársai [10] tanulmányukban a gőzfejlesztő hőátadó csövek szerkezeti integritásának értékelésére koncentráltak, különös tekintettel a repedésekkel terhelt csövek meghibásodási mechanizmusaira. A hagyományos, bizonyos esetekben túlzottan konzervatív teljesítménykritériumok – mint például az ASME által előírt „40%-os falvastagság” szabály, illetve a képlékeny határterhelésen (plastic load limit) alapuló repedési nyomásértékekhez rendelt 3, illetve 1,4 biztonsági tényezők [9] – gyakran a szükségesnél több cső kizárását eredményezik, ami gazdasági és üzemeltetési szempontból is kedvezőtlen. A szerzők egy modernebb, realisztikusabb megközelítést javasolnak a „Failure Assessment Diagram” (FAD) alkalmazásával. A FAD módszer újdonsága abban rejlik, hogy integráltan kezeli a repedés által okozott törés és a túlzott képlékeny deformáció miatti tönkremenetel

közötti átmenetet, lehetővé téve a repedés típusának, geometriájának, anyagjellemzőinek és terhelési viszonyainak együttes figyelembevételét. Újabb kutatások [11], már a FAD különböző továbbfejlesztéseit javasolják az értékelés finomhangolására, figyelembe véve a hőátadó csövek valós anyagtulajdonságait és a károsodott elemek repedéseinek elhelyezkedését, orientáltságát, illetve geometriai tulajdonságait.

A hőátadó csövek szerkezetintegritásának korszerű értékelése érdekében elengedhetetlen a törésmechanikai jellemzők pontos meghatározása üzemi körülmények között. Ehhez további célzott anyagvizsgálatok szükségesek, különös tekintettel az üzemi hőmérsékleten (pl. 300 °C) érvényes mechanikai tulajdonságokra, valamint azok időbeli változásának nyomon követésére.

A témakörhöz kapcsolódóan végzett anyagvizsgálatok – mint például BERGANT és szerzőtársai [12] tanulmányában bemutatott eredmények – rámutatnak arra, hogy a hőátadó csövek törésmechanikai jellemzőinek pontos meghatározása elengedhetetlen a szerkezetintegritási értékelések megbízhatóságának növeléséhez. Az eredmények alapján megállapítható, hogy bár a vizsgált hőátadó csövek kedvező hőmérsékletfüggő törésmechanikai viselkedést mutatnak, az üzemi hőmérsékleten történő vizsgálatuk továbbra is kiemelt jelentőséggel bír. A hőmérsékletváltozás hatásainak figyelembevétele különösen fontos a repedéskritériumok pontos meghatározása és a hosszú távú üzemeltetési biztonság szempontjából.

A mérések és állapotmonitorozás mellett a numerikus szimulációk azért kiemelten fontosak, mert lehetővé teszik a repedések viselkedésének előrejelzését olyan bonyolult terhelési és geometriai helyzetekben is, amelyeket kísérletileg nehéz vagy költséges vizsgálni (4. ábra). Ez különösen lényeges a súlyos baleseti forgatókönyvek esetén, ahol a biztonsági tartalékok pontos ismerete elengedhetetlen. [13]

A hőátadó csövekben detektált repedések egymásra gyakorolt hatásának vizsgálata a szerkezetintegritási értékelések egyre fontosabb kutatási irányát képezi. [14] A kapcsolódó tanulmányban a szerzők a korábban kidolgozott analitikus egyenletek eredményeit hasonlítják össze numerikus törési eseteket modellező szimulációkkal, különböző repedésmélységek és geometriai elhelyezkedések esetén. A vizsgálat kiterjed az egymással párhuzamos, átfedő, nem átfedő, valamint részben átfedő repedésekre, lehetővé téve a repedések kölcsönhatásának pontosabb megértését és annak hatását a cső integritására.



4. ábra. Cső repedési nyomásának meghatározása kísérleti és numerikus módszerek segítségével [13]

A legújabb kutatási irányt képviseli a gőzfejlesztő hőátadó csöveinek digitális iker modelljének megalkotása. [15] Egy ilyen rendszer épít az elmúlt évtizedek kutatási eredményeire és műszaki fejlődésére. A modell két fő technológiát integrál: a kiterjesztett végesesemes módszert (XFEM) és gépi tanulási algoritmusokat. A kutatás során kísérleti adatok és szimulációs eredmények alapján összehasonlították a különböző előrejelzési módszerek pontosságát, rugalmasságát és tanítási költségét. A tanulmány új technikai alapot kínál a nukleáris berendezések állapotfelügyeletének és karbantartási stratégiáinak optimalizálásához.

3. ÖSSZEGZÉS

A korszerű tudományos ismeretek és az üzemeltetés során gyűjtött tapasztalatok lehetőséget teremtenek a korábban alkalmazott szerkezetintegritási értékelési eljárások továbbfejlesztésére. Ezáltal lehetőség nyílik a hőátadó csövek különböző degradációs mechanizmusainak korai detektálására, megfelelő dokumentálására, valamint a folyamatok még hatékonyabb monitorozására. Mindez hozzájárul a biztonságos és gazdaságos üzemeltetés megvalósításához nemcsak a már működő atomerőművek esetében, hanem a tervezés alatt álló nagyerőművek, a negyedik generációs reaktorok, illetve az SMR (kis moduláris reaktor) projektek vonatkozásában is.

4. SUMMARY

Latest developments in the field of the heat transfer tubes and the operational experience provides an opportunity to further develop previously applied structural integrity assessment methodologies. These developments enable the early detection, accurate documentation, and more effective monitoring of various degradation mechanisms affecting heat transfer tubes. These improvements contribute to the safe and economically efficient operation not only of existing nuclear power plants, but also of facilities under design, including large-scale reactors, fourth-generation systems, and small modular reactor (SMR) projects.

6. IRODALOM

- [1] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION REACTOR DATABASE <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary> [elérés: 2025.10.08.]
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Nuclear Power Reactors in the World – 2025 Edition* Reference Data Series No. 2 Bécs, 2025, <https://doi.org/10.61092/iaea.lg28-w3uk>
- [3] CACUCI D. G. (Ed.): *Handbook of Nuclear Engineering*, Vols. 1–5, Springer Science+Business Media, New York, 2010, ISBN: 978-0-387-9830-7

- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators*, IAEA-TECDOC-1668, Bécs, 2011, ISBN 978-92-0-121410-2 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1668_web.pdf [elérés: 2025.10.08.]
- [5] KATONA T.J., BIRO Á., RÁTKAI S.: *Feasibility of Safe Operation of WWER-440-Type Nuclear Power Plants for Up to 60–70 Years*, *Energies*, Vol. 16, 4170, 2023, <https://doi.org/10.3390/en16104170>
- [6] SLUGEN V., VETERNIKOVA J. S., DOMANKOVA M., GAVALEC M., PETZOVA J., SLNEK D., DZUBINSKY M., SHUGAYLO O., SZENTHE I., GILLEMOT F., ZARAZOVSKII M., LYDMAN J., KOPRIVA R., SZAVAI Sz., SRBA O.: *VVER long-term operation – A review based on the material studies results from past and ongoing EU-supported research projects*, *Nuclear Engineering and Design* 435, 2025 <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113949>
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity*, IAEA-TECDOC-1577, IAEA, Bécs, 2007, ISBN 978-92-0-110307-9 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1577_web.pdf [elérés: 2025.10.08.]
- [8] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE: *Steam Generator Integrity Assessment Guidelines Revision 3*, EPRI, Palo Alto 2009 <https://www.nrc.gov/docs/ML1004/ML100480243.pdf> [elérés: 2025.10.08.]
- [9] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE: *Steam Generator Program Guidelines, NEI 97-06 [Rev. 3]*, Nuclear Energy Institute, Washington D.C., 2011 <https://www.nrc.gov/docs/ML1113/ML111310708.pdf> [elérés: 2025.10.08.]
- [10] BERGANT M. A., YAWNY A. A., PEREZ IPINA J. E.: *Failure Assessment Diagram in Structural Integrity Analysis of Steam Generator Tubes*, *Procedia Materials Science*, Vol. 8, pp. 128-138, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.056>
- [11] BERGANT M. A., YAWNY A. A., PEREZ IPINA J. E.: *A comparison of failure assessment diagram options for Inconel 690 and Incoloy 800 nuclear steam generator tubes*, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 140, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107310>
- [12] BERGANT M. A., YAWNY A. A., PEREZ IPINA J. E.: *J-resistance curves for Inconel 690 and Incoloy 800 nuclear steam generator tubes at room temperature and at 300 °C*, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 486, pp. 298–307., 2017 <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.01.040>
- [13] MOHANTY S., MAJUMDAR S., NATESAN K.: *Steam generator tube rupture simulation using extended finite element method*, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 305, pp. 697–705., 2016, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.06.031>
- [14] KIM J.-S., LEE M.-W., KIM Y.-J., KIM J.-W.: *Numerical validation of burst pressure estimation equations for steam generator tubes with multiple axial surface cracks*, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 51, pp. 579–587., 2019, <https://doi.org/10.1016/j.net.2018.10.013>
- [15] JIANG Y., XIA H., ZHANG J., ZHU Y., ZHANG K., HUANG X., YIN W., JIANG P.: *Digital twin model generation for crack propagation in steam generator tubes, Methods and implementation*. *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 224, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111697>

BOKA ÍZÜLET 3D MODELLEZÉSE

3D MODELING OF THE ANKLE JOINT

Dr. Kátai László*, Nagy István**, Dr. Gárdonyi Péter***

ABSTRACT

The ankle joint is one of the most complex articulations of the human body, playing a crucial role in locomotion and weight-bearing. This study focuses on the 3D modeling of the ankle joint with the aim of providing a precise biomechanical and kinematic representation. The research first reviews the anatomical and structural characteristics of the foot and ankle, highlighting the bones, ligaments, and movement constraints that define its mechanical behavior. Based on these findings, engineering and kinematic approaches were applied to develop a computational model capable of simulating joint movements under different conditions. The resulting 3D model enables the analysis of load distribution, range of motion, and joint stability, which are essential for both clinical diagnostics and the design of medical devices. Furthermore, the model provides a foundation for virtual simulations and potential future applications in orthopedics, rehabilitation, and prosthetic development. Overall, the study demonstrates how engineering methodologies and anatomical knowledge can be combined to create a robust digital twin of the ankle joint, facilitating both research and medical practice.

1. BEVEZETÉS

A boka az egyik igen összetett ízülete az emberi testnek. Kinematikai modellezése kihívást jelentő feladat. A bokaízület teljes egysége az alsó lábszárból és a lábfejből áll, és olyan kinetikus összeköttetést képez, amely lehetővé teszi az alsó végtagok és a talaj közötti kölcsönhatást, ami a járás és más mindennapi tevékenységek elengedhetetlen feltétele.

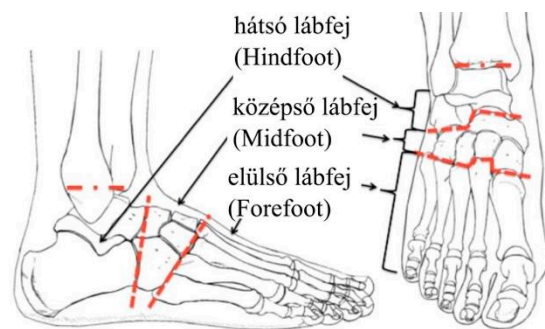
A kutatási téma elsősorban arra irányul, hogy a boka egyes részegységeit megvizsgáljuk, ezt műszaki szempontok szerint értelmezzük, majd ennek figyelembevételével lehetővé tegyük egy kinematikai szerkezetet létrehozását, amely később lehetőséget biztosít a boka mozgásának számítógépes szimulációjára.

2. A BOKA ANATÓMIÁJA

2.1. A lábfej struktúrája

Az emberi boka értelmezéséhez meg kell ismernünk a teljes lábfejet, és annak alkotó részeinek összességét. A mozgások kordinációja során a lábfej egésze meghatározza milyen mozgási kényszerekkel rendelkezik a boka, ez pedig nagymértékben függ a

csontozat kialakításától. Az emberi lábfej kiképzéséből adódóan egy ízületi komplexnek felel meg. A különböző talajtípus, érintkezési felület esetében biztos alapot kell teljesítenie, ami mellett a talajjal szemben az emberi szerkezetnek egyfajta rugalmasságot kell biztosítania. Mozgási lehetőségei alapján az izomerőt továbbítani képes legyen a talaj irányába. Szerkezete gördülékeny mozgást megfelelően elősegítse, végül a legfontosabb feladata az egyensúly állandó megtartása. [1] A lábfej szerkezeti felépítése alapján három nagy csoportba oszthatóak, ezek a hátsó lábfej (Hindfoot), a középső lábfej (Midfoot) és az elülső lábfej (Forefoot), ahol a lábfej szakaszai pozíciójuk alapján struktúrákba vannak osztva (1. ábra).



1. ábra A lábfej strukturális felépítése [2]

Fontos, hogy a lábszár irányából is vizsgálni kell a struktúráját, ahol további csontokat és ízületi kapcsolódásokat találhatunk. Továbbá ezek a csontok is hatással lesznek a boka mozgáslehetőségeire, annak korlátjaihoz. A két legfontosabb csont, amely a boka szerkezetét köti össze lábszárral, a sípcsont (Tibia) és a szárcsapocscsont (Fibula), amelyek a hátsó lábfej pozíciójától „felfele” helyezkednek el, későbbiek során ezt y iránynak fogjuk nevezni.

A bokaízületen tovább haladva a talaj irányába, három csont találkozásának és kapcsolódásának jellege adja az elsődleges bokamozgást jellemző csuklós elmozdulást, ezek az előbbiek során említett Tibia és Fibula, amelyek foglalatik kiképzésükbe illeszkedik az ugrócsont (Talus). Tovább haladva a szerkezeti felépítésen a Talus további két csonton fekszik fel, amelyek a Tibia és Fibula által meghatározott főtengelyhez képest első és hátsó irányba orientálódnak, ez a két csont a sarokcsont (Calcaneus) és a sajkacsont (Navicular).

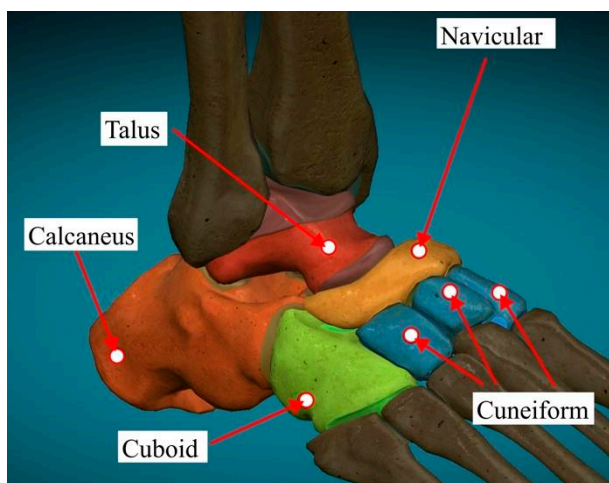
Fontos megjegyezni, hogy a hátsó pozíciójú Calcaneus csont közvetlen kapcsolatban van a talajjal,

* egyetemi tanár, MATE, Műszaki Intézet

** mesteroktató, MATE, Műszaki Intézet

*** egyetemi adjunktus, MATE, Műszaki Intézet

míg a Navicular a további négy lábtő (Tarsal) csonttal van kapcsolatban, így a szerkezeti felépítést tagoltabbá téve. A három darab lábközépcsont (Cuneiform) és a Cuboid kapcsolódik a lábfejjel, így a lábujjakkal (2. ábra). A lábfejen a talajjal érintkező felületet Plantar surface-nek nevezzük.

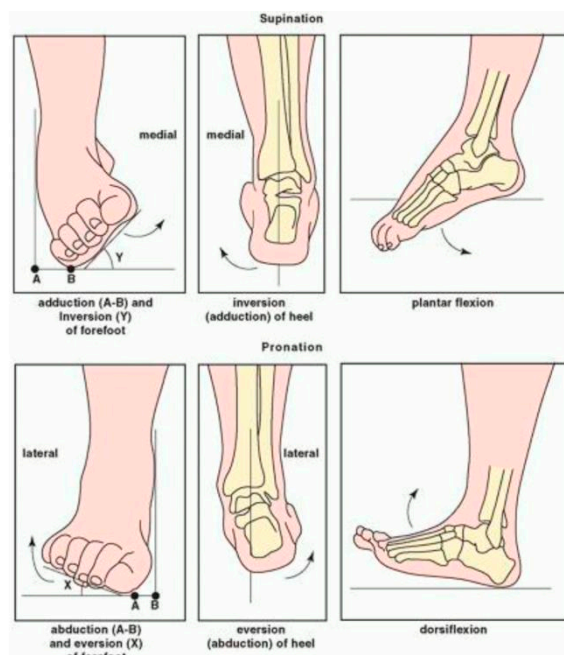


2. ábra A bokát alkotó csontok [3]

2.2. Boka mozgások

Három alapvető sík található meg az anatómiai test felosztásában. A testet két félre osztó síkot Sagittal felületnek nevezünk. Erre a síkra merőleges, de a test hossz tengelye mentén futó síkot Coronal felületnek nevezünk. A harmadik sík az előző két síkra merőlegesen helyezkedik el, ez pedig a Transverse felület.

A boka mozgása magába foglalja mindhárom síkot így a síkok mentén képesek vagyunk a különböző típusú és irányú mozgások értelmezésére. Az elsődleges mozgások azok, amelyeket a leggyakrabban véghez viszünk a lábfejen, ez jelen esetben a lábfej emelését és döntését jelenti, amely mozgást Dorsal flexiónak és Plantar flexiónak nevezzük. Ez a mozgás egyfajta csuklópánt mozgásként írható le a boka foglatában. Tengelye a Transverse és a Coronal sík metszetével párhuzamosan helyezkedik el. Másodlagos mozgásnak nevezhetjük az Everziós és Inverziós mozgást, amely a boka fő tengelye körül megy végbe, tengelye párhuzamos a Coronal és a Sagittal sík metszetével. Ezt a mozgásformát talajra szorítva is véghez tudjuk vinni, kifelé és befelé mozgatva a lábfejünket. A boka elmozdulása Inverziós mozgás esetében a lábfeszítés külső irányban tolja el a Sagittal síkot, Everziós hajlítás esetében a Sagittal sík belső irányba mozdul el. A harmadlagos mozgások a Transverse és Sagittal metszetében meghatározható tengely körül létrejövő mozgást Abdukción és Addukción mozgásnak nevezzük. Ilyen mozgás bokakificamodás esetében előfordul, ezekben az elmozdulásokban nem tudjuk megtartani stabilitásunkat, hiszen a talpunk bizonyos szögben helyezkedik el a talajjal [4]. A fentiekben ismertetett lábfej elmozdulások lehetőségeit a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra A jobb lábfej elmozdulási lehetőségei [5]

Az elmozdulások két csoportba bonthatóak fel annak függvényében, milyen irányban történik ez a mozgás, ezt a felosztás foglalja össze az 1. táblázat.

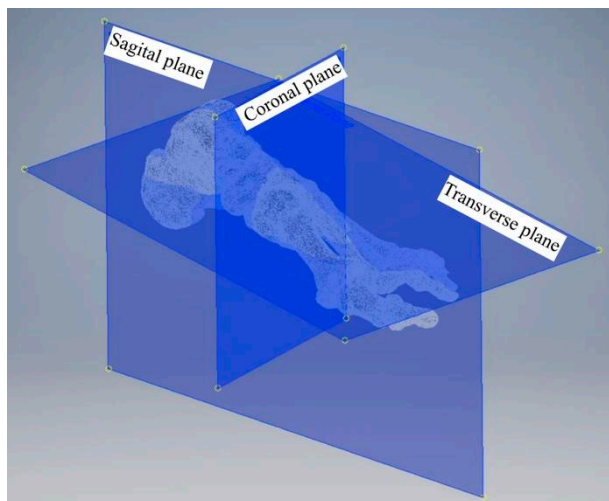
1. táblázat Elmozdulások csoportosítása

Szupináció	Pronáció
Addukció	Addukció
Everzió	Inverzió
Dorsal flexió	Plantar flexió

2.3. A boka 3D modellezése

A 3D modell elkészítésének célja, hogy olyan bokamoddellel rendelkezünk, amely alkalmas lehet a boka mozgások kinematikai modellezésére, elemzésére. Erre a célra egy szkennelt modellt készítettünk, amely alapját egy anatómiai csontvázmodell biztosította. A modellt a 3D szkennelésének és a digitalizálásnak köszönhetően nem szilárd test elemekből, hanem Mesh hálóból áll, viszont ezt skeleton felületekké tudtuk konvertálni. A modelltől csak azokat a csontokat használtuk fel, amelyek a szakirodalmi elemzés alapján hatással vannak a boka mozgásának működésére.

Az összeállítás alapját a teljes szkennelt boka adja, amelyre hivatkozni tudunk és a kényszerek a többi egység kényszereinek alapját is alkotja. Ennél a modellnél meghatároztuk a három alapvető síkot, amelyet a Transverse sík meghatározásával lehetett elérni, hiszen ez a sík párhuzamos a talajjal így a lábboltozat talajjal való érintkezéséből definiálhatóvá vált. A Sagittal és a Coronal sík erre a síkra merőlegesen helyezkedik el, így felépült az alapvető 3D modell (4. ábra).

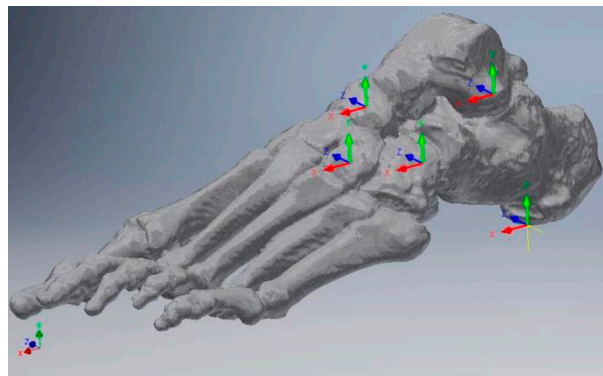


4. ábra A boka mesh modellje a fő síkokat jelölő felületekkel

Másik fontos szempont, amely a teljes modellezést és kinematikát meghatározza, hogy a bokán alapvetően az előző fejezetekben értelmezett ízületeket vizsgáljuk, így ennek a tulajdonságait vezetjük vissza a modellünkbe, nem pedig az egyes csontok helyeit határozzuk meg. Az ízületi egységek a kapcsolódási felületek az egyes egységek között, továbbá nincs akkora mértékű méret és forma béli különbség modellek függvényében, mint a csontok esetében. Minden egyes ízületi kapcsolatonál 1-1 ízületi pontot határozzunk meg, amelyen keresztül áthaladnak az ízületi tengelyek. Az ízületi pontokat a kapcsolódási felületen letérképezéssel majd középpont meghatározásával szerkesztettük ki, így végig haladva minden egyes vizsgált ízületen.

Ezzel az eljárással eljutottunk a boka modell kinematikai alapját jelentő pontok meghatározásáig. A továbbiakban ezek lesznek a referencia pontok, így a kinematikai szerkezetünk alapját jelentik, ezzel együtt elhagyhatóvá válnak a skeleton felületek. A skeleton modellezés fő feladata, hogy az egész vázszerkezetről skeleton modellt készítsünk, amely a további lépéseknél referencia keretként használható. Így jelen esetben a csatlakozási pontok rendelkezésünkre állnak, és függetlenül attól, hogy a továbbiakban milyen módosítások történnek, ezeket a pontokat fix pontokként értelmezhetjük.

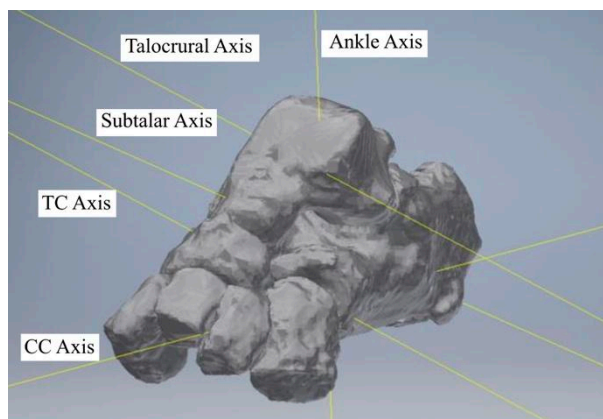
Következő feladat az egyes pontok térbeli helyeinek meghatározása. Az előre megtervezett modellépítésnek köszönhetően az ún. „Origin” felületek egyben a boka meghatározott síkjai, így a CAD szoftver segítségével egyszerűen leolvasható az egyes pontok távolságai az „Origin” síkoktól. Erre azért van szükség, mivel a pontokat koordináta rendszerbe való átvitelükhöz koordináta pontokkal kell jellemeznünk, így az X, Y és Z tengelyektől való távolságukat minden esetben ismernünk kell. Ezen túlmenően meghatároztuk a boka legalsó, Calcaneus pontját, amely a talajjal való érintkezési pontot adja meg. A koordináta pontok kiosztása az eddig értelmezettek alapján történt (5. ábra).



5. ábra Ízület kapcsolódási koordináta pontok

3. EREDMÉNYEK

Az ízületi pontok meghatározását követően vált lehetővé a mozgáselemzéshez használható ízületi tengelyek kiszerkesztése, a szakirodalmi információk alapján. Ezek a boka három síkjával zárnak be szöveget, a metszéspontjaikat meghatároztuk. Minden egyes tengelyt, különböző irányban eltoltt síkkal, továbbá kisegítő tengelyekkel kiszerkesztettünk, hiszen távolságok és szögmértékek meghatározásával a két végső sík metszete kirajzolta az adott helyen szükséges tengelyt. Ennek értelmében meghatároztuk az összes tengelyt, amely a 6. ábrán látható.



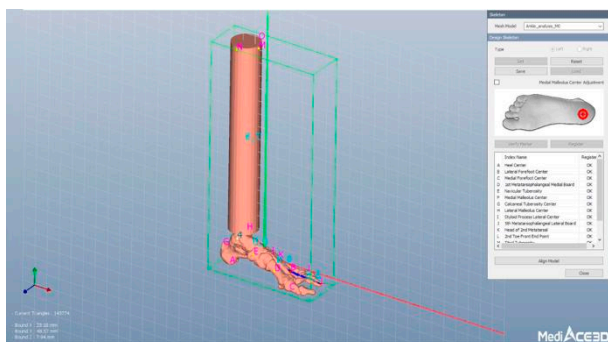
6. ábra Ízületek tengelyei

Meghatároztuk, hogy az egyes tengelyek mentén milyen típusú érintkezés található és milyen irányultságú a tengely kiképzési irányához képest. A tengelyek a 6. ábrán láthatóak.

- CC tengely (Longitudinal tengely) merőleges a CC síkra.
 - Elsődlegesen az Inverziós és az Everziós elmozdulásban vesz részt
 - Cuboid konkáv a Calcaneus konvex felülettel rendelkezik
- TN tengely (Oblique tengely) párhuzamos a TN síkkal.
 - Az Abdukciós/Addukciós illetve a Dorsiflexiós/Plantar flexiós mozgásért felel.

- Navicular konkáv a Talus konvex felülettel rendelkezik.
- Subtalar tengely merőleges a Subtalar síkra.
 - Subtalar sík „közel” sík-sík felületet mutat.
- Talocrural tengely párhuzamos a Talocrural síkkal.
 - Csuklós rotációs kialakítás jellemzi.
- Boka tengely merőleges a boka rotációs irányaira.

A mozgatható lábfej végső kialakításához a digitalizált modellt a MediACE3D szoftverbe integráltuk. Ez a szoftver alapvetően ortézis eszközök tervezésére és vizsgálatára lett megalkotva, hasonló lehetőségek állnak rendelkezésre, mint bármely más programban. A program a mozgásokhoz szükségessé teszi a térd jellegének betáplálását is, így az eredeti digitalizált modellünket kiegészítettük egy lábszárt reprezentáló hengeres testtel. A programban ezután az adott modellünk skeleton szerkezetét kell kialakítanunk, mégpedig a lábfej különböző pontjait kell bejelölnünk az adott modellünkön. Ennek megfelelően kialakítottuk a modellünket, amelyet az 7. ábrán látható



7. ábra A mozgáshoz szükséges pontok definiálása

Ennek eredményeként mozgathatóvá válik a lábfej és a különböző mozgásait szemléltetni is képes

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A bokaízület az emberi mozgásszervi rendszer egyik legbonyolultabb ízülete, amely központi szerepet játszik a mozgásban, a stabilitásban és a terhelés átvitelében. Ez a cikk a bokaízület 3D digitális modelljének fejlesztését mutatja be, amelynek célja a pontos biomechanikai és kinematikai elemzés lehetővé tétele. 3D-szkennelés és digitális rekonstrukció segítségével hálól alapú modellt hoztunk létre, amelyet csontvázszerkezetté alakítottunk át. Referencia síkokat és ízületi pontokat határoztunk meg a mozgás tengelyeinek definiálásához, lehetővé téve a dorsiflexió, plantarflexió, inverzió, eversió, abdukció és addukció meghatározását a digitális környezetben. A kinematikai modellt ezután integráltuk egy orvosi CAD-környezetbe (MediACE3D) a valósághű ízületi mozgások szimulálása és a funkcionális tartományok értékelése érdekében. Az eredmények bizonyítják, hogy mérnöki alapú modellezési módszerekkel lehetséges az ízületek viselkedésének ábrázolása, amely betekintést nyújt a terhelésseloszlásba, az ízületi tengelyek

orientációjába és a stabilitási mechanizmusokba. Ez a kutatás hozzájárul a mozgásszervi elemzéshez használt digitális ikrek fejlesztéséhez, és potenciális alkalmazási lehetőségeket kínál a klinikai diagnosztikában, a rehabilitációs technika területén, valamint az ortopédiai és protézis eszközök tervezésében.

5. SUMMARY

The ankle joint is one of the most complex articulations of the human musculoskeletal system, playing a central role in locomotion, stability, and load transfer. This study presents the development of a 3D digital model of the ankle joint with the objective of enabling accurate biomechanical and kinematic analysis. Using 3D scanning and digital reconstruction, a mesh-based model was created and converted into a skeleton framework. Reference planes and joint points were established to determine axes of movement, allowing the definition of dorsiflexion, plantarflexion, inversion, eversion, abduction, and adduction within the digital environment. The kinematic model was then integrated into a medical CAD environment (MediACE3D) to simulate realistic joint movements and assess functional ranges. The results demonstrate the feasibility of using engineering-based modeling methods to represent joint behavior, providing insights into load distribution, joint axis orientation, and stability mechanisms. This research contributes to the development of digital twins for musculoskeletal analysis and has potential applications in clinical diagnostics, rehabilitation engineering, and the design of orthopedic and prosthetic devices.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a 2018-1.3.1-VKE-2018-00013 jelű projekt részeként az NKFIH Alap finanszírozásával valósult meg.

Köszönet György Attila Gépészmérnök MSc szakos hallgatónak a munkában nyújtott értékes közreműködéséért.

7. IRODALOM

- [1] Brockett CL, Chapman GJ. Biomechanics of the ankle. Orthop Trauma. 2016 Jun;30(3):232-238. doi: 10.1016/j.mporth.2016.04.015. PMID: 27594929; PMCID: PMC4994968.
- [2] Anatomy of the Foot and Ankle. <https://orthopaedia.com/page/Anatomy-of-the-Foot-and-Ankle>
- [3] https://anatomylearning.com/webgl2021v1/browse_r.php
- [4] Biomechanics. <https://www.ankleinfo.net/biomechanics>
- [5] Lower Limb III: Ankle and Foot. <https://radiologykey.com/lower-limb-iii-ankle-and-foot-2/>

MÓDSZERTAN AZ ÉLELMISZERIPARI FÓLIÁK VASTAGSÁGI EGYENLETESÉGÉNEK VIZSGÁLATÁHOZ

METHODOLOGY FOR TESTING THE THICKNESS UNIFORMITY OF FOOD INDUSTRY FILMS

Kocsis Krisztián István*, Boronyák Márton*, Szabó Roland**, Dr. Hány András***

ABSTRACT

The role of packaging technology is growing in industry, and the quality of the film used is often an important aspect during the related design tasks. The aim of the research was to comprehensively examine the thickness homogeneity of blown polyethylene (LDPE) films used in the food industry, with particular emphasis on comparing transverse (U-profile) and circular (polar profile) thickness distributions. Our goal was to determine the extent to which local inhomogeneities arising during production affect the mechanical behavior and tear resistance of the films. During the research, we integrated four complementary methods: tactile measurements on flat samples, polar profile measurements on inflated films, microscopic analysis on cross-sectional samples, and burst testing with high-speed camera recording. Based on the results, we also formulated industrial recommendations for increasing thickness stability and introducing online process monitoring.

ÖSSZEFOGLALÁS

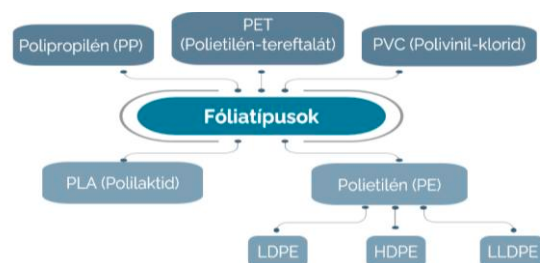
A csomagolótechnika szerepe növekszik az iparban, a kapcsolódó tervezési feladatok során gyakran lényeges szempont a használt fólia minősége. A kutatás célja az élelmiszeriparban használatos fújó polietilén (LDPE) fóliák vastagsági homogenitásának átfogó vizsgálata volt, különös tekintettel a keresztirányú (U-profil) és a körkörös (polárprofil) vastagságeloszlások összehasonlítására. Célunk volt meghatározni, hogy a gyártás során kialakuló lokális inhomogenitások milyen mértékben befolyásolják a fóliák mechanikai viselkedését és szakadásállóságát. A kutatás során négy egymást kiegészítő módszert integráltunk: tapintóórás mérések sík mintákon, polárprofil-mérések felfújó fóliákon, mikroszkópos elemzés keresztmetszeti mintán, és durrantásos teszt gyorskamerás rögzítéssel. Az eredmények alapján ipari ajánlásokat is megfogalmaztunk a vastagsági stabilitás növelésére és az on-line folyamatmonitorozás bevezetésére.

1. AZ ÉLELMISZERIPARBAN ALKALMAZOTT CSOMAGOLÓFÓLIÁK

Az élelmiszeripari csomagolás célja a termékminőség megőrzése és a fogyasztásbiztonság biztosítása, amit fóliás – például thermoform vagy bliszter – csomagolások esetén több réteg kombinálásával érnek el. A rétegek különböző funkciókat látnak el (barrier, mechanikai, optikai, hegedhető), így garantálható a gáz- és nedvességzárás, a mechanikai szilárdság és a higiéniai előírásoknak való megfelelés. Bár a hazai szakirodalom korlátozott, a CSAOSZ Évkönyvek naprakész információkat nyújtanak a csomagolóipar technológiai trendjeiről [1][2].

A leggyakrabban alkalmazott fóliák közé tartozik az LDPE, LLDPE, BOPP és PET. Az LDPE jó ütésállóságot és gázzáró képességet biztosít, ezért széles körben használt élelmiszer- és nem élelmiszeripari csomagolásokban. A thermoform (pl. joghurtos poharak, hűsítőitalos poharak) és bliszter (pl. gyógyszerári buborékfóliák) csomagolásoknál különösen fontos a fóliák mechanikai és optikai stabilitása. A PET fóliák hőálló felső réteggént szolgálnak, míg a BOPP fóliák kiváló átlátszóságuk és méretstabilitásuk miatt alkalmasak zacskókhoz és címkékhez; laborvizsgálatok szerint vastagsági eltérésük nem haladta meg a 2 %-ot [3][4].

A környezettudatos megoldások között egyre nagyobb teret nyernek a biológiailag lebomló PLA-fóliák, amelyek biztonságosan alkalmazhatók élelmiszer-csomagolásban, mivel nem bocsátanak ki tejsavat a termékbe [4].



1. ábra Az élelmiszeriparban alkalmazott fóliák típusai

* ZalaZONE Ipari Park Zrt. duális mérnök hallgató – Pannon Egyetem

** TC-Zone Mérnöki Kft., vezető mérnök

*** ZalaZONE Ipari Park Zrt. vezérigazgató

2. A MÓDSZERVÁLASZTÁS INDOKLÁSA

A polietilén fóliák vastagságának vizsgálatához nem volt célszerű a hagyományos anyagvizsgálati módszereket alkalmazni, mert ezek többsége fémekre vagy merev anyagokra készült, és a vékony, rugalmas fóliák esetében pontatlan, sőt roncsoló hatású. Az iparban használt ultrahangos, lézeres, kapacitív, induktív és röntgenes technológiák sem adnak megbízható eredményt, az ultrahangot a fólia elnyeli, a fényvisszaverődés bizonytalan, a szenzorok pedig a kis vastagság és a nem vezető alapanyag miatt hibásan mérnek.

A csomagolóiparban elterjedt mechanikus mérések – például a mikrométeres vagy tömegalapú vastagságmérés – csak átlagolt értéket adnak, ezért nem mutatják meg a körkörös vagy helyi eltéréseket. Ezért olyan kombinált mérési rendszert alakítottunk ki, amely egyesíti az inflációs (felfújásos) vizsgálatot, a mikroszkópos keresztmetszeti mérést és a többpontos, mérőórás U-profil elemzést. Ezzel a módszerrel pontosabb képet kaphatunk a fólia vastagsági egyenletességéről, és mechanikai viselkedéséről.

3. SZABVÁNYOK ÉS ALKALMAZOTT TECHNOLÓGIÁK ÁTTEKINTÉSE

1. táblázat A fóliaiparban alkalmazott szabványok

Szabvány	Alkalmazási terület	Megengedett hibahatár
ISO 4593/4591	Általános műanyag fóliák	$\pm 1 \mu\text{m}$: $<100 \mu\text{m}$ $\pm 2 \mu\text{m}$: $100-250 \mu\text{m}$ $\pm 3 \mu\text{m}$: $> 250 \mu\text{m}$
ASTM D6988	Védőfóliák	$\pm 1-2 \mu\text{m}$: $<250 \mu\text{m}$
DIN 53370	Rugalmas fóliák (PVC, PU)	$\pm 1 \mu\text{m}$: $10-100 \mu\text{m}$ $\pm 2\%$: $> 100 \mu\text{m}$
ISO 527-3/ASTM D882	Szakítóvizsgálat vékony filmekre ($<1\text{mm}$)	(nem vastagsági mérés)
ASTM F1140	Belső nyomásos felfújásos teszt csomagolásokra (hegesztések ellenőrzésére)	$\pm 1 \%$ (nyomásérték)
ASTM D8136	Kontaktus nélküli kapacitív vastagságmérés	$\pm 0,2 \mu\text{m}$

A táblázatból is látható, hogy a felfújásos vizsgálatra, kiegészítve roncsolásos és/vagy roncsolásmentes anyagvizsgálattal, nincs dedikált standard.

Az iparban alkalmazott vastagságmérési módszerek szerepet játszanak a fűjt fóliák egyenletességének

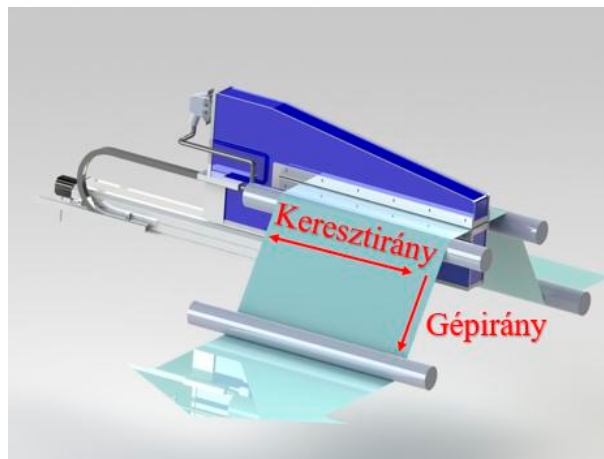
biztosításában. A laboratóriumi (off-line) mérések – például mérőórás vagy profilmérős vizsgálatok – a gyártósorok kalibrálását és a minőségellenőrzést szolgálják, ezzel szemben az on-line rendszerek (kapacitív, röntgenes, optikai) valós idejű felügyeletet és szabályozást tesznek lehetővé. A kiértékelésnél az U-profil és a polárkoordinátás ábrázolás egyaránt fontos információt ad a vastagsági eloszlásról.[5]

4. KAPCSOLÓDÓ FOGALMAK

4.1 Tájolási konzisztencia

A fóliák vastagságprofiljainak összehasonlítható értékeléséhez elengedhetetlen a minták azonos tájolása, különös tekintettel a fóliatekerces gépirányára (MD – Machine Direction).

A gépirány (MD) az, amely mentén a fólia extrudálódik és később feltekercsre kerül. Elengedhetetlen minden mérendő fóliadarabon egy 0° -os referenci irány bevezetése, amelyhez viszonyítva elvégezhetők a méréseink



2. ábra Tájolási konzisztencia

4.2 Az U profil

Az U-profil a fóliának a lapított állapotában, keresztirányban vett vastagsági profilját jelenti.

Az értékeket X–Y koordináta-rendszerben ábrázoljuk, ahol ideális homogenitás esetén U-alakú görbe rajzolódik ki, szemlélítve a szélek és a közép közötti vastagságeloszlást. Az U-alak általában úgy jön létre, hogy a fólia szélei vastagabbak, míg középső területei vékonyabbak lehetnek, például hűtési eltérések, vagy egyéb technológiai tényezők miatt.

U profil kiértékelése:

$$U = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\bar{t}_{\text{avg}}} * 100\%$$

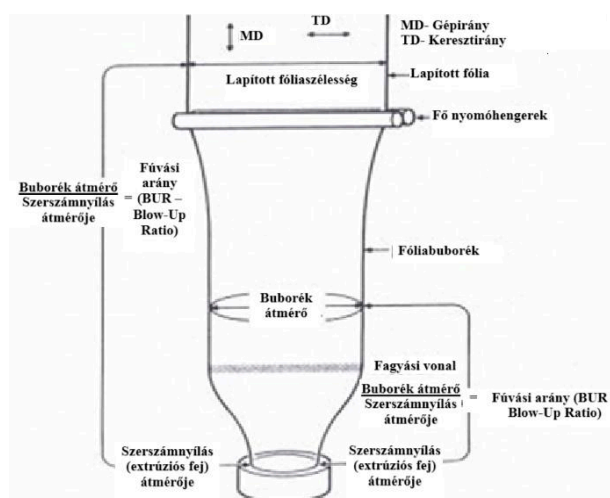
- $t_{\max}$: a mért vastagságok maximális értéke
- $t_{\min}$: a mért vastagságok minimális értéke
- $\bar{t}_{\text{avg}}$: az összes mért pont átlagos vastagság

2.táblázat U-profil százalékos értékelése
(iparban szokásos értékek szerint)

U érték (%)	Értékelés
<5%	Kiváló homogenitás
5–10%	Jó, stabil rendszer
10–15%	Közepes, optimalizálható
>15%	Rossz homogenitás

4.3 Felfúvási arány (BUR - Blow Up Ratio) szerepe

Az LDPE-alapú élelmiszeripari fóliák előállítása során a felfúvási arány az egyik legkritikusabb paraméter, amely közvetlen hatással van a termék mechanikai, optikai és morfológiai tulajdonságaira. A BUR értéke a fóliabuborék átmérőjének és az extruder fúvófejének átmérője közötti hányadosként definiálható, és ez a geometriai arány szabályozza a fólia keresztirányú (TD) nyújtásának mértékét.



3.ábra A fúvott fólia elemei

5. ANYAGOK ÉS VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A vizsgálatok során alkalmazott fóliák 50 mikron vastagságú, polietilén (LDPE) alapú csomagolófóliák voltak, melyeket kifejezetten élelmiszeripari felhasználásra fejlesztettek ki. A gyártó által megadott specifikációk szerint a fóliák vastagsága az ISO 4593 szabvány előírásainak megfelelően került validálásra, ezáltal a vastagsági tűrések és a mérési pontosság megfelelt a csomagolóipari követelményeknek. A fólia tekercs formában állt rendelkezésre, ezekből vettük a keresztirányú, illetve a körkörös homogenitási tesztekhez szükséges mintákat, a tájolási konzisztencia biztosítása mellett. A mintákat ellenőrzött körülmények között tároltuk és készítettük elő a mérési eljárásokra (pormentesítés, zsírtalanítás), biztosítva ezzel a mérési eredmények reprodukálhatóságát és pontosságát.

5.1 Keresztirányú vastagságmérés sík fólián mérőórával

A keresztirányú vastagságméréshez Mitutoyo H-0210F típusú analóg tapintóórát használtuk, amely 0,5 μm -es osztásközzel és $\pm 1 \mu\text{m}$ ismétlési pontossággal rendelkezik. A mérőórát stabil gránitlapos állványra rögzítettük, így biztosítva a rezgésmentes, pontos mérést. A mérés során a fóliamintán jelöltük a 24 vizsgálati pontot, egymástól azonos távolságra (~3,3 cm). A mérőfej lefelé irányuló mozgása a tapintótű kitérésén keresztül jelezte a fólia helyi vastagságát. Fontos kiemelni, hogy ez a módszer nem károsítja a mintát, és a kis osztásköz lehetővé teszi a rétegvastagság mérését.

5.2 Felfúvásos vizsgálat – FESTO felfúvó-modul alkalmazása

A fóliát FESTO pneumatikus rendszerrel nyomás alatt stabil állapotig felfújtuk (~0,4 bar). Ezután a fóliát leeresztettük, és a felfújt zóna kerületén végig – 24 szöghelyen (15°-os osztásközzel) a jelölt pontokban mértük a vastagságot. Ezzel a méréssel kialakíthatóvá vált az előzők során említett polárprofil, amely az adatok feldolgozásánál egyértelmű képet adott a helyi homogenitásról, és információval szolgált a szerszám szimmetriájáról, hűtési problémákról és az esetleges anyagáramlási hibákról.

5.3 Mikroszkópos keresztmetszeti vizsgálat (rétegvastagságok)

Ezen mérés során a fent említett módon, epoxy gyantával kiöntött mérőpohárba helyezett fólia vastagságának mérésére került sor, 24 tetszőlegesen kiválasztott ponton.

A fóliaminták keresztmetszeti vizsgálata előtt a minták felületét megfelelő mechanikai és finom megmunkálási lépések során készítettük elő a mikroszkópos megfigyeléshez. A minta felületét először fokozatos finomságú, (P400, P800, P1000, majd P1200) vízzel használható csiszolópapírokkal csiszoltuk, hogy az anyagfelület egyenletes és sík legyen.

Ezt követően kétlépcsős mechanikai polírozást végeztünk: először 6 μm szemcseméretű polírozólappal, majd 3 μm -es finom polírozólappal a felszín finomítása érdekében. Ennek eredményeként sima, homogén és optikailag áttetsző felületet kaptunk, amely ideális feltételeket biztosított az optikai mikroszkópos mérésekhez. A gondos előkészítés lehetővé tette a fólia teljes keresztmetszetének éles, jól kontrasztált megjelenítését, ami növelte a vastagságmérés pontosságát és megbízhatóságát.



4. ábra A keresztmetszeti minta mikroszkópos vizsgálata (Hiox-MXB-2500RZE)

5.4 Fólia felfújása és durrantása gyorskamerával (FESTO + kamera)

A fóliát fokozatosan növelt nyomással szakadásig fűjtük (inflációs-teszt). A folyamatot nagy sebességű kamerával rögzítettük, hogy a szakadás helye, iránya és jellege utólagosan egyértelműen elemezhető legyen.

Ez a módszer különösen fontos a gyártásvégi minőségellenőrzéshez, illetve a megelőző hibadetektáláshoz. Segítségével válasz adható többek között arra kérdésre is, hogy valóban azon szöghelyen szakad el a fólia, ahol a legvékonyabb?

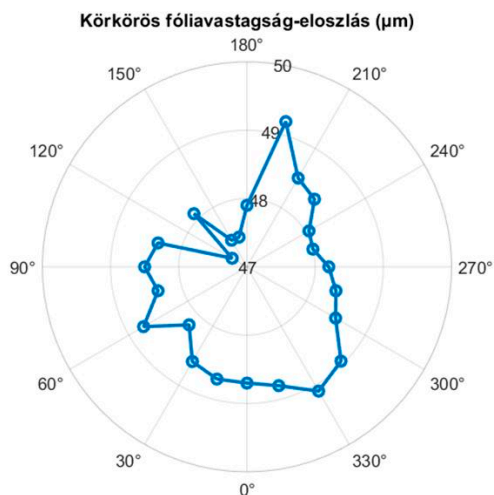
6. MÉRÉSI MÓDSZEREK KOMBINÁLÁSÁNAK SZÜKSÉGE, A FOLYAMAT MENETE

A kérdésre, hogy miért nem elég egy vizsgálati módszer önmagában, a magyarázat viszonylag egyszerű: a mérőórás és mikroszkópos mérések kizárólag a vastagsági eloszlást mutatják, de nem adnak információt a fólia mechanikai integritásáról. Ezzel szemben a felfúvásos-teszt csak a szakítónyomást méri, de nem tárja fel a körkörös vastagsági ingadozásokat. Emiatt a kettő kombinációja (illetve kiegészítő vastagságmérési eljárások az ellenőrzés érdekében) szükségesek a teljes folyamat megértéséhez [5].

Az előszűrés során a szakadási nyomások szórásából gyorsan kiderült, mely minták a leggyengébbek. Emellett a gyorskamerás felvételek segítségével meghatározható a szakadási irány és annak ismétlődő mintázata is. Ezt követően részletesen feltérképeztük a vastagsági profilt mérőóra és/vagy mikroszkóp segítségével 24 pontban (mind a sík, mind a felfújt mintákon), hogy lássuk, hol vannak vékonyabb szegmensek.

A felfúvásos teszt és az polárprofil összekapcsolásából pontosan meghatározhatók többek között, hogy:

- Melyik szöghelyen (pontnál) a leggyengébb a vizsgált minta? (5. ábra)
- Melyek a gyártási beállításokból fakadó homogenitási különbségek?
- Valóban látható-e összefüggés a szakadási hely és a leggyengébb pont között?



5. ábra Polárprofil

Összefoglalva elmondható, hogy a felfúvásos-teszt elsősorban azt mutatja meg, hogy mekkora erőt (nyomás) bír a fólia átlagosan, míg a vastagságmérések során megállapított vastagsági profilból következtethetünk az elsődleges vékonyodás helyére és a gyártás stabilitására. Ez a két módszer együtt biztosítja, hogy ne csak az átlagos szilárdságot tudjuk meg, hanem azt is, miért vagy hol szakad el a fólia. Ezek után javaslatként kerülhet megfogalmazásra a gyártási paraméterek finomhangolására, amely nem csak gazdasági, hanem környezetvédelmi szempontból is fontos tényező, továbbá a csomagolástechnikai gépek tervezése számára is fontos információkat szolgáltat.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A.R. Alias, et al., Emerging materials and technologies of multi-layer film for food packaging application: A review, 2022
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108875>
- [2] CSAOSZ Évkönyv 2021 [online] – Csomagolás a fenntarthatóság és funkció kettősségében, https://www.csaosz.hu/evkonyv/csaosz_evkonyv_2021.pdf [Hozzáférés dátuma: 2025. 10.21.]
- [3] W Weihua Huang, et al., Large-Area Thickness Measurement of Transparent Films Based on a Multichannel Spectral Interference Sensor, 2024
<https://doi.org/10.3390/app14072816>
- [4] Lindani Koketso Ncube, et al., Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials
<https://doi.org/10.3390/ma13214994>
- [5] How to Measure Plastic Film [online]
https://www.gauging.com/customer-resources/how-to-measure-plastic-film/?utm_source=chatgpt.com
[Hozzáférés dátuma: 2025. 10.21.]

A TDOA MÓDSZER HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA L-ALAKÚ ACÉLLEMEZEN

EFFICIENCY TEST OF THE TDOA METHOD ON L-SHAPE METAL PLATE

Kriston J. Balázs*, Dr. Jálics Károly**

ABSTRACT

In this study, the application of the Time Difference of Arrival (TDoA) method was investigated to locate impulse excitations in steel components. The research employs a hierarchical modeling approach, beginning with simple rectangular steel plates, advancing to bent L-shaped plates, and ultimately targeting realistic car chassis elements. This article highlights how structural features influence wave propagation and localization accuracy. The results demonstrate that TDoA can reliably identify impulse locations in simple structures, highlighting its potential as a robust tool for diagnostics in automotive engineering. The study provides a foundational framework for extending TDoA-based diagnostics from laboratory-scale experiments to full-scale vehicle applications.

1. INTRODUCTION

Traditional vibration-diagnostic approaches often rely on frequency-domain analyses, which have only limited ability to detect the location of the malfunction and uncover the root cause e.g in a motor vehicle. Introducing TDoA into vibration diagnostics offers a promising new approach to identifying and localizing impulse excitations in complex mechanical systems. The principle of TDoA is straightforward: when an impulse signal is generated, it propagates through the structure and is detected at spatially distributed sensors with small differences in arrival time. By analyzing these delays, the source position of the event can be estimated with high accuracy. To explore the feasibility of this method, simplified mechanical models are first developed, enabling systematic testing of applicability of TDoA to vibration signals in controlled settings. The goal is to achieve reliable impulse detection and localization in real-world vehicle structures.

During the adaptation of the source localization procedure to vibration signals, the steps of the process that are necessary for successful pulse source determination were developed:

1. Capture raw t_i time signals

Min. 3 sensors must be used; impulse should be located within the convex geometric shape formed by the accelerometers.

2. Under sampling

Eliminates disturbing frequency components.

3. Signal prewhitening

Signal preconditioning before cross-correlation. Eliminates auto-correlation between time series, therefore it improves the accuracy of time delay estimation.

4. Optional: autocorrelation (ACF)

Check the effectiveness of prewhitening. ACF should be 0.

5. Cross correlation (CCF)

Estimate the time delay of arrival between the reference and other sensors.

6. Determine wave speed

Calculate sound wave speed for Nyquist-frequency, considering the dispersion of bending waves in plates.

7. Calculate coordinates (SX-method)

The mathematical background for source coordinate calculation, based on the least squares method. SX = Spherical Intersection.

8. Result evaluation and visualization

The visualization of the quadratic equation to be solved is a parabola, the roots of the function contain the source coordinates.

2. WAVE PROPAGATION IN COMPLEX STRUCTURES

In plate-like components - such as the vehicle body elements - the propagation velocity is strongly frequency dependent. The frequency dependence of the velocity of sound is called dispersion. The phase velocity of waves in plates can be calculated as follows [1]:

$$c_B = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{B}{h}}, \quad (1)$$

where

$$B = \frac{h^3}{12} \cdot \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (2)$$

is the bending stiffness. Performing the calculations with the parameters $h = 1/1.56$ mm; $E = 210 \cdot 10^3$ MPa; $\nu = 0,3$; $\rho = 7850$ kg/m³ the frequency-dependent

* PhD student, University of Miskolc, Institute of Machine and Product Design

** Head of Institute, University of Miskolc, Institute of Machine and Product Design

curve for the propagation velocity shown in Figure 1 is obtained.

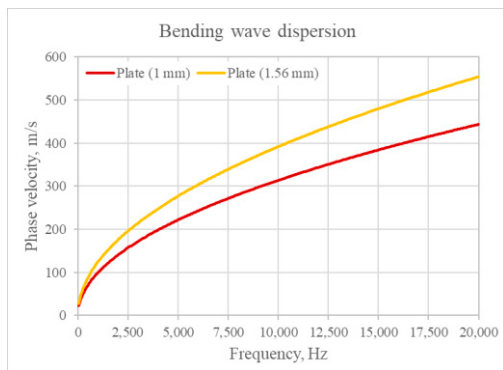


Figure 1. Frequency-dependent sound wave propagation

The response signals are elongated along the time axis, since vibrations with different frequencies arrive at the sensors at different times due to their different propagation speeds.

3. TDoA MEASUREMENT ON RECTANGULAR PLATE

Accordingly, we consider a simplified (2D) model to explore the influencing factors and possibilities of the procedure. In this stage of the tests artificial excitation was used and the impact was applied by an impulse hammer on the plate in Figure 2.

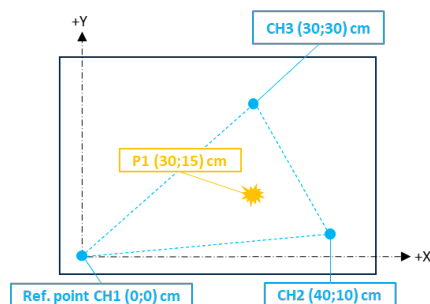


Figure 2. Coordinates of measurement and excitation points on rectangular steel plate

One of the accelerometers (CH1) was defined as a reference point with coordinates (0;0) cm. The other sensor positions and the excitation point were randomly determined. The dimensions of the rectangular plate were: 50 x 46 x 0.156 cm (length x width x thickness). The plate was placed on sponges fitted to its four corners during the test. So, the structure at point P1 was hit and the impulse responses with the vibration acceleration sensors (CH1...CH3) were recorded.

Applying cross-correlation to the pre-whitened signal, we obtain the time difference of the arrival of sound waves at the sensors. The maximum coefficient of the cross-correlation function gives the time value of the delay (Figure 3). Lag is the time interval between events recorded in a regular manner and with a constant period.

In our case, a period can be understood as the reciprocal of the sampling frequency, which is $1,2 \cdot 10^{-4}$ sec after 8192 Hz under sampling.

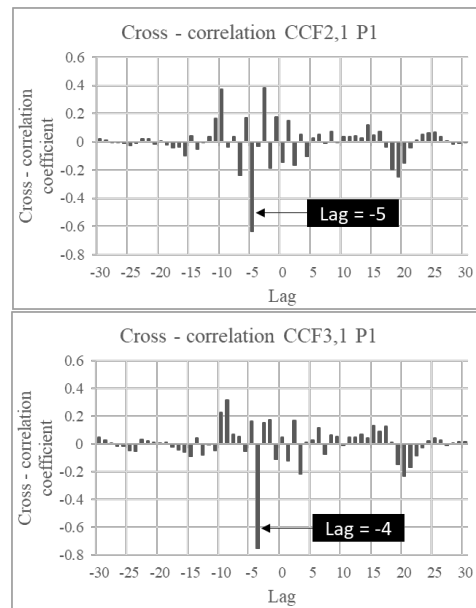


Figure 3. CCF formed from the measurement points (CH1...CH3) during the excitation of the P1 point

The time difference between CH1 reference point and CH2 measurement point is $6,103 \cdot 10^{-4}$ sec, while between CH1 reference point and CH3 measurement point is $4,882 \cdot 10^{-4}$ sec. Assuming homogeneous wave propagation, phase velocity $c_B = 354$ m/s. Utilizing the measured data as input for the SX method (programmed in GNU Octave) the following coordinates were calculated for the P1 excitation point: $X = 29,51$ cm and $Y = 14,38$ cm.

The coordinate of the impulse applied at location P1 (X30; Y15) can be determined with a deviation of 0.5 cm in the X-direction and 0.62 cm in the Y-direction using the established source localization routine. Therefore, the TDoA method in a simplified model, with appropriate preprocessing of the vibration signal can determine the origin of an artificial, single-source pulse-like excitation in the assigned coordinate system, within an acceptable error margin.

4. MODIFICATION OF THE ALGORITHM FOR SHAPED STRUCTURES

To continue the investigations, an L-shaped plate was fabricated, bent at 90 degrees with a 60–40% ratio. The bending radius is 2 mm (R). The geometrical dimensions of the plate are: 60 cm in width (W), 100 cm in height (L), and 1 mm in thickness (h). The plate is made of steel. The objective of this study is to evaluate the applicability of the TDoA method in the case of a three-dimensional structure, thereby providing a gradual step toward accurately describing the actual geometry and vibrational behavior of the vehicle body structure.

At the bending point of the plate — provided that the bending radius is sufficiently small compared to the plate thickness — the transverse bending wave is transformed into a longitudinal wave. A guideline in the literature states that for at least $R/h \lesssim 3$, the plate can be considered as strongly curved [2][3][4].

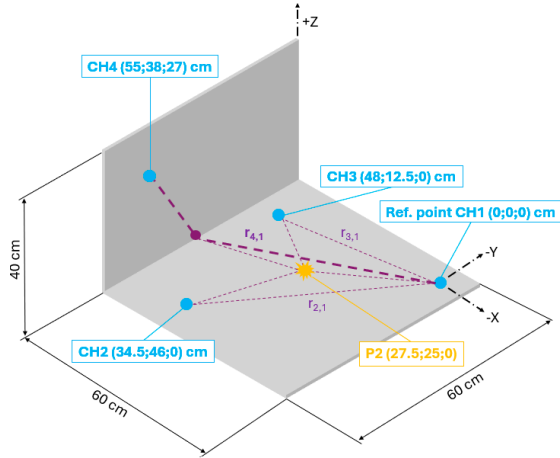


Figure 4. Coordinates of measurement and excitation points on bent steel plate

The current implementation of the TDoA algorithm cannot handle the transformation of the vibration wave at the bending point; even though such conditions are often encountered in engineering practice. On the horizontal plate segment, the signal propagates over a distance $r_{2,1}$ within a time interval $d_{2,1}^t$ with a velocity $c_{2,1}^t$ characteristic of a transverse wave, whereas on the other segment it propagates over a distance $r_{4,1}$ within a time interval $d_{4,1}^t + d_{4,1}^l$ with velocities $c_{4,1}^t + c_{4,1}^l$, corresponding to both transverse and longitudinal wave components. Thus, during propagation toward sensor CH4, the vibration wave initially travels transversely, and after the bending point, it continues as a longitudinal wave. The impact point (P2) is located near the center of the horizontal plate. As the structure is three-dimensional, the measurement configuration consists of four sensors positioned in a Cartesian coordinate system.

The distances between sensors CH2 and CH3 and the reference sensor (CH1) are defined as:

$$r_{2,1} = c_{2,1}^t \cdot d_{2,1}^t \quad (3)$$

$$r_{3,1} = c_{3,1}^t \cdot d_{3,1}^t \quad (4)$$

The distance between the CH4 sensor located on the vertical plate and the reference sensor (CH1) is:

$$r_{4,1} = c_{4,1}^t \cdot d_{4,1}^t + c_{4,1}^l \cdot d_{4,1}^l \quad (5)$$

It can be observed from eq. (5) that the total time delay $d_{4,1}$, determined from the measurement, consists of two unknown components corresponding to different propagation velocities. For better interpretability of analysis, the plate is unfolded.

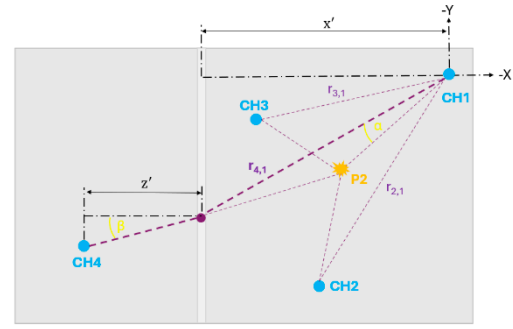


Figure 5. Unfolded view of the bent plate

The propagation angles (α, β) are illustrated approximately only for visualization purposes. From the model, the distances $r_{(i,1)}$ can also be expressed in terms of geometry.

$$c_{4,1}^t \cdot d_{4,1}^t = \frac{x'}{\cos \alpha} \quad (6)$$

$$c_{4,1}^l \cdot d_{4,1}^l = \frac{z'}{\cos \beta} \quad (7)$$

Next, the relationship between longitudinal and transverse wave propagation is examined. The velocity of the longitudinal wave is given by:

$$(c_{i,1}^l)^2 = \frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (8)$$

The velocity of the transverse wave is:

$$(c_{i,1}^t)^2 = \frac{G}{\rho} = \frac{E}{2\rho(1+\nu)} \quad (9)$$

By substituting the typical Poisson's ratio of 0.3 for steel into the two equations, the following is obtained:

$$c_{i,1}^l = 1.87 \cdot c_{i,1}^t \quad (10)$$

This relationship establishes a relationship between the propagation velocities of the two types of waves. It is important to note that, due to the dispersion of the transverse wave, the formula is valid for a specific, constant frequency. The longitudinal wave velocity depends only on the material properties and geometry. By substituting this relationship into Eq. (5), $r_{4,1}$ can be expressed as:

$$r_{4,1} = c_{4,1}^t (d_{4,1}^l + 1.87 d_{4,1}^t) \quad (11)$$

$$d_{4,1} = d_{4,1}^l + d_{4,1}^t \quad (12)$$

The system of Eqs. (11) and (12) contain two unknowns ($d_{4,1}^l$ and $d_{4,1}^t$). To fully resolve this, it is necessary to introduce a ratio as a boundary condition:

$$\lambda = \frac{d_{4,1}^t}{d_{4,1}^l} \quad (15)$$

After substitution and simplification, the final form is:

$$r_{4,1} = c_{4,1}^t \cdot \frac{1 + 1,87\lambda}{1 + \lambda} \cdot d_{4,1} \quad (16)$$

With the utilization of Eg. (6) and (7) λ can be expressed:

$$\lambda = \frac{1,87 \cdot x' \cdot \cos\beta}{z' \cdot \cos\alpha} = \frac{d_{4,1}^t}{d_{4,1}^l} \quad (17)$$

The unknown constant λ is obtained if:

$$x' \cdot \cos\beta = z' \cdot \cos\alpha \quad (18)$$

This represents a geometric condition, implying that the transverse and longitudinal waves must propagate over equal path lengths. Considering Eq. (10) and using Eq. (18) along with the fact that sound propagates at a constant speed — the ratio of times, i.e., the boundary condition parameter, is:

$$\lambda = \frac{d_{4,1}^t}{d_{4,1}^l} = 1,87 \quad (19)$$

Therefore,

$$r_{4,1} = 1,56 \cdot (c_{4,1}^t \cdot d_{4,1}) \quad (20)$$

This relationship holds when the CH4 sensor and the CH1 reference point are symmetrically positioned with respect to the longitudinal x-axis of the plate, and the two sensors are equidistant from the bending point. Any X-direction error due to asymmetry can be estimated from the known geometry and propagation speed.

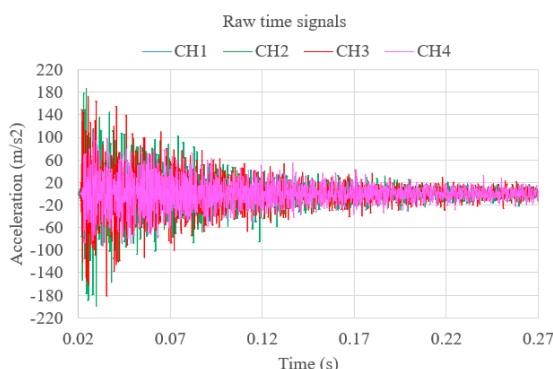


Figure 6. Raw time signals of acc. sensors

However, since the wave refraction point is not known with 100% certainty, the estimation of Y-direction error is uncertain and may distort the calculated coordinates if the boundary condition is not satisfied. From the measurement setup it is clearly visible that the boundary condition is not fulfilled. Figure 5 shows the

vibration signals in the time domain received by individual acceleration sensors. The waveform corresponds to a characteristic transient excitation generated by the impulse in P2 position. The expected theoretical error in the coordinates, when the time signal is under sampled at 4096 Hz in the X-direction, is approximately 8 cm (ΔX). By performing the source localization routine on the raw time signals we obtain the time delay of arrivals. The time difference between CH1 reference point and CH2 measurement point is $9,765 \cdot 10^{-4}$ sec, between CH1 reference point and CH3 measurement point is $2,444 \cdot 10^{-4}$ sec. The time delay between CH1 and CH4, considering the theoretical position error, is $5,051 \cdot 10^{-3}$ sec. The phase velocity for sampled frequencies is $c_B = 143$ m/s.

Application of the SX method yields the following coordinates: $X - \Delta X = 30,12$ cm and $Y = 22,61$ cm. So, the P2 impulse point can be estimated with a rough deviation of 2,5 cm. This result considers the violation of the boundary condition and the natural inaccuracy of the method, furthermore the disturbing effect of wave propagation in the bended section.

5. SUMMARY

In the first stage, tests on a rectangular steel plate demonstrated that, after appropriate signal preprocessing the localization algorithm can accurately estimate the source location of an impulse excitation under simple geometric conditions. In the second stage, the analysis of the L-shaped plate was simplified to a two-dimensional problem, where wave mode conversion occurs at the bending point. A geometric model was developed to describe this transformation, introducing a boundary condition ($\lambda = 1.87$) representing the ratio of the propagation times of the two wave types. Achieved accuracy with the modified algorithm is 2,5 cm on a bent plate with continuous cross section.

5. REFERENCES

- [1] Frank Fahy: Foundations of Engineering Acoustics 2001, Section 10.6, Academic Press, London, 2000 ISBN: 9780122476655
- [2] Ka Lok Jimmy Fong: A study of curvature effects on guided elastic waves, PhD thesis, Imperial College London 2005, p. 83
- [3] De Luca, A.; Perfetto, D.; Polverino, A.; Aversano, A.; Caputo, F. Finite Element Modeling Approaches, Experimentally Assessed, for the Simulation of Guided Wave Propagation in Composites. *Sustainability* 2022, 14, 6924. ISSN: 2071-1050 <https://doi.org/10.3390/su14116924>
- [4] Guilherme André Santana et al.: Finite element evaluation of the effects of curvature in Lamb waves for composites structural health monitoring, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2018, 15(10), e127 ISSN online version: 1679-7825 <https://doi.org/10.1590/1679-78255193>

SÍKBELI ÉS TÉRBELI MODELLEK ÉS KINEMATIKAI ÁBRÁK A HATÉKONY MÉRNÖKKÉPZÉSBEN

PLANAR AND SPATIAL MODELS AND KINEMATIC DIAGRAMS IN EFFECTIVE ENGINEERING EDUCATION

Németh Géza*

ABSTRACT

Our machine structures and their kinematic relationships are complex, and it is extremely difficult to review them with the limited practical experience and theoretical background available. Kinematic sketches help to see the essence, and simplifying models provide an approximate solution. Our goal is to present options that bridge the gap between the complex assembly drawing and the acting loads on the one hand, and the models and the kinematic diagrams used to clarify the stresses on the other hand.

1. BEVEZETÉS

Gépszerkezeteink, kinematikai kapcsolataink összetettek, ezek áttekintése a rendelkezésre álló szerény gyakorlati tapasztalat és ugyancsak szerény elméleti háttér esetén rendkívül nehéz. A lényeglátást segítik a kinematikai vázlatok, a közelítő megoldást pedig az egyszerűsítő modellek. Célunk olyan lehetőségek bemutatása, melyek áthidalják a tátonzó szakadékot egyrészt a bonyolult összeállítási rajz és a ható terhelések, másrészt az igénybevételek tisztázására szolgáló modellek és a kinematikai ábrák között.

Az előbbi megállapítás természetesen nem általánosan érvényes, hiszen vannak született tehetségek, akik igen jó lényeglátással, műszaki érzékeléssel rendelkeznek, a tanulás terén is önjárók. Az átlag egyetemi hallgató viszont nem ilyen. Minden oktatónak célja, hogy az ő képzésük során is minél hatékonyabb módszereket használjon. Ezt az igyekezetet szeretnénk bemutatni a gépészmérnöki képzés igen kis szeletén, a gépelemek szilárdsági számításán, ennek is az egyik legegyszerűbb esetén, az adott geometriájú, anyagú és előírt biztonságu elemek és elem-kapcsolatok terhelhetőségének meghatározásán keresztül.

2. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A hazai felsőoktatási intézmények gépelemek tanszékeinek közel egységes képzési tervében mindig szerepeltek a mozgatóorsós szerkezetek. Ezek az egyszerű kéziszerszámok vagy villamos motorral hajtott egyszerű gépek alkalmas feladatot adtak a gépelemek tantárgy első önálló tervezési munkájához. Ma is használjuk ezeket a feladatokat, de egy sokkal szerényebb előképzés után. Ebből következően a mai hallgatók nehezebben értenek meg egy összeállítási

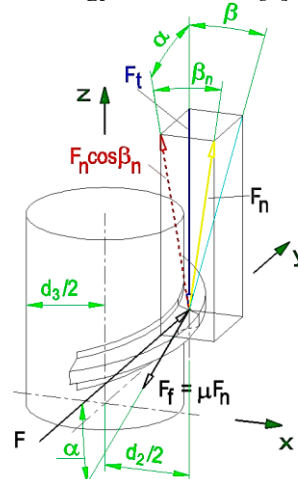
rajzot, nehezebben azonosulnak a feladattal.

3. MODELLEK

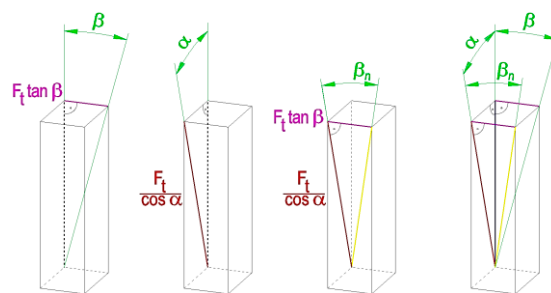
Mérnöki feladatok megoldása modellek nélkül lehetetlen. A megoldandó feladatot csak közelítően, modellekkel tudjuk leírni. Közelítően ismerjük az anyagot, a terheléseket, közelítően tudunk elkészíteni egy-egy méretet, biztosítani az alak- és helyzetűrést, felületi érdességet és felületi mintázatot.

Vannak évszázadok óta általánosan használt, jól bevált egyszerű modellek, és vannak igen összetett, igen nagy számítógép igényű modellek. Jelen cikkben csak a hagyományos eszközökkel megoldható, könnyen áttekinthető síkbeli és térbeli modelleket említjük, amelyeket ma is használunk mérnökhallgatók alapképzése során, a menetes kapcsolatok vizsgálatakor, az orsó- és anyamenet között fellépő erők és a működtető nyomaték összefüggésének leírásához.

Az 1. ábra térbeli modellt mutat, ez a menetfelületnek a sugárirányú (β szögű) lejtése mellett az érintő irányú (α szögű) lejtését is figyelembe veszi [2].

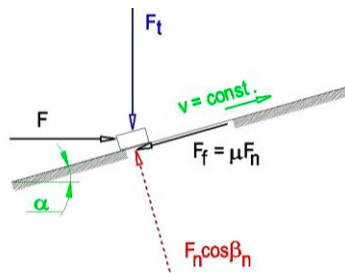


1. ábra Trapézmenetes orsó-anya modellje



2. ábra $\beta_n = \tan^{-1}(\tan \beta \cdot \cos \alpha)$ képlet magyarázata

* adjunktus, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet



3. ábra Erők az érintősíkban

A 2. és 3. ábrák a szögek és az erőegyensúly értelmezésére szolgálnak. A modell előnye, hogy nagy menetemelkedési szög esetén is használható.

A jól ismert síkbeli modellt itt nem részleteznénk, legfeljebb csak annyiban térünk ki rá, hogy a térbeli modell eredményét igyekszünk a síkbeliéhez hasonló alakra hozni.

Az F_t terhelés ellenében működtetett orsó-anya kapcsolatban a nyomatékgigény

$$T = \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\mu + \cos(\beta_n) \tan(\alpha)}{\cos(\beta_n) - \mu \tan(\alpha)} F_t, \quad (1)$$

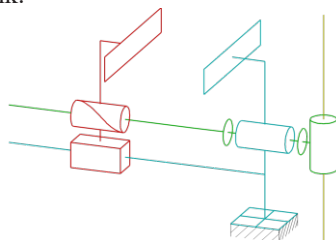
ami egy ismert trigonometriai azonossággal a

$$T = \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\alpha + \rho') F_t \quad (2)$$

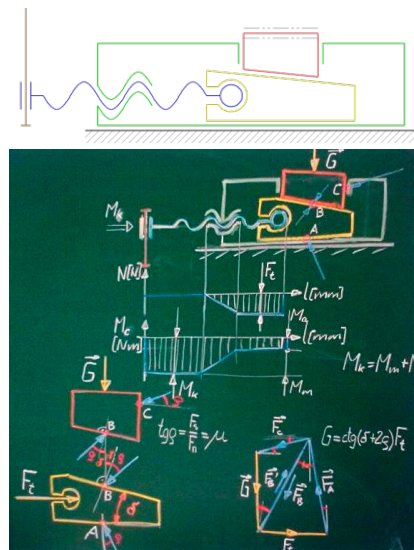
alakra hozható, ahol $\rho' = \tan^{-1}(\mu / \cos \beta_n)$ a csúszó súrlódási tényező függvénye, $\beta_n = \tan^{-1}(\tan \beta \cdot \cos \alpha)$ az 1. és 2. ábrán magyarázott szög, $\alpha = \tan^{-1}(P / (d_2 \cdot \pi))$ az emelkedési szög, $\beta = 15^\circ$ a fél menetszög, P pedig a menetemelkedés.

4. KINEMATIKAI ÁBRÁK

Kinematikai ábrákat országonként, mérnöki területenként eltérő mértékben, de használják. Az ISO 3952-1 szabvány az egyes elemek, elem-kapcsolatok, mozgásviszonyok értelmezésére síkbeli és egyszínű jeleket használ. Érdekes kutatásról is tudomást szerezhetünk egy francia cikkből, ahol a szerzők azt vizsgálják, hogy a kinematikai ábrák színezése, illetve térbeli bemutatása mennyire segíti a tanulmányaik különböző fokán lévő mérnökhallgatókat a mozgásviszonyok tisztázásában az egyszerűbb és az összetettebb gépszerkezetek területén [1]. Tapasztalatuk szerint a színeknek jelentős szerepe van az alapképzésben, a gyorsabb megértésben. Az összetettebb szerkezetek területén pedig a térbeli ábrák előnye feltétlenül megmutatkozik.

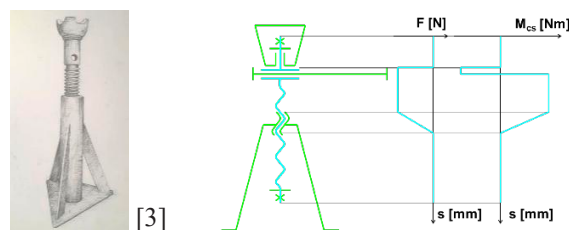


4. ábra Lakatos satu térbeli kinematikai ábrája

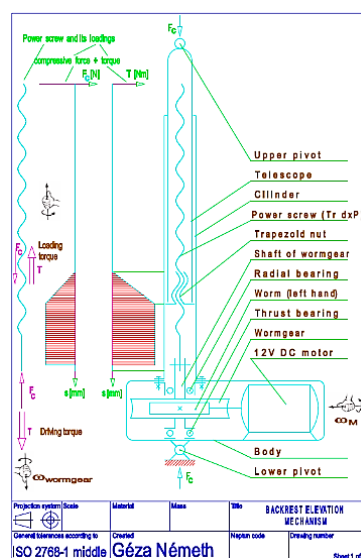


5. ábra Szerszámgépszintező síkbeli kinematikai ábrája, igénybevételei és terhelhetősége

A 4. és 5. ábrán bemutatott egyszerű szerszámok nem igénylik a térbeli ábrázolást, a különböző színnel jelölt elemek viszont várhatóan segítik a megértést. A kinematikai ábrák célja nem csupán a mozgásviszonyok leírása, hanem az egyes elemek igénybevételeinek tisztázása. Erre mutat példát az 5. és a 6. ábra. Hasonló céllal készült a 7. ábra villamosmotorral hajtott emelőjének kinematikai ábrája, mely a jobbkéz szabály alapján a csavarónyomatékok előjelét is magyarázza.



6. ábra Haszongépjármű emelő és igénybevételi ábrái

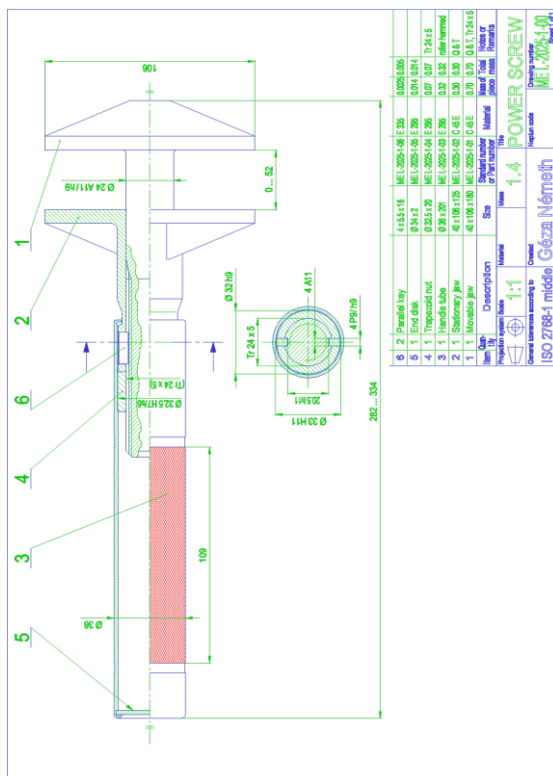


7. ábra Kórházi ágy emelő orsójának igénybevételei



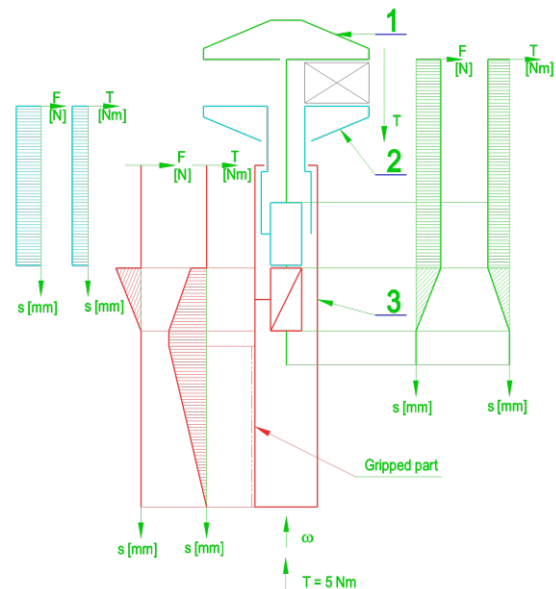
8. ábra Az ágyemelő mechanizmusa

A 9. ábra egyszerű szerszámának mozgóorsója, illetve az orsó-anya kapcsolata nem a menetek egymáson való csúszása közben kapja a nagy terhelését. A méretek egy valós szerszáméi. Az összeállítási rajz alapján készített további ábrák lapját kettévágtuk. A bal oldali rész kinematikai ábrái a 10. ábrán magyarázzák az egyes elemeknek a szorítóelem csavarásának hatására kialakuló igénybevételeit. A jobb oldali rész pedig a 11. ábrán a szorító pofákra egy hatlapfejű csavar lazításakor ható erőket és azok számítását mutatja. Utóbbi terhelés a menetes kapcsolatra is lényegesen nagyobb, de a menetek egymáshoz képest nyugalomban vannak, így igénybevételük a felületi nyomás szempontjából kedvező.

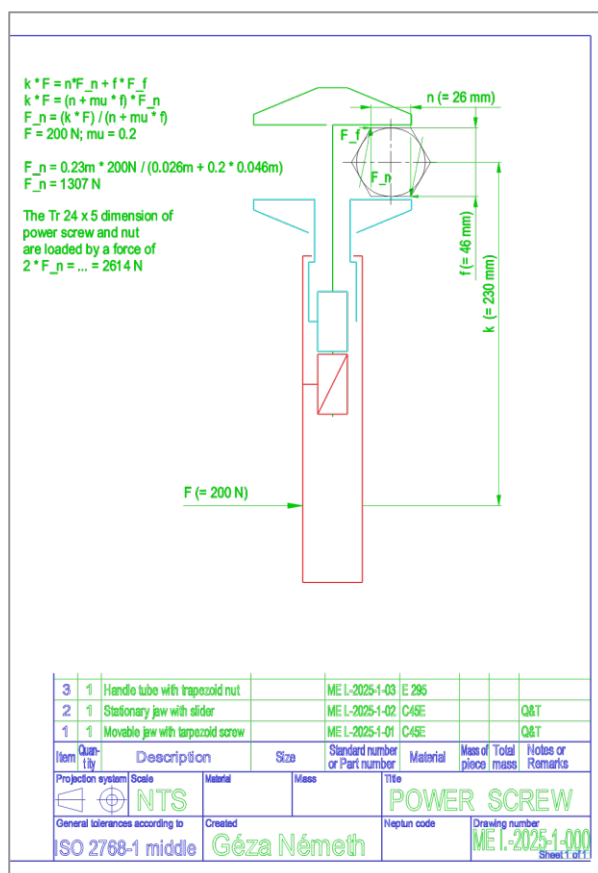


9. ábra Franciakulcs összeállítási rajza

A 7. ábrán bemutatott ágyemelőhöz hasonlóan igen változatos kialakításúak a tetőablak és szárnyaskapu mozgó mechanizmusok. Egy egyszerű megoldásra mutat példát a 12. ábra összeállítási rajza [4]. A könnyebb megértés érdekében színeztük az egyes elemeket. A 13. ábra a hozzá tartozó kinematikai ábrát és igénybevételi ábrákat mutatja.



10. ábra Franciakulcs elemeinek igénybevételei



11. ábra Franciakulcs szorító pofáinak terhelése

A FÖLDRENGÉS HATÁSA A TARTÁLY MÉRETEIRE

THE EFFECT OF EARTHQUAKE ON TANK DIMENSIONS

Dr. Orbán Ferenc*, Fenyvesi Sándor**

ABSTRACT

The testing of tanks for seismic loads is less common in Hungary, where the maximum value of the horizontal seismic force can be 25-30% of the weight of the structure which is several times greater than the wind load. Seismic loads can be calculated according to several standards. In this article, we use MSZ EN 1998-4:2006. for the calculations. The tank-liquid system can be modeled as a two-dimensional system, and the effects can be summed algebraically. The destabilizing moment increases with the slenderness of the tank (H/R). Since the period time of the flow component is several seconds, its effect is smaller than that of the impulsive component moving with the tank wall.

1. BEVEZETÉS

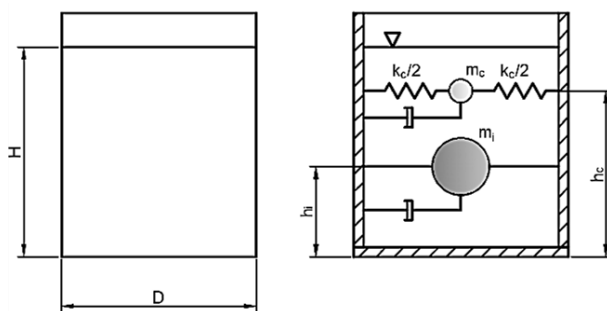
Az állóhengeres tartályok terhelése a tárolt folyadékból a hidrosztatikus nyomás.

A tartályok további terhei származtatnak szélteherből, hőteherből vagy földnyomásból ha a tartály tető földdel borított. A tartályok vizsgálata földrengés terhelésre kevésbé elterjedt pedig a vízszintes szeizmikus erő maximális értéke a szerkezet súlyának 25-30 %-a is lehet ami többszöröse a széltehernek.

A szeizmikus terhek számítása történhet az MSZ EN 1998-4: 2006 vagy az API-650 szerint. A szerkezet szeizmikus igénybevételeinek nagysága az adott területre vonatkozó talajgyorsulások (gerjesztés) és a szerkezet gerjesztésre adott válaszában függvénye. A számításokhoz a tartály folyadék rendszert két egydimenziós rendszerként modellezzük 1. ábra.

Amikor a folyadékot tartalmazó tartály rezegni kezd, a folyadék a tartály falára és aljára hidrosztatikus nyomáson kívül impulzusos és konvektív hidrodinamikai nyomást is gyakorol. Az impulzusos rész a tartály alsó részében lévő folyadéknak felel meg, és úgy viselkedik, mint egy a héjhoz mereven kapcsolódó tömeg, míg a tartály felső részében a folyadék tömege hullámzó mozgást végez, és konvektív hidrodinamikai nyomást gyakorol. Általában gyakori megközelítés a kettős egyfokú szabadságú rendszer használata, amelyik mereven kapcsolódik a tartály héjához (impulzív), a

másik pedig rugókon keresztül kapcsolódik a tartályhoz (konvektív), lásd a 1. ábrát.



1. ábra A folyadékkal töltött tank lengéstani modellje

Ezzel a módszerrel modellezhető a folyadék és a tartály falának kölcsönhatása.

A modell ezután a teljes folyadék tömeget két részre osztja, azaz impulzusos (m_i) és konvektív tömegre (m_c).

A konvektív és impulzív tömegek az alsó lemez h_c (vagy h_c') és h_i (vagy h_i') távolságában vannak. A h_c és h_c' , valamint a h_i és h_i' közötti különbség az, hogy a

vesszővel jelöltek figyelembe veszik a tartály alján kialakuló hidrodinamikai nyomás hatását. Az impulzusos és konvektív tömegek impulzusos és konvektív rezgési periódussal T_i és T_c mozognak. A rezgés idők az EN 1998-4: 2006 szerint :

$$T_{imp} = C_i \frac{\sqrt{\rho} \cdot H}{\sqrt{s/R} \cdot \sqrt{E}} \quad (1)$$

$$T_{con} = C_c \cdot \sqrt{R} \quad (2)$$

C_i és C_c együttthatók a periódus idők számításához, H a folyadék magassága, R a tartály sugara, s átlagos falvastagság, ρ a folyadék sűrűsége, E tartály anyagának rugalmassági modulusa.

A C_i , C_c együttthatók, m_i és m_c tömegek, h_i és h_c magasságok az 1. táblázatban láthatók.

* professzor emeritus, Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, Gépészmérnöki Tanszéke

** tanársegéd, Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar, Gépészmérnöki Tanszéke

1. táblázat Koefficiensek a természetes periódusokhoz, tömegekhez és magasságokhoz az impulzív és konvektív komponensekhez

H/R	C _i	C _c (s/m ^{1/2})	m _i /m	m _c /m	h _i /H	h _c /H	h _i '/H	h _c '/H
1	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,785
1,5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,69	0,555	0,734
2	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,5	0,764
2,5	6,56	1,48	0,81	0,19	0,452	0,794	0,48	0,796
3	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

2. táblázat Geometriai méretek

	D [m]	H [m]	H/R
1	14	13	1,86
2	12	18	3,00
3	11	21	3,82

m a folyadék tömege, m_i az impulzív tömeg, m_c konvektív tömeg, h_i az impulzív tömeg magassága, h_c a konvektív tömeg magassága.

A tárolt folyadék lökészerű (impulzív) és áramlási (konvektív) összetevőjének a csillapítása különböző az előbbi 5 % míg az utóbbi 0,5 %.

A szeizmikus erő számításához szükséges vízszintes gyorsulások $S_e(T_{imp})$, $m_c S_e(T_{con})$ az MSZ EN 1998-1/ Eurorocode 8 szerint számolhatók. Mivel az impulzív tömeg periódus ideje kicsi így a válaszspektrum görbe platójára esik a gyorsulás értéke. Ebben az esetben tervezési válasz spektrum szerint a gyorsulás $S_d = S_e/q$, ahol $q=1,5$ a viselkedési tényező.

A vízszintes tolóerő :

$$Q = (m_i + m_w + m_r) S_e(T_{imp}) + m_c S_e(T_{con}) \quad (3)$$

m_w a tartály fal tömege, m_r a tartály tető tömege

A felborítást okozó nyomaték

$$M = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) S_e(T_{imp}) + m_c h_c S_e(T_{con}) \quad (4)$$

h_w és h_r a tartályfal és a tető súlypontjának távolsága az alaptól.

A fenéklemez alatti borító nyomaték

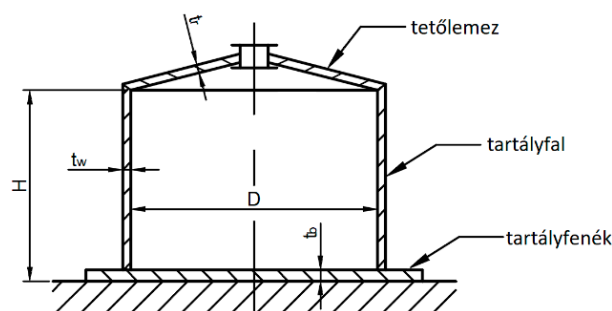
$$M' = (m_i h_i' + m_w h_w + m_r h_r) S_e(T_{imp}) + m_c h_c' S_e(T_{con}) \quad (5)$$

2. ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATOK

Az ismertett számítási módszer szerint három különböző tartályt vizsgáltunk, a tartályok mindegyike közelítően $V = 2000 \text{ m}^3$ folyékony anyag tárolására alkalmas.

A méretek a 2. táblázat szerint.

Az állóhengeres tartályok viszonylag egyszerű szerkezetek. Fő részei a tartályfal, tartályfenék, tetőlemez és a különböző szerelvények. A tartályfal változó falvastagságú lemezből készül, mivel a terhelése a tárolt anyag hidrosztatikus nyomása.



2. ábra Állóhengeres tartály geometriai modellje

A tartályfenék és a köpeny csatlakozásánál hajlítónyomaték is ébred, ezért merevítést alkalmazunk, egyébként a membrán elmélet alapján méretezhetünk. A tartály beton alapon nyugszik, lehet lehorgonyzott vagy horgonyzás nélküli. A tartályfenék terhelése egyenletes nyomás, elméletileg igen vékony lemez is megfelelő, általában 5 mm vastagságú. A tartályfedél változatos kialakítású, lehet kúpszerű vagy gömbsüveg alakú, de nagyobb átmérőknél merevített. A számításokat a 2. esetre mutatjuk be. A tartályfal átlagos értékének 6 mm-t, a tetőlemez vastagságát 7 mm-re választottuk.

3. táblázat A tömegadatok és erőkarok

m _i	1684 t	h _i	8,01 m
m _c	316 t	h _c	14,85 m
m _w	32 t	h _w	9 m
m _r	3,2 t	h _r	18 m

A periodikus idők:

$$T_i = 7,03 \cdot \frac{31,62 \cdot 18}{0,03 \cdot 458257} = 0,291 \text{ s} \quad (6)$$

$$T_{con} = 1,48\sqrt{6} = 3,625 \text{ s} \quad (7)$$

A gyorsulások:

$$\begin{aligned} S_e(T_{con}) &= a_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot \frac{T_c \cdot T_b}{T^2} \\ &= 1,579 \cdot 2,5 \cdot 1,348 \cdot \frac{0,6 \cdot 2}{3,625^2} \\ &= 0,485 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S_e(T_{imp}) &= a_g \cdot S \cdot 2,5 \cdot \eta \cdot \frac{1}{q} \\ &= 0,14g \cdot 1,15 \cdot \frac{2,5}{1,5} = 2,63 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} Q &= (1684 + 32 + 6,2) \cdot 2,63 + 316 \\ &\quad \cdot 0,48 = 4686,2 \text{ kN} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} M &= (1684 \cdot 8 + 32 \cdot 9 + 6,2 \cdot 1,8) \\ &\quad \cdot 2,63 \\ &+ 316 \cdot 14,58 \cdot 0,485 = 38735 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (11)$$

Magyarországon öt szeizmikus zónát [4] határoztak meg, ez alapján a vízszintes gyorsulás pl. 4.zóna esetében 0,14 g.

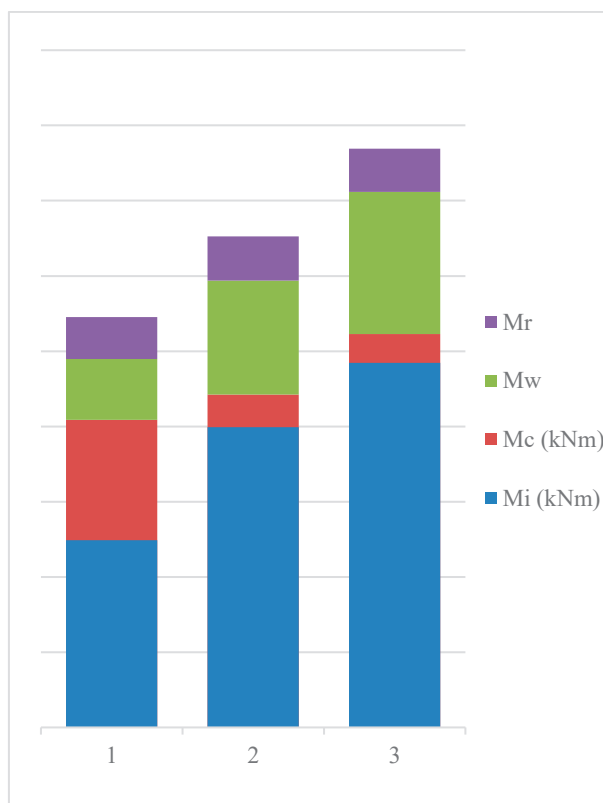
Az általaj szorzót $S = 1,15$ választjuk ez C típusú talajra vonatkozik.

A teherbírási állapotban számított igénybevételek 4. táblázat.

4. táblázat számított igénybevételek az egyes teherbírási állapotokban

	1. eset	2. eset	3. eset
T_{imp} (s)	0,19	0,291	0,34
T_{con} (s)	3,916	3,625	3,47
$S_e(T_{imp})$	3.82 / 2.53	3.95 / 2.63	3.95 / 2.63
$S_e(T_{con})$	0,414	0,485	0,54
V (kN)	4047,6	4686	4768
M_i (kNm)	22121,8	35472	43051
M_c (kNm)	2043	2211	2613
M_w	4058	758	946
M_r	278	294	287
M_{felb}	24848,5	38735	46897

Az acél tartály szeizmikus reakciójának összetevőit a 3. ábra mutatja.



3. ábra A felborító nyomaték értékei a különböző tartályoknál

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A földrengési hatások figyelembevételével végzett összehasonlító számítások alapján megállapítható, hogy a tartály geometriai arányait, különösen a karcsúsági tényezőt (magasság/átmérő arány), jelentős mértékben befolyásolják a kialakuló dinamikai igénybevételeket. Az egyszerűsített földrengés-számítási módszer [1] alkalmazásával végzett vizsgálatok rámutattak arra, hogy a tartály karcsúságának növekedésével arányosan növekszik a szerkezetre ható felborító nyomaték, ami stabilitási szempontból kedvezőtlen.

A vizsgált rezgésösszetevők közül az áramlási (fluidum) komponens nagy periódusidő miatt kisebb mértékben járul hozzá a szerkezeti igénybevételhez, mint a tartályfalhoz tapadó folyadék réteggel együtt mozgó, rövidebb periódusidejű, lökésszerű komponens. Ez utóbbi tehát nagyobb mértékben befolyásolja a tartály globális dinamikai viselkedését földrengés esetén.

A közelítő számítási eljárás – amely során a válaszspektrum plató szakaszához tartozó gyorsulási értékkel számolunk, azaz az $S_e(T_{imp})/q$ formulát alkalmazzuk – megfelelő pontosságot nyújt a mérnöki tervezés szempontjából, különösen akkor, ha a tartály

sajátideje ebbe a tartományba esik. A hivatkozott szakirodalmi adatok [3] alapján ez az egyszerűsítés nem eredményez jelentős számítási hibát, így jól alkalmazható előzetes vagy koncepcionális tervezési fázisban.

Mindezek alapján földrengés-veszélyes térségekben célszerű alacsonyabb karcsúságú, azaz robusztusabb geometriájú tartályokat alkalmazni, mivel ezek kedvezőbb dinamikai viselkedést mutatnak, és kisebb felborulási kockázattal rendelkeznek. A szerkezet stabilitásának és biztonságának növelése érdekében érdemes a tervezési fázisban a karcsúsági tényezőt és a dinamikai jellemzőket integráltan értékelni.

4. IRODALOM

- [1] EN 1998-4:2006 “Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tank and pipelines”
- [2] KOTRASOVA K., KORMANIKOVA E., LOUKILI M., MANSOUR S., FOTI D.: The seismic response of cylindrical steel tank at Al Hoceïma city in Morocco, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 1252, 2022.
- [3] VÁRDAI A.: Acéltartályok földrengésszámítása, gyakorlati megfontolások, Acélszerkezetek XIX. évfolyam 1. szám, 2022.
- [4] DULÁCSKA E., JOÓ A., KOLLÁR L.: Tartószerkezetek tervezése földrengési hatásokra, Akadémia Kiadó, 2008.

CAD/CAM SZAKMÉRNÖKÖK POSZTGRADUÁLIS OKTATÁSA

Postgraduate teaching of specialized CAD/CAM engineers

Dr. Piros Attila*, Dr. Trautmann Laura**

ABSTRACT

The article presents a paid professional engineering training at the national level in a hybrid form, a highly specialized engineering subject, not only for those with a bachelor's degree in engineering. E-learning works with MS Teams (education version). With the help of video recordings shared as aids, authorizations (elimination of fraud and abuse), and the software used (Smath, Onshape, even on mobile devices), the students acquire knowledge through comprehensive projects, which range from the creation of a product concept to the writing of the machining program. Automated hybrid examinations and the collection of student feedback are used to improve the effectiveness of education. Another goal is to extend the training results (as a pilot project) to the entire university education system.

1. BEVEZETÉS

A tervezési és gyártási folyamatok változnak, ezért a képzési anyagoknak és módszereknek is változniuk kell. Az előtervezés, a gépészeti számítás (digitális analitikus számítás), a részlettervezés (digitális makett) és a virtuális tesztek mind a digitális módszer részét képezik [1]. Továbbá a digitalizált dokumentáció (gyártási rajzok és összeszerelési dokumentáció PDF és U3D formátumban [2]) a gyártástámogatás jövője, amelynek jellemzői a felhőalapú adattárolás, a heterogén adatok tárolása, az automatikus előnézetek, a párhuzamos tervezés, a fájlverziók kezelése, a letöltési linkek küldése webböngészőn keresztül.

A digitális gépészmérnöki képzés bevezetéséhez a magyar egyetemek többségén a következő változtatásokat kellene végrehajtani:

- minden tanórának digitális tananyagon kell alapulnia, amelyhez a diákok papírmentes formában férhetnek hozzá
- minden házi feladatot, értékelést és vizsgát teljes mértékben digitalizálni kell, lehetőség szerint automatikus értékeléssel
- a hallgatók nemcsak speciális laboratóriumokban, hanem saját eszközeik használatával is bővíthetik számítógépes tervezéssel kapcsolatos ismereteiket

- a gépészeti számításokat szintén speciális és ingyenesen elérhető szoftverek segítségével, tisztán számítógépes alapon végzik
- a CAD és a gépészmérnöki ismeretek oktatásának teljesen szinkronban és egymást kölcsönösen erősítve kell történnie, ahol a gépészeti terveket és dokumentációt a hallgatók teljesen elektronikus formában készítik el

A fenti változtatások a következő előnyökkel járnak:

- egy másik, a COVID-19-hez hasonló, karanténnal nehezített egészségügyi helyzet nem fogja komolyan befolyásolni az oktatás minőségét
- a papíralapú munka arányának csökkentése az oktatás által okozott környezeti terhelést is csökkentheti
- az automatikus értékelő rendszer drasztikusan csökkenthetné a hallgatók panaszait a teljesítményértékelések után
- a hallgatóknak lehetőségük lenne távolról részt venni a késői időpontokban tartott foglalkozásokon (pl.: CAD felzárkóztatás az órarenden kívül), amire eddig nem volt lehetőségük (pl.: a késői kezdés miatt nem tudtak volna hazaérni a foglalkozás után)
- a digitálisan elsajátított tudás és annak módszere jelentősen növeli a diákok motivációját, mivel a számítógépen végzett munkát könnyebben kezelhetőnek fogják értékelni

A digitalizáció mellett a hibrid képzési forma növelheti az oktatás hatékonyságát. A cikkben bemutatott CAD/CAM szakmérnöki képzés egy digitalizációra épülő hibrid képzési forma, amely modern és magas szintű mérnöki képzést nyújt.

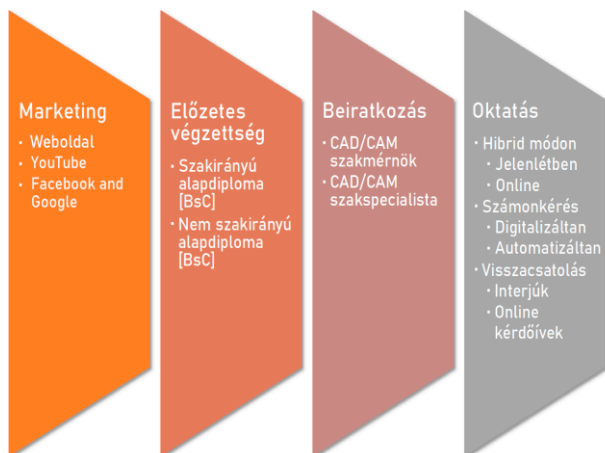
2. CAD /CAM SZAKMÉRNÖKI POSZTGRADUÁLIS KÉPZÉS

A CAD/CAM szakmérnöki posztgraduális képzés országos szintű, önfelfinanszírozású szakmérnöki képzés hibrid formában, egy nagyon speciális mérnöki témában, amely elérhető a nemcsak mérnöki alapidiplomával rendelkezők számára is. A szakirányú alapidiplomával induló hallgatók szakmérnöki, míg nem szakirányú alapidiplomával jelentkezők szakspecialista diplomát szerezhetnek. Az oktatás hibrid formában történik két jelenléti helyszínen (Kecskeméten és Budapesten). Habár egy vidéki egyetem indítja a képzést, de a budapesti helyszín lehetővé teszi a

* egyetemi docens, Neumann János Egyetem, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék

** adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék

fővárosból érkezők csatlakozását is. Az online forma az egész országra kiterjeszti a képzési kört, de határon túlról is vannak jelentkezők. A szakmérnöki képzés első két évfolyamában többen Németországból követték a tanórákat, de volt erdélyi és Franciaországban dolgozó hallgató is. A felmérések alapján a nagy távolság nem okozott problémát a szakmérnöki diploma megszerzésében. A képzés során a hallgatók átfogó projekteken keresztül mélyítik el tudásukat, a termékkonceptió megalkotásától a megmunkálási program megírásáig. Az 1. ábra a CAD/CAM mérnök posztgraduális képzésének sémáját mutatja be, amelyet a következő szakaszokban részletezünk.



1. ábra A CAD/CAM mérnök posztgraduális képzésének vázlata

3. MARKETING

A CAD/CAM szakmérnöki posztgraduális képzés egy vadonatúj képzésként indult (nem volt előzménye), így viszonylag nehéz volt piacra vezetni. Nem volt könnyű megtalálni a célközönséget és eljuttatni hozzájuk a képzés célját. Saját területén (mérnöki tudományok) jelenleg ez a legdrágább képzés Magyarországon, ami további kihívást jelent az értékesítésben. A marketing szinte kizárólag online módon történik különböző platformokon (weboldal, Youtube (pl. 2. ábra), Facebook, Google).



2. ábra Youtube LIVE, mint online marketing eszköz [3]

Napjainkban egyes egyetemeken az érzelmekre ható videók és a hatástalan online marketingkampányok próbálják felkelteni a hallgatók érdeklődését; azonban a

kurzuson alkalmazott precízebb online marketing, a Youtube LIVE beszélgetés, valamint az informatív, célzott weboldal [4] jobb eredményekhez vezetett. A jól célzott marketing hatékonyságát a következő mérési eredmények szemléltetik (1. táblázat):

1. táblázat Facebook marketing hatékonysága

kampány	hossz	elérés	jelentkező
Hagyományos	10 nap	30938	0 fő
CAD/CAM	4 nap	41346	20 fő

4. KORÁBBI KÉPESÍTÉSEK ÉS BELÉPÉS A KÉPZÉSBE

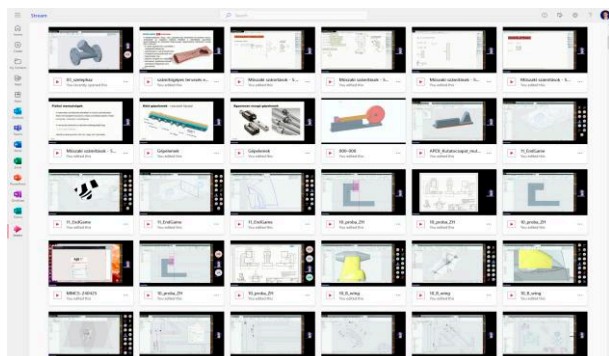
A képzésre jelentkezők között vannak olyanok, akik rendelkeznek szakirányú előképzettséggel, de vannak, akik nem. A különböző háttérű, korú és alapképzettségű jelentkezők integrálása a képzésbe nehézkes, ezért fontos szerepet játszik az ennek kiküszöbölésére indított felzárkóztató kurzus. A felzárkóztató kurzusnak nincs értékelése csak aláírást kell szerezni. A felzárkóztatás a képzés két alapvető területére koncentrál. A számítógéppel támogatott gyártás (CAM - Computer Aided Manufacturing) bemutatása a képzés első napján történik. Mivel a beiratkozás csak személyesen történhet, ezért az első oktatási napon minden hallgató a kecskeméti jelenléti oktatási helyszínen található. Itt az elméleti alapon felül lehetőség van a megmunkológépek helyszíni megtekintésére is, ami sok későbbi kérdés tisztázását teszi lehetővé. A másik nagy területnek, a számítógéppel segített tervezésnek (CAD - Computer Aided Design), a bemutatása már online oktatási napon folytatódik, mert itt már nem kell az ismereteket konkrét gépekhez kötni. A beiratkozás során az előképzettségtől függ, hogy a hallgató a képzés elvégzése után mérnöki vagy szakirányú oklevelet kap. A szakirányú képesítéssel nem rendelkező hallgatók alaposabb felkészítés után más jellegű féléves feladatokat kapnak. Ezen hallgatók felzárkóztatását nagyban megkönnyíti a tanórákon felvett videó tananyagok visszanezhetősége.

5. OKTATÁS

5.1. Oktatás és tudásátadás hibrid módon

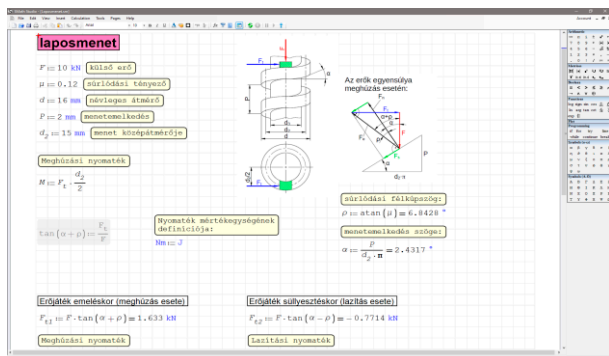
A személyes jelenléttel zajló laborfoglalkozások mellett a hibrid oktatási rendszer lehetőséget kínál online részvételre is az MS (Microsoft) Teams és a Moodle rendszerek segítségével. Az MS Teams egy összetett eszköz, amely hozzáférést biztosít különféle alkalmazásokhoz, például az MS Stream nevű videótárhely oldalhoz [5]. Az órákról videofelvételek készülnek, amelyek az MS Teams felületén keresztül visszanezhetők (3. ábra). Ennek a megoldásnak az a nagy előnye, hogy a feltöltött videofelvételekhez történő

hozzáférést automatikusan szabályozza a rendszer az MS Teams csoportokhoz rendelt hallgatói jogosultságok alapján. Ezen a módon a tananyagokhoz kapcsolódó szerzői jogok kezelése is megfelelő kereteket kap, hiszen csak az adott oktatási csoporthoz tartozó hallgatók érhetik el a vonatkozó oktatási segédleteket.



3. ábra Videofelvételek az MS Streamben

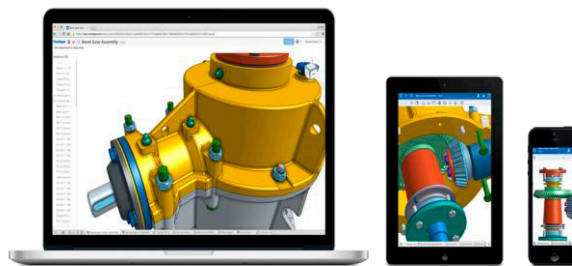
A böngészőben futó webes alkalmazások, például a Smath vagy az Onshape, akár mobileszközökön is hozzáférhetővé teszik az oktatási tematikákat. Az SMath szoftver kiváló támogatást nyújt a mérnökhallgatóknak a bevitt számítások természetes megjelenítésével és a fizikai mértékegységek széles körű támogatásával (4. ábra). Ez a szoftver sokat segít a mérnöki számítások jobb megértésében a fizikai mennyiségek (mérőszám és mértékegység szorzatával leírt mennyiségek) érthető ábrázolásával és azok átváltásának az automatizálásával.



4. ábra Számítási példa a SMath Studio programban

A webalapú CAD szoftverek (például az Onshape) használatának előnye, hogy nincs szükség telepítésre, a modellezési funkciók egy webböngészőn vagy a mobil informatikai eszközökre kifejlesztett applikációkon keresztül érhetők el (5. ábra). Ezzel az Onshape tökéletesen megvalósítja a szoftver, mint szolgáltatás elvet (SaaS - Software as a Service). Mivel a szoftver az adatokat felhőben tárolja el, ezért közös munka végezhető ugyanazon a modellen (hasonlóan a Google Sheet-ben kezelt táblázatokhoz). Ezen felül a feladatok beadása és az értékelés teljes egészében online történik. Ezt a lehetőséget az online CAD rendszeréhez kapcsolt speciális adatbázis kezelő PDM (Product Data

Management) rendszer teremti meg. Ebben a rendszerben lehet kezelni a tanulócsoportokat és a csoportoknak kiadott feladatokat is.

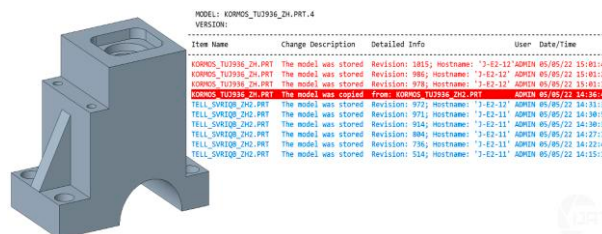


5. ábra Webalapú CAD szoftver különböző eszközökön

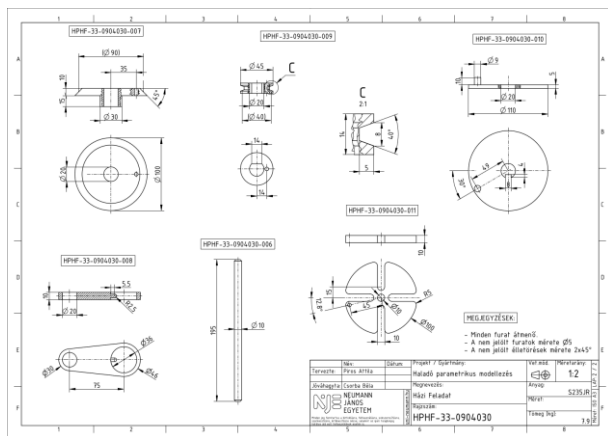
A digitalizált oktatás egy nagyszerű lehetőség, ami extra motivációt ad a diákoknak, hiszen (szinte születése óta) minden hallgató használ digitális eszközöket, így sokkal szívesebben oldanak meg gépészeti- (és egyéb) problémákat a számítógép használatával.

5.2. Számonkérés

A tananyag átadása mellett a számonkérés is digitálisan történik. A digitalizálás mellett fontos az automatizált feladatkiadás (7. ábra) és értékelés is, ami nagyban megkönnyíti az oktató dolgát. A digitális jogkezelés a digitális oktatás sajátosságaiból eredő csalások kiküszöbölésére szolgál. A csalások kiszűrésének az alapja a digitálisan létrehozott anyagok vízjelzése. Például a számítógépes tervezés folyamán elkészülő CAD fájlokat (3D-s modelleket) a szoftver (esetünkben a PTC Creo CAD rendszer) olyan digitális vízjellel látja el, amely alkalmas a modell létrehozójának a beazonosítására, valamint a modell változásainak a nyomonkövetésére (pl.: pontosan ki és mikor másolta le az adott modellt és ez a művelet melyik számítógépen történt 6. ábra). Mivel egy ilyen azonosítás esetén indirekt módon, de személyes adatok kezelése is megtörténik, ezért fontos előre közölni a hallgatókkal az azonosított személyes adatok körét (számítógép- és felhasználói azonosító) valamint azok felhasználásának a konkrét célját (a tanulmányi szabályzatban nem megengedett adatátadás).



6. ábra Szabálytalan másolás nyoma a digitális vízjelben

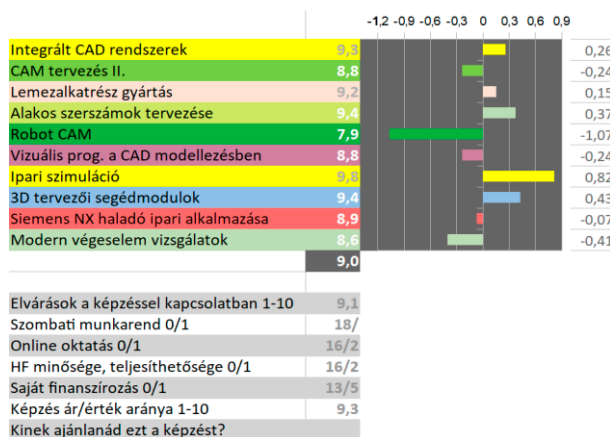


7. ábra Automatikus generált házi feladat a PTC Creo CAD rendszerben

5.3. Az oktatás hatékonyságának a növelése

A leghatékonyabb módszer a hallgatói elégedettség folyamatos mérése a személyes interjúk és az online kérdőívek. Ezeken a módokon közvetlen és személyekre bontott képet lehet kapni elsősorban az oktatott tantárgyakkal kapcsolatos hallgatói véleményekről.

A tantárgyi értékelésen felül még a kurzussal való elégedettség értékelése során a következő szempontokat mértük: a képzéssel kapcsolatos elvárások, a szombati munkarend, az online oktatás, az önállóan elkészíthető házi feladat, az önfelkészítés, valamint a képzés ár/érték aránya. Egy adott féléves felmérés eredményei a 8. ábrán láthatók.



8. ábra Féléves felmérés eredményei

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az előzőekben ismertetett módszerek eredményeként az oktatás színvonala emelhető egy egységes, online és nagymértékben automatizált oktatási platform bevezetésével, miközben csökken az oktatók munkaterhelése is. Ez magában foglalja olyan szoftverek bevezetését is, amelyek egyetemi szinten, felhőalapú tárolással, automatizált adminisztrációval támogatott módon használhatók.

A fent leírt képzés kiterjesztésével modern, magas színvonalú, egyetemi szintű integrált oktatás valósítható meg, jelentős digitalizációval és az oktatók terheinek csökkentésével karöltve. A cél a képzési eredmények kiterjesztése (pilot projektként) a teljes egyetemi oktatási rendszerre.

7. SUMMARY

As a result, the standard of education can be raised by introducing a unified, online, and highly automated educational platform while reducing instructors' workload. This includes introducing software that can be used jointly with automated administration at the university level on a cloud basis.

By expanding the training described above, modern, high-level, university-level integrated education can be achieved, with significant digitization and reducing the burden on instructors. The goal is to extend the training results (as a pilot project) to the entire university education system.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A TKP-6-6/PALY-2021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

9. IRODALOM

- [1] R. Riascos, L. Levy, J. Stjepandi'c, and A. Fröhlich, "Digital mock-up," Concurrent engineering in the 21st century: Foundations, developments and challenges, pp. 355–388, 2015.
- [2] A. Majorov, "Universal 3d (u3d)," in International Conference Graphicon, 2005.
- [3] Piros A C3D, "CAD/CAM + STARTUP", <https://www.youtube.com/live/sul80D9qcfM?si=T2cAOCpbb3VqjVxi>, 2024.
- [4] <https://szakmernoki.com/>, 2025.
- [5] S. Hai-Jew, "Evaluating "MS Teams" for teaching and learning," C2C Digital Magazine, vol. 1, no. 13, p. 7, 2020.

NEM-NEWTONI FLUIDUMBAN ÜLEPEDŐ GÖMB JELENSÉGÉNEK IRODALMI ÁTTEKINTÉSE

LITERATURE SUMMARY ON THE PHENOMENON OF SPHERE SETTLING IN NON-NEWTONIAN MEDIA

Suller Lili*, Vadászné Dr. Bognár Gabriella**, Dr. Faitli József***

ABSTRACT

Nanofluids are increasingly used in engineering practice due to their exceptional thermal properties. They are used in the automotive industry, cooling and lubricating systems, electronics, air conditioning, chemical processing and even in the solar industry as well as hydraulic transport. Understanding the behavior of nanofluids is crucial for being able to predict the design parameters and hence designing more optimal, more efficient equipment. One of the basic phenomena of rheology is a sphere settling in a fluid. In this paper, a brief review of the literature on this topic is given.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki gyakorlatban egyre több területen alkalmaznak nanofluidumokat kedvező hővezetési és hőátadási tulajdonságaik miatt. A nanofluidumok speciális kétfázisú rendszerek, melyekben szilárd részecskék (pl.: nano méretű fémporok, oxidok, szén nanocsövek) vannak eloszlva egy alapfolyadékban. A szilárd részecskék jelenléte jelentősen javítja az alapfolyadék hővezető képességét, hőátadási tulajdonságait és befolyásolja a keverék folyási viselkedését. Széles körben használják őket hűtőrendszerekben és kenőanyagként, mivel jobb hővezető képességgel és magasabb viszkozitási értékekkel rendelkeznek, mint a legtöbb hagyományos folyadék. Ezért széles körben használják őket az autópárházban, ahol a hatékony hűtés rendkívül fontos, az elektronika területén, légkondicionáló rendszerekben, vegyiparban gyártási folyamatok során valamint napenergiái-rendszerekben is egyre több helyen előfordulnak. A hidraulikus szállítás területén (például a bányászatban), amikor csővezetékben nagymennyiségű szemcsés anyag halmazt szállítanak folyadék-áramban, fontos az, hogy a különféle méretű szemcsék hogyan befolyásolják a keverékáramlás jellemzőit. Energiahatékony szállítás csak úgy tervezhető, ha ezt figyelembe tudjuk venni.

A nanofluidumok tulajdonságainak és viselkedésének megértése igen fontos mérnöki szempontból, mivel segít abban, hogy kisebb veszteségekkel és nagyobb hatékonysággal működő berendezéseket lehessen tervezni.

A szemcsemozgás egyik alapvető áramlási jelensége egy közegtől nagyobb sűrűségű gömbnek a gravitációs erőter hatására való süllyedése. Ezt a jelenséget végtelen kiterjedésű newtoni közegek esetén Stokes írta le elsőként egyfázisú közegekben. Azonban a gömb süllyedését jelentősen befolyásolja a nano- vagy akár nagyobb méretű részecskék jelenléte a folyadékban, mivel módosíthatja a határfelületi erőket, illetve az áramlási teret a süllyedő gömb körül. Ezen a területen számos kutatást végeztek, hogy minél pontosabban le tudjuk írni a részecskesüllyedés jelenségét nem-newtoni közegek esetében és meg tudjuk becsülni a süllyedési sebességet.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A szakirodalomban számos esetet találhatunk a fent leírt jelenség vizsgálatára.

Faitli [1] a részecske ülepedés jelenségét tanulmányozta egy- és kétfázisú newtoni és nem-newtoni fluidumokban. Megállapította, hogy bár számos modell létezik nem-newtoni közegekben való szemcsemozgás leírására, ezek csak az adott esetre alkalmazhatóak és nem univerzálisak. Ezen a téren Wilson et al. érték el nagyobb áttörést. Bevezettek egy olyan univerzális és egyszerűen alkalmazható mérnöki megoldást, amivel meg lehet állapítani a részecske süllyedési végsebességét. Bevezették az *egyenértékű newtoni abszolút viszkozitás* fogalmát, melynek ismeretében nem-newtoni közegek esetében is alkalmazhatóak a newtoni összefüggések.

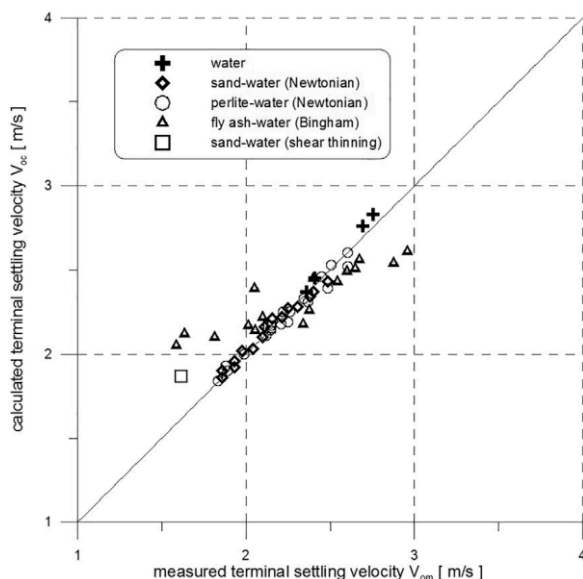
Faitli részletesen foglalkozott durva diszperz szilárd-folyadék rendszerekkel. Felvetett egy hipotézist, melyet „durva diszperz rendszerek kontinuitási elméletének” nevezett. Az elmélet szerint a durva diszperz rendszer viselkedését (kontinuumszerű, diszkrét elemes, vagy kevert) a folyamat (berendezés, vagy jelenség) és a diszpergált anyag jellemző méretének aránya határozza meg. A hidraulikus szállítás esetében Faitli felvetése szerint a berendezés jellemző mérete a lamináris alaprét vastagsága a cső falának közelében. Az ettől a mérettől kisebb szemcsék és a folyadék a csőben egy kontinuum viselkedésű finom szuszpenziót alkot, amely hiába kétfázisú, mégis egyfázisú közegnek tekinthető és értelmezhető a reológia. Ez a hordozó kvázi egyfázisú

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

*** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet

folyadék szállítja a diszkrét elemekként viselkedő durvább szemcséket. Fajti célja az volt, hogy bebizonyítsa az elmélet érvényességét a szemcsemozgás jelenségére is. Ennek érdekében ülepedési kísérleteket végzett három különböző szilárd granulátum felhasználásával (finomszemcsés üveghomok – Fehérvárcsurgó, perlit – Pálháza, ligniterőműi szállópernye – Gyöngyös). A szuszpenziók alapfolyadéka víz volt. A kísérletek során négy különböző átmérőjű (28, 30, 38, 40 mm) acél golyó ülepedése került megfigyelésre. A reológiai és az ülepedési kísérleteket saját készítésű berendezésekben (csőreométer és ülepedésvizsgáló) végezte. Kétféle teszt sorozatot hajtott végre, az első newtoni fluidumokban történő ülepedés vizsgálatára szolgált, a második nem-newtoni finom szuszpenziókkal történt. A méréseket követően összefüggések segítségével meg lehetett határozni a süllyedési végsebességet. A kutatás eredményeként meg lehet állapítani, hogy a finom szuszpenzióban ülepedő gömb esetében a közeget kontinuumként lehet kezelni, mivel a mért és a számolt eredmények jó egyezést mutattak (1. ábra).



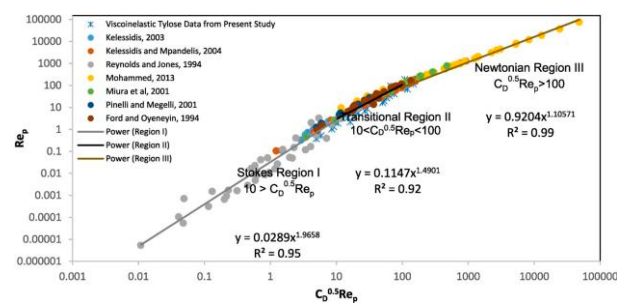
1. ábra. Állandósult ülepedési sebesség mért és számolt értékei [1]

Okesanya és szerzőtársai [2] rugalmas és rugalmatlan viszkózus folyadékokat vizsgáltak. A kutatásaik során arra törekedtek, hogy számszerűsítsék a folyadék rugalmasságának hatását olyan viszkoelasztikus és viszkoinelasztikus folyadékokra, melyeket a hatványtörvény szerint lehet jellemezni. A kísérleteik során üveg, acél, kerámia és cirkónium gömböket használtak. A mérések során kétféle polimerből és desztillált vízből készítették szuszpenziót. A kétféle polimer (hidrolizált poliakrilamid és carboximetil cellulóz) eltérő rugalmassági tulajdonságokkal rendelkeztek. A nyírási viszkozitás és a viszkoelasztikus tulajdonságok meghatározáshoz viszkozimétert alkalmaztak, illetve rezgési méréseket végeztek.

A kísérletek során PIS (Particle Image Shadowgraphy) módszert alkalmaztak a gömb alakú szilárd részecskék ülepedési sebességének meghatározására. A kapott eredmények hitelesítésére standard newtoni folyadékkal (vízzel) is elvégezték az ülepedési kísérleteket. Az eredmények jól illeszkedtek a közegellenállási görbére.

A tanulmányban több mint 25 polimer-víz mintát vizsgáltak különféle rugalmassági tulajdonságokkal, eltérő részecske mérettel és sűrűséggel. A reológiai mérések kimutatták, hogy mindegyik folyadék hatványtörvény alapján viselkedett.

A szerzők ezt követően egy $Re_p - c_D^{0.5} Re_p$ ellenállási görbe felvételét javasolták. Az Re_p a részecske Reynold szám, c_D pedig az ellenállási tényező. A görbén három szakaszt lehetett megfigyelni. Az első az ún. Stokes szakaszmozgási tartomány, a második pedig a newton turbulens tartomány. Mind a három szemcse körüláramlási tartományon külön kell meghatározni a részecske Reynolds számot. Ezt követően meg lehet határozni az ülepedési sebességet.



2. ábra. Ellenállási görbe (viszkoinelasztikus folyadékok) [2]

A számolt értékek és így a modell megfelelőségét a szerzők statisztikailag értékelték. Kétféle módszert alkalmaztak, a százalékos átlagos abszolút eltérést és a négyzetes középhiba módszert. A statisztikai értékelés jó egyezést mutatott a mért és a modellt alapján számolt adatok között.

Moseley és szerzőtársai [3] két tixotróp folyadékban egymást követően süllyedő függőlegesen egytengelyű gömb mozgását vizsgálták. Figyelembe vették a folyadék relaxációs idejét (azt az időtartamot, amely alatt a folyadék visszarendeződik az eredeti szerkezetébe), mivel ez jelentős hatással van a viszkozitásra, és így az ülepedő részecskék sebességére is. A kutatás során nem-newtoni xantán-glicerol-víz folyadékban végeztek ülepedési kísérleteket.

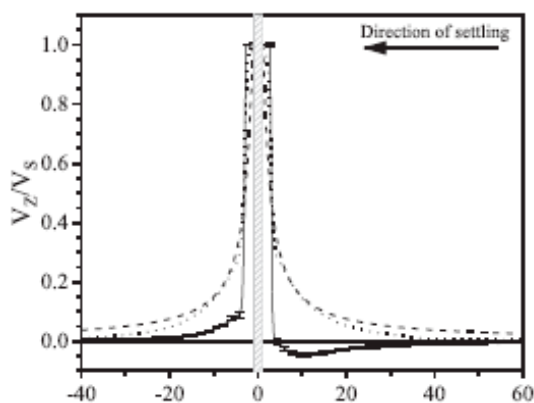
A szerzők abból a felvetésből indultak ki, hogy newtoni folyadékban két egytengelyű gömb ülepedési sebessége azonos, azonban függ a gömbök középpontjainak távolságától. A gömbök távolságának csökkenésével egyre nő a sebességük a hidrodinamikai kölcsönhatások miatt. Newtoni folyadék esetében Faxén első törvénye alapján lehet meghatározni a folyadék sebességét. Ez a feltevés képezte a kutatás alapját.

A kísérletek megkezdése előtt xantán oldatokat készítettek, melyeket 30 napig pihentettek, hogy megszabaduljanak a légbuborékoktól. A folyadékok reométerben történő vizsgálata során megállapították, hogy a folyadék körülbelül 5 perc alatt rendeződik vissza az eredeti szerkezetébe.

Az ülepedési kísérletek során 1,5 mm átmérőjű edzett rozsdamentes acélgolyókat ülepítettek. A kísérletek során kétféle mérési módszert alkalmaztak. Az egyik módszer optikai, mely egy kamera felszerelését jelentette. Ezzel mérték az acélgolyók ülepedési sebességét. A süllyedő szemcsék sebességét PIV (Particle Imaging Velocimetry) eljárással mérték.

A rendelkezésre álló összefüggések alapján kiszámították az ülepedési sebességet és jó egyezést tapasztaltak a mért adatokkal. Tehát ez megfelelő alapként szolgál arra az esetre, amikor két egytengelyű gömb ülepszik egymás után ugyanabban a folyadékban. Ehhez ismét Faxén első törvényéből indultak ki és a számítások során a PIV alapján mért és átszámított folyadék sebességeket használták fel a gömbök ülepedési sebességének meghatározásához. Az eredmények alacsony Re_p mellett jó egyezést mutattak a kísérleti eredményekkel.

Nem newtoni folyadékok esetében a szerzők két fő különbséget azonosítottak a newtoni folyadékokhoz képest.



3. ábra. Folyadék sebesség profi nem newtoni folyadékban ülepedő gömb esetében [3]

Az egyik a folyadék sebessége. A sebességprofil ebben az esetben nem szimmetrikus egy ülepedő gömb előtt és után. Negatív nyomvonal figyelhető meg. A nem newtoni folyadék sebességprofilja a gömb előtt hasonló alakú, mint a newtoni folyadékoké, azonban a gömb után negatív tartományba süllyedt, és a minimális pont után lassan újra elérte a nullát.

A második különbség a nem-newtoni folyadékok látszólagos viszkozitása. Megfigyelhető, hogy amikor két függőlegesen egytengelyű gömb tixotróp, folyadékban ülepszik, a második gömb nagyobb sebességgel halad, mivel az első gömb csökkenti a folyadék látszólagos viszkozitását. Ennek a jelenségnek a leírásához a szerzők a következő feltételezéseket tették.

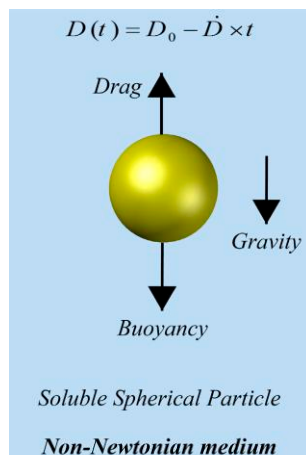
a.) az első gömb sebessége megegyezik a newtoni folyadékban ülepedő egyetlen gömb sebességével, mivel még nem történt kölcsönhatás.

b.) A második gömb sebessége a látszólagos viszkozitási aránnyal szorozható, mielőtt a hidrodinamikai kölcsönhatásokat figyelembe vennék.

c.) a folyadék látszólagos viszkozitásának nyíróerő hatására bekövetkező csökkenése nem jelentős.

Ezen kritériumok alapján a szerzők kiszámították az első és a második gömb ülepedési sebességét. Az eredmények és a mért értékek jó közelítéssel egyeztek a $d/r < 7$ tartományban. A szerzők megállapítják, hogy a folyadék látszólagos viszkozitásának csökkenése nagyrészt a tixotropikus tulajdonságának köszönhető (kb. 28%). Ezért arra a következtetésre jutottak, hogy a nyíróerő hatására bekövetkező látszólagos viszkozitás csökkenés ezekben az esetekben nem olyan jelentős. Azt is megállapították, hogy $d/r < 30$ körül a folyadékban visszaáramlási zóna alakul ki. Ebben a tartományban a számított és a mért értékek között sokkal nagyobb eltérés volt megfigyelhető.

Dogonchi és szerzőtársai [4] a kollokációs módszer (CM) segítségével vizsgálták egy oldódó gömb ülepedési mozgását nem newtoni folyadékban. Kutatásaik során tanulmányozták a különböző paraméterek hatását az oldható részecske sebességére és gyorsulására.



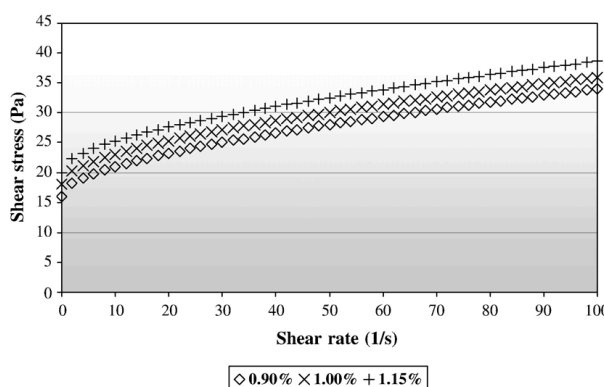
4. ábra. Nem newtoni folyadékban ülepedő oldható részecske sematikus ábrája [4]

Különböző sűrűségű és átmérőjű részecskékkel végezték el a kollokációs számításokat, és megpróbálták meghatározni, hogy ezek a változó paraméterek milyen hatással vannak a részecske folyadékban való mozgására. A kutatás során azt a feltételezést tették, hogy az átmérő lineárisan változik az oldódás során.

A szerzők a következő megállapításokat tették:

1. kisebb kezdeti átmérő esetén a részecske sebessége és gyorsulása is kisebb
2. a részecske kezdeti átmérőjének csökkentésével az gyorsabban éri el a végsebességet
3. minél gyorsabban csökken a részecske átmérője, annál kevesebb időre van szüksége a végsebesség eléréséhez.

Gumulya és szerzőtársai [5] egy általános modell kidolgozásán dolgoztak, amely leírja két azonos, függőlegesen egytengelyű gömb viszkoelasztikus folyadékban történő süllyedésének viselkedését. A kísérleteket egy függőleges, átlátszó csőben végezték, melynek négyzet alakú volt a keresztmetszete. A tesztsző méreteit úgy választották meg, hogy a falhatás elhanyagolható mértékű legyen. A várakozásoknak megfelelően a szerzők azt tapasztalták, hogy az első gömb nem sokkal a kísérleti csőbe való belépése után elérte végsebességét. A második gömb azonban lényegesen nagyobb sebességgel haladt át a folyadékon. Egy idő után a két gömb ütközött és egymáshoz tapadt, ami miatt azonos sebességgel haladtak tovább. Egy másik fontos megállapítás, hogy közvetlenül az ütközés előtt az első gömb gyorsult, míg a második gömb lassult.



5. ábra. Mért nyírási diagramok [5]

A kísérletekből nyert nyírási diagramon jól látható, hogy nagy nyírási sebességek esetén közel lineáris a görbe, azonban kisebb értékeknél egyre inkább eltér a görbe a lineáris közelítő egyenestől. A kísérletekből származó értékek nagy része az alacsony sebességű tartományba esik. Ennek következtében a szerzők megállapították, hogy a Casson modell jobban le tudja írni az ülepedési jelenséget, mint a lineáris Bingham modell. Az ülepedő gömbök sebességének leírására a szerzők a két gömb kísérleti csőbe való bejuttatása közötti időeltérés dimenzió nélküli formában történő kifejezését javasolták. A gömbök sebességének számított értékei nagyfokú egyezést mutattak a kísérleti eredményekkel a $Re^* < 4$ tartományban. A magasabb Re^* értékek esetében a javasolt egyenlet nem tudja pontosan leírni a gömbök sebességét.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt években számos kutatás irányult a nem-newtoni folyadékok viselkedésének a vizsgálatára és megértésére. Ezeknek a kutatásoknak az egyik célja, hogy feltárják az áramlási alajelenségek körülményeit. Az egyik ilyen alajelenség a gömb ülepedése. A témában jelentős mennyiségű kutatás történt, amelyeknek az eredményeképpen rendelkezésünkre állnak különféle nem-newtoni folyadékoknak a kísérletek során mért adatai. A legtöbb

kutatás célja egy teljesen univerzális modell megalkotása volt, ami azonban még nem született meg. Helyette olyan összefüggések állnak a rendelkezésünkre, amelyek bizonyos folyadéktípusok kisebb, vagy nagyobb Re tartományában alkalmazhatóak.

4. SUMMARY

In recent years, numerous studies have focused on investigating and gaining a deeper understanding of the behavior of non-Newtonian fluids. One of the main objectives of these studies was to understand the basic conditions of fundamental rheology phenomena.

One of the most important fundamental phenomena is the settling of a sphere in non-Newtonian fluids.

A considerable number of studies have been conducted in this field, resulting in an extensive amount of experimental data describing the behaviour and parameters of various non-Newtonian fluids.

Many of these studies aimed to create a universally accurate model; however, such a model has yet to exist. What we do have is a considerable number of empirical correlations to predict the behavior of specific non-Newtonian fluids with reasonable accuracy and limitations.

5. IRODALOM

- [1] FAITLI J.: *Continuity theory and settling model for spheres falling in non-Newtonian one- and two-phase media*, International Journal of Mineral Processing Vol.169, 2017, pp. 16-26, <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.09.010>
- [2] OKESANYA T., ABDUKARIMOV A., KURU E.: *Generalized models for predicting the drag coefficient and settling velocity of rigid spheres in viscoelastic and viscoinelastic power-law fluids*, Journal of Petroleum Science and Engineering Vol 191, 2020, 107077 <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107077>
- [3] MOSELEY K., FAIRWEATHER M., HARBOTTLE D.: *Settling dynamics of two identical vertically aligned spheres in a thixotropic fluid*, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 271, 2019, 104146 <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2019.104146>
- [4] DOGONCHI A.S., SEYYEDI S.M., HASHEMI-TILEHNOEE M., GANJI D.D.: *Investigation of sedimentation process of soluble spherical particles in a non-Newtonian medium*, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 530, 2018, pp. 532-537 <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.004>
- [5] GUMULYA M.M., HORSLEY R.R., WILSON K.C.: *The settling of consecutive spheres in viscoplastic fluids*, International Journal of Mineral Processing, Vol.82, 2007, pp. 106-115 <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.11.005>

ÜTKÖZÉSI HELYZET OPTIMÁLÁSA

OPTIMIZATION OF A COLLISION SITUATION

Dr. Szabó Ferenc János*

ABSTRACT

The grapho- analytical optimization method based on the Kuhn-Tucker optimality criterium is very efficient for the optimization of problems which can be described by mathematical equations and formulae. In this paper the collision situation is investigated between a car and a rigid wall. Considering the mass of the car and the constant of the spring as design variables and the deceleration during the collision as objective function, it is possible to build up the optimization problem of this collision situation. As result we can get the optimum value of the mass and the spring constant for minimum deceleration.

1. BEVEZETÉS

A Kuhn- Tucker optimalitási kritériumra alapuló grafo- analitikus optimumkeresési módszer kevés (2- 3) változó esetén hatékonyan bizonyul különböző problémák, jelenségek optimalizálásához. Már két változó esetén is érdekes, jelentős eredmények érhetők el, valamint a grafikus és analitikus rész- megoldások segíthetik, ellenőrizhetik egymást, ami nagyban megnöveli a megoldási folyamat megbízhatóságát, hatékonyságát. A grafo- analitikus módszerrel elérhető eredmények jelentőségét, hasznosságát néhány eddigi alkalmazás példája támasztja alá:

- autó rugók optimális méretezése [1];
- reteszkötés optimális kialakítása; [2];
- bordás kötés optimalizálása; [3];
- fogaskerekek optimális tervezése minimális működési zaj céljából; [4];
- tengelyek csapágyazásának optimalizálása minimális tömegre és/vagy minimális költségre [5].

Az említett alkalmazási példák 2 és 3 változós optimalizálási feladatokat oldanak meg, amelyek esetén 2D és 3D ábrázolási esetek is vannak. Érdekesség, hogy a 3D esetek (3 változós optimumkeresési feladatok) optimális megoldásának keresése során a grafo- analitikus módszer esetén láthatóvá válik számunkra az összes lehetséges 2 változós megoldás. Ezt akár visszafelé irányban is alkalmazni lehet, hiszen ha minél több kétváltozós megoldást felvonultatunk, akkor előbb- utóbb közel kerülünk a háromváltozós optimumhoz is.

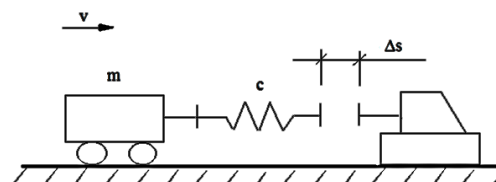
Jelen cikkben egy autó ütközési helyzetét vizsgáljuk, melynek során az autó egy merev falnak (esetleg

fának) ütközik, az optimumkeresés célja a minél kisebb lassulás érték elérése. A változók az autó tömege és az ütköző zóna rugóállandója. Implicit feltétel, hogy az ütközéskor fellépő erőhatás ne haladja meg az elviselhetőség mértékét. Az autó ütközés előtti sebességét adottnak, állandónak tekintjük. Az optimumkeresési feladatot a Kuhn-Tucker féle optimalitási kritériumra alapuló grafo- analitikus módszerrel [3] oldjuk meg. Az egyszerűség kedvéért az ütközés során a deformációs munkát nem vettük figyelembe, ennek figyelembe vétele növelné az utasok túlélési esélyeit.

Ennek a vizsgálatnak az eredményei alapján láthatóvá válik számunkra, hogy a minimális ütközési lassulás elérése milyen esetekben lehetséges, és ezek alapján hasznos szempontok alakíthatók ki a tovább- fejlesztésekhez az autók biztonságosabb kialakításának érdekében.

2. A VIZSGÁLT ÜTKÖZÉSI HELYZET

Az 1. ábrán látható módon egy autó egy merevnek tekintett falnak ütközik, tehát a sebessége az eredeti (ütközés előtti) v értékről hirtelen 0-ra csökken. A kocsi tömegét m jelöli, az ütköző zóna rugóállandója c . Az ütközés során az autó Δs rugóutat fog megtenni.



1. ábra Az ütközési helyzet sematikus ábrázolása

A rugó összenyomódásához szükséges erő:

$$F = \Delta s / c \quad (1)$$

Feltételezve, hogy az autó ütközés előtti teljes mozgási energiáját a rugó alakváltozási munkája nyeli el, az (1) felhasználásával számítható a rugóút:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}F\Delta s \quad ; \quad \Delta s = \sqrt{cmv^2} \quad (2)$$

Kihasználva az $F = m a$ alakú Newton- törvényt, adódik az ütközéskor fellépő lassulás értéke:

$$a = \frac{v}{\sqrt{cm}} \quad (3)$$

* egyetemi docens Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

Ezt a mennyiséget fogjuk célfüggvénynek tekinteni az optimumszámítás során, a lehető legkisebb értékét keresve (minimum keresés).

Az optimális megoldás keresése során a betartandó feltétel az lesz, hogy a fellépő erő ne haladja meg a maximálisan megengedett értéket ($F < F_{\max}$). Ez lesz az implicit feltétel. A tömegre és a rugóállandóra felvéve egy tetszőleges alsó és felső értéket, adódnak az explicit feltételek. A tervezési változók a tömeg és a rugóállandó.

Ábrázolva a $c - m$ koordináta rendszerben a feltételeket, láthatóvá válik a megfeleléségi tartomány, azaz a tervezési változók azon értékei, melyek olyan pontokat írnak le a tervezési térben, amelyek kielégítik az implicit és explicit feltételeket is. Ha a célfüggvényt konstansokkal tesszük egyenlővé, az adott konstanshoz tartozó szintvonalat kapjuk meg. Keressük azt a lehető legkisebb célfüggvény értéket (azaz a lehető legkisebb konstans), mely a megfeleléségi tartományban halad, azaz még lehetséges. A Kuhn- Tucker féle optimalitási kritérium alapján ez akkor fog szélsőértéket, azaz minimumot adni, ha a célfüggvény érinti a megfeleléségi tartományt, mert ilyenkor az érintési pont lesz az utolsó megfelelő pont, ami még kielégíti a tervezési feltételeket. Ez az érintési pont tekinthető az optimumkeresési feladat megoldásának, az ehhez az esethez tartozó célfüggvény-konstans érték pedig az elérhető legkisebb célfüggvény érték.

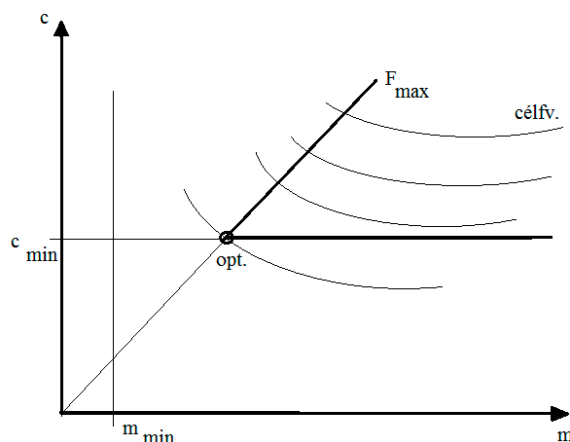
3. AZ OPTIMUMKERESÉSI FELADAT MEGOLDÁSA

A megfeleléségi tartomány és a célfüggvény szintvonalai a 2. ábrán láthatók a $c - m$ koordináta-rendszerben ábrázolva. A célfüggvény szintvonalai hiperbolák, az implicit feltétel határvonalára egy olyan egyenes, amely az origóból indul ki. A rugóállandó explicit feltételei vízszintes egyenesek, a tömeg explicit feltételei függőleges egyenesek. Az automatikusan teljesülő feltételek határvonalait már fel sem tüntettük az ábrában.

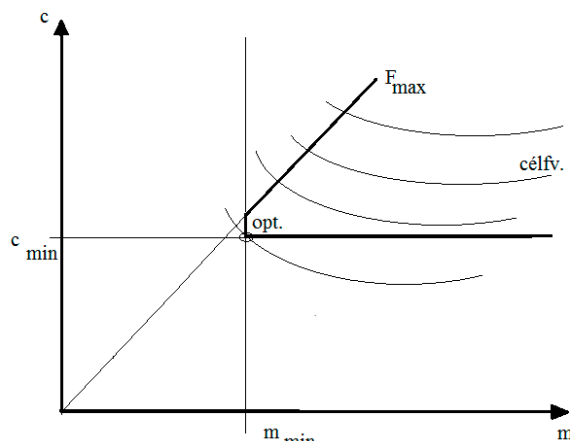
A 2. ábrán látható, hogy az optimális megoldás a megfeleléségi tartomány bal oldali csúcspontjában van, azaz a rugóállandót célszerű minél kisebbre venni, ekkor a tömegre kiadódik egy optimális érték, ami a minimálisan elérhető lassulás értékét adja.

Az $F_{\max}$, $c_{\min}$, $m_{\min}$ mennyiségek konkrét számértékei azonban lehetnek olyanok is, hogy a 2. ábrán vázolt helyzethez képest másképp alakul a célfüggvény és a megfeleléségi tartomány érintkezése, ez a helyzet látható a 3. ábrán. Ekkor mind a rugóállandót, mind pedig a tömeget a lehető legkisebb értékre kell felvenni ahhoz, hogy minimális lassulás legyen elérhető. Ennek a két értéknek a minimumát elérni fizikailag nagyon nehéz és kockázatos lehet, (túl erős rugó kis rugóutat eredményezhet, azaz egyre durvában ütés- szerűvé válik az ütközés, a tömeget pedig mindig csökkenteni

igyekeznek, tehát a minimum egyre lejjebb szorítható). Annak eldöntése, hogy a valóságos esetben melyik helyzet érvényesül, csak a konkrét számértékek ismeretében lehetséges, tehát szükségessé válik egy konkrét számpélda vizsgálata.



2. ábra Az optimálási probléma grafikus ábrázolása

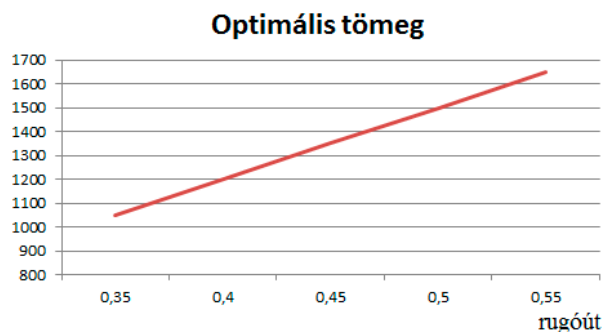


3. ábra Az optimális megoldást adó helyzet másik lehetséges állapota

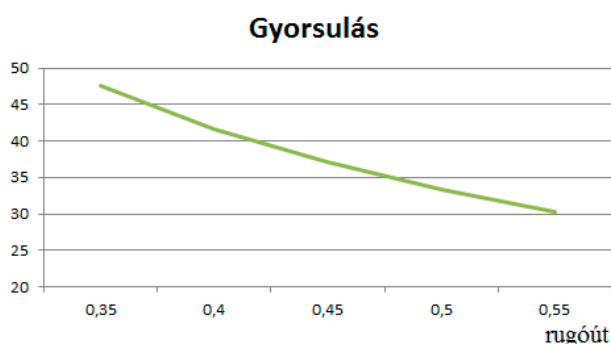
A számpéldához a következő számértékeket vesszük fel: az autó minimális tömege 1000 kg, sebesség 10 m/s, az autóra ható erő megengedett maximális értéke (a benne ülő személy életben maradásához): 50 000 N, az ütköző zóna rugóállandója (kb 40 cm benyomódást feltételezve [6]): 0.048 mm/N. Ekkor az optimális tömegre 1200 kg adódik. A lassulás értéke 41.667 m/s². Ez a 2. ábrának megfelelő helyzetet jelenti. Tehát egy adott rugóállandóhoz található egy optimális tömeg, amely esetén az ütközéskor fellépő lassulás értéke minimális lesz.

Vizsgálható az optimális megoldás érzékenysége például a rugóút függvényében. Ez a vizsgálat azt mutatja meg, hogy az optimális megoldás eredménye mennyire érzékenyen reagál a vizsgált mennyiség (rugóút) megváltoztatására, valamint láthatóvá válik az optimális megoldás környezete is, érzékelhetővé válik, hogy mennyire globális az optimum. A tömeg minimális

értékére a 4. ábra, az elérhető gyorsulás értékére pedig az 5. ábra mutatja az érzékenységet. A tömeg értékeit [kg] mértékegységben, a gyorsulást pedig [m/s²] mértékegységben kell érteni.



4. ábra A tömeg optimalis értékének érzékenysége a rugóút változtatására



5. ábra A gyorsulás elérhető minimális értékének érzékenysége a rugóút változtatására

Az érzékenységi diagramokból az látszik, hogy az optimum inkább feltétel- vezérelt, nem szélsőérték-szerű, főleg a tömeget illetően és elég erősen érzékeny a változásokra. A gyorsulás (azaz a célfüggvény) ábrájában azonban már kis mértékben látszik az elméletileg lehetséges szélsőérték, az elérhető globális minimum, de ez olyan értékek környezetében van, ami irreális lenne az autógyártás szempontjából, ez indokolja a feltételek dominanciáját az optimum értékében.

4. KÉT AUTÓ FRONTÁLIS ÜTKÖZÉSE

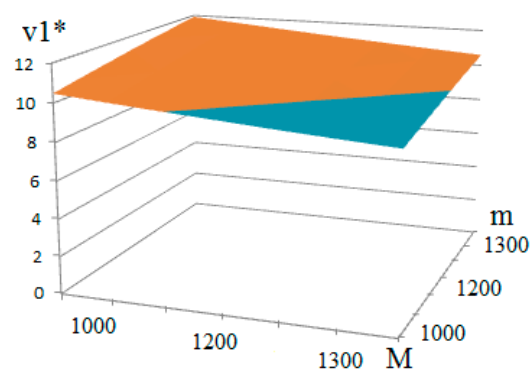
Az itt bemutatott eredmények alkalmazhatók lehetnek két autó frontális ütközésének vizsgálatára is, így mindkét autóra megadhatók azok az összetartozó rugóállandó és tömeg értékek, melyek minimális ütközéskor fellépő gyorsulást eredményeznek. A két frontálisan ütköző autó felfogható úgy, hogy mindkét autó merev falnak ütközik, tehát maga az ütközési helyzete mindkét autónak azonos. Azt azonban figyelembe kell venni, hogy a nagyobb tömegű, nagyobb sebességű autó nemcsak teljesen megállítja a kisebb tömeggel (m), kisebb sebességgel rendelkező autót, hanem tovább tolja azt egy bizonyos sebességgel, tehát a

sebesség változása a két autónak más lesz, a nagyobb tömegű (M) és sebességű (v₁) autónak kisebb lesz a sebességváltozása, mint amilyen sebességgel érkeznek az ütközésbe, a másiknak pedig nagyobb, mint amilyen az ütközés előtti sebessége (v₂) volt. Tehát a két autó optimalis m és c értékét különböző v sebességváltozási értékekhez tartozóan kellene kiszámítani, amennyiben optimalizálni szeretnénk őket a 2. fejezetben leírt grafoanalitikus módszer alkalmazásával. Az autók ütközési sebesség- változása kiszámítható [7]:

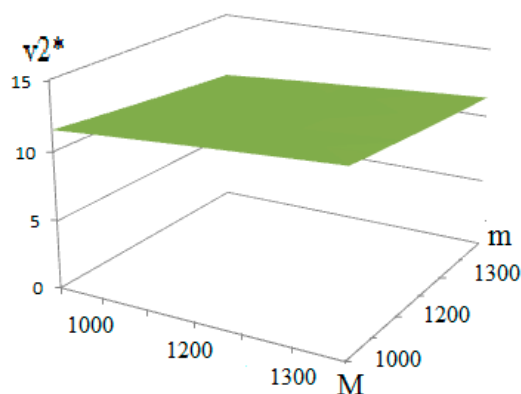
$$v_1^* = \frac{m(v_1 + v_2)}{m + M} \quad (4)$$

$$v_2^* = \frac{M(v_1 + v_2)}{m + M} \quad (5)$$

Értelemszerűen v₁^{*} a nagyobb tömegű autó sebességváltozása, v₂^{*} pedig a kisebb tömegűé. Azt is meg kell említeni, hogy az ütközés ereje a hatás-ellenhatás törvénye miatt mindkét autóra hat, ezért a nagyobb tömegű autónak kisebb lesz a lassulása, mint a kisebb tömegűnek. A fellépő gyorsulások aránya a tömegek arányával fordítottan egyezik meg, tehát a kétszer nagyobb tömegű autónak feleannyi lesz a lassulása. A (4) és (5) egyenletekben szereplő sebességeket m és M függvényében ábrázoltuk, v₁ = 12 és v₂ = 10 m/s esetére, a 6. és 7. ábrán.



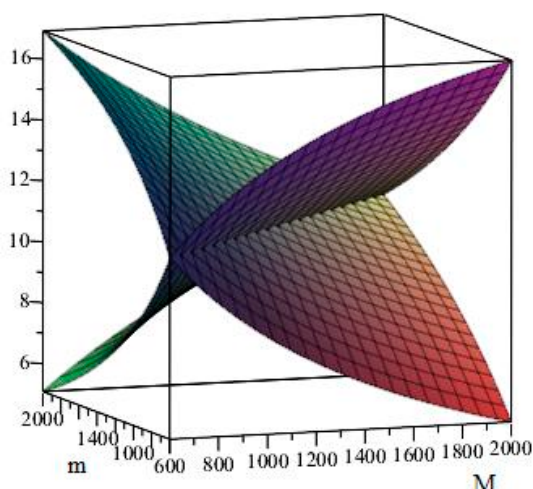
6. ábra Az ütközés utáni v₁^{*} sebesség ábrázolása



7. ábra Az ütközés utáni v₂^{*} sebesség ábrázolása
növekedésével csökken és M növekedésével növekszik.

A két ábrázolt közel sík felület áthatása egy egyenes lenne, aminek mentén mindkét autónak ugyanannyi az ütközés utáni sebessége, ami $m = M$ esetén adódik.

A két felület és a metszetük a 8. ábrán látható, egy közös koordináta-rendszerben ábrázolva.



8. ábra Az ütközés utáni sebességek ábrázolása, egy közös koordináta-rendszerben

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen cikkben autóütközési helyzeteket vizsgálunk, optimumkeresési céllal. Az ebből a vizsgálatból adódó eredmények szempontokat adhatnak olyan autóipari fejlesztésekhez, melyek célja az utasok minél nagyobb biztonsága, ütközési helyzetekben is.

Az első vizsgálat során egy autó ütközését vizsgáltuk merev falba, adott sebesség esetére. Az autó tömegét és az ütköző zóna rugóállandóját tekintettük tervezési változóknak, a célfüggvény pedig az ütközéskor elért lassulás értéke, melynek minimumát kerestük. Az optimumkeresési feladatot a Kuhn- Tucker optimalitási kritériumra alapuló grafo-analitikus módszerrel oldottuk meg. Egy számpéldára végigszámolva a módszert, egy ütközési helyzet optimális megoldása is bemutatásra került. Az elért eredmények kisebb módosítások mellett alkalmazhatók két autó frontális ütközésének optimalizálása során is, de az autók tömeg- és sebességi viszonyainak figyelembe vétele azt teszi majd szükségessé, hogy a két autót más- más értékű ütközési sebességváltozás esetére kell optimalálni.

6. SUMMARY

In this paper two situations of car collision situations are investigated in order to find an optimum solution. Results of these investigations can be useful during developments and innovations in car industry, searching for better and safer form of cars and try to assure higher safety for the passengers even in case of collision accident situations.

During the first study the collision of a car to a rigid wall is investigated, in order to minimize the acceleration during the collision. The velocity was constant, the design variables were the mass of the car and the spring rigidity of the collision zone of the car. The optimization problem was solved by using a grapho-analytical optimization method based on the Kuhn- Tucker optimality criterion. Optimum solution numerical results are shown for a numerical sample problem. In case of minor modifications, the results obtained here can be applied for the situation of the frontal collision of two cars, too, but during this study it would be necessary to take into consideration the differences of mass and velocity of the cars, therefore different collision velocity will be valid for each car.

7. IRODALOM

- [1] SZABÓ, F.J.: *Optimization of Springs Applied in Vehicle Suspension Structures*. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2018. pp. 585-596, 12 p, DOI 10.1007/978-3-319-75677-6-51 .
- [2] SZABÓ, F. J.: *Optimization of key joints*. Multidisciplinális Tudományok; a Miskolci Egyetem közleményei, 13 (2), pp 159-162, 10 p , (2023). DOI 10.35925/j.multi.2023.2.14 .
- [3] SZABÓ, F. J.: *Grafo- analitikus optimalálás 3D- ben*. GÉP, 75 (3-4), pp. 101-104, 4p, 2024..... DOI 10.7050/GEP.2024.3-4.22 .
- [4] SZABÓ, F. J.: Optimization of gear drive in function of geometrical parameters. In: Merlet, J.; Dahan, M. (editors): *Proceedings of the Twelfth World Congress in Mechanism and Machine Science*, IFToMM 2007. p. CD.
- [5] SZABÓ, F. J., SZTANKÓ B.: *Tengely csapágyazás optimalálása tömegminimumra, a Kuhn- Tucker optimalitási kritérium módszerrel*. GÉP, 70 (3), pp. 66-69. 4 p. 2019.
- [6] Közlekedésbiztonság, előadásvázlat, https://www.nye.hu/ktit/sites/www.nye.hu/ktit/files/dokumentumok/E_segedletek/Kozlekbizt/K%C3%B6zbiztons%C3%A1g_2016a.pdf, legutóbbi megtekintés : 2025. április 24.
- [7] TASNÁDI P.; JUHÁSZ A.; HORVÁTH G.: *Fizika körülöttünk*. Műzsák Kiadó, Budapest, 1994.

EVOLVENS SZÁRMAZTATÁSA KÜLÖNBÖZŐ MÓDSZEREKKEL

CONSTRUCTION OF THE INVOLUTE BY DIFFERENT METHODS

Dr. Bihari Zoltán*, Szabó Sándor Imre**

ABSTRACT

Gears have long been considered one of the fundamental components in mechanical engineering. In the past, there was generally no need for precise tooth geometry in everyday practice, as the manufacturing technologies used did not require it. In addition, mechanical drawing rules also contain provisions for the simplified representation of gears.

However, in today's world, where machining is carried out using CAD/CAM systems and additive manufacturing technologies are becoming increasingly prevalent, the precise design of tooth profiles is becoming increasingly necessary.

1. BEVEZETÉS

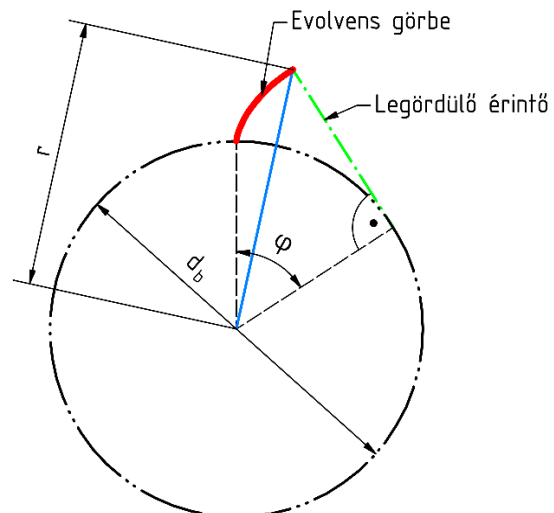
A fogaskerek hosszú idő óta az egyik alapvető építőelemnek tekinthetők a gépiparban. A korábbi évtizedek során a mindennapi gyakorlatban általában nem volt szükség a pontos foggeometria kiszámítására, mivel az alkalmazott gyártástechnológiák ezt nem tették szükségessé. Ezenkívül a géprajzi szabályok is megfogalmazzák a fogaskerek egyszerűsített ábrázolására vonatkozó megállapításokat [3].

Azonban a mai kor szellemében, amikor már a forgácsolás CAD/CAM rendszerek felhasználásával történik, egyre inkább teret nyernek az additív gyártástechnológiák. A végeselemes szimulációk végzéséhez már egyre inkább szükségessé válik a pontos foggörbe kiszámítása.

A fogaskerek fogprofiljának elkészítése több különböző matematikai görbe felhasználásával lehetséges. Ezek közül a gyakorlatban a körevolvens alkalmazása terjedt el széles körben [1], [2].

2. AZ EVOLVENS SZÁRMAZTATÁSA, MATEMATIKAI LEÍRÁSA

A körevolvens görbe definíciója szerint egy olyan görbe, amit egy olyan egyenes pontjai írnak le, amely egy körön csúszás nélkül legördül [1], ahogy azt az 1. ábra mutatja.



1. ábra Az evolvens származtatása

Az 1. ábrán szereplő d_b átmérőjű kör a fogaskerek esetén az alapkör elnevezést kapta. Ez nem része a valós geometriának, a fogprofil evolvens görbe származtatásához szükséges, átmérőjének kiszámítása a következőképpen lehetséges [4]:

$$d_b = m \cdot z \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

ahol:

- m : a fogaskerék modulja
- z : a fogaskerék fogszáma
- α : a kapcsolószög

Ez azt a kört jelenti, amin le fog gördülni az érintő egyenes, amelynek egy pontja létrehozza az evolvenst. A továbbiakban önkényesen felvett adatok alapján legyen adott egy elemi fogazat. Esetünkben a modul legyen 5 mm, a fogsám 25, a kapcsolószög pedig 20° lesz. Ebben a tanulmányban az ezekből az adatokból generált fogaskerekre vonatkozóan fogjuk a geometriai vizsgálatokat elvégezni. Ha ezeket az értékeket behelyettesítjük az 1. összefüggésbe, az alapkör átmérője:

$$d_b \approx 117,462 \text{ mm} \quad (2)$$

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

** PhD hallgató, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

Az 1. ábrán jelölt „r”, az alapkör középpontját az evolvens görbe aktuális pontjával összekötő vezérsugár [5]. A „ φ ” az a szög, ami leírja a legördülő érintőre merőleges sugár helyzetét.

Az evolvens görbe matematikai leírása Descartes-féle derékszögű koordináta-rendszerben a következő egyenletrendszer formájában adható meg a φ függvényében. [5]:

$$\begin{aligned} x &= \frac{d_b}{2} \cdot (\sin \varphi - \hat{\varphi} \cdot \cos \varphi) \\ y &= \frac{d_b}{2} \cdot (\cos \varphi + \hat{\varphi} \cdot \sin \varphi) \end{aligned} \quad (3)$$

A $\hat{\varphi}$ az összefüggésekben a φ radiánban vett értéke.

A későbbiek során szükséges lesz az „r” vezérsugár ismerete a φ függvényében, ehhez felhasználható az alábbi összefüggés [5]:

$$\hat{\varphi} = \sqrt{\left(\frac{r}{d_b/2}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

Majd a 4. összefüggést rendezve r-re:

$$r = \pm \frac{d_b}{2} \sqrt{\hat{\varphi} + 1} \rightarrow \frac{d_b}{2} \sqrt{\hat{\varphi} + 1} \quad (5)$$

A továbbiakban a geometria pontosságára vonatkozó geometriai elemzést a korábban önkényesen felvett adatokkal fogjuk elvégezni. Célunk annak megállapítása, hogy a CAD rendszerek milyen pontossággal közelítik a valós fogprofil evolvens görbét. Amennyiben a közelítés elfogadhatóan pontos, a modellt a későbbiek során alkalmasnak tekinthető más vizsgálatok elvégzésére is.

3. EVOLVENS ELŐÁLLÍTÁSA CAD SZOFTVEREKSEL

A CAD szoftverekben jellemzően nincs közvetlen utasítás evolvens görbe létrehozására. Régebben az volt az elfogadott eljárás, hogy pontokra illesztett spline görbékkel közelítették az evolvenst és más hasonló összetett görbéket. Viszont ez a módszer hordozott magában potenciális hibákat, mivel csak egy közelítőgörbe volt, és sok esetben a spline pontos típusa sem volt ismert. A legtöbb CAD szoftver az interpoláló B-spline görbét preferálta [6], [7].

Az ezen az úton létrehozott görbékkel kapcsolatban további problémát jelentett, hogy nem lehetett így parametrikus-asszociatív görbéket létrehozni. Minden esetleges módosítás miatt előlről kellett kezdeni a görbék létrehozását, ami nagyon időigényes volt [8], [9].

A mai modern rendszerekben azonban már van lehetőség egyenletekkel definiálni a görbéket. A korábban ismertetett egyenletek (3.) felhasználásával egyszerűen képezhető evolvens.

A következőkben az Autodesk Inventor kereskedelmi CAD rendszer segítségével bemutatásra kerül egy körevolvens létrehozása. (Megj: Más CAD programrendszerben is található matematikai formulával megadható görbe, ez nem csak az Inventor privilégiuma.)

4. EVOLVENS GÖRBE LÉTREHOZÁSA AUTODESK INVENTOR RENDSZERREL

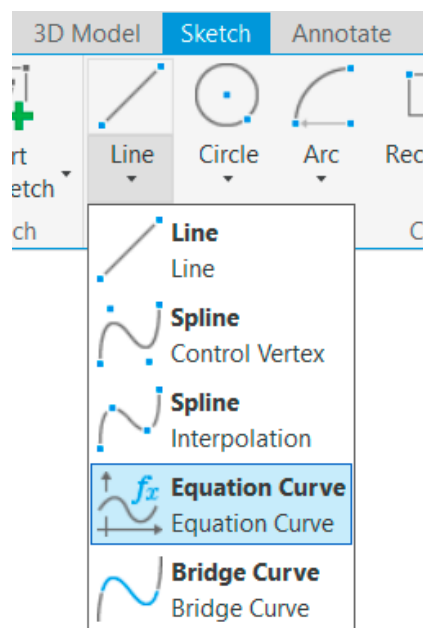
Egy új Part fájl létrehozása után meg kell nyitni a paramétertáblát, és beírni a szükséges értékeket, figyelve a megfelelő mértékegységekre [2. ábra].

Parameter Name	Consumed	Unit/Type	Equation	Nominal Value
Model Parameters				
User Parameters				
module	D_b	mm	5 mm	5,000000
alpha	D_b	deg	20 deg	20,000000
z	D_b	ul	25 ul	25,000000
D_b		mm	module * z * cos(alpha)	117,461578

2. ábra A paramétertábla az evolvens létrehozásához

Ezzel az Inventor ki tudja számolni az alapkört a korábbiakban ismertetett módon, amely az evolvenshez lesz szükséges. Javasolt létrehozni egy vázlatot a *Start 2D Sketch* paranccsal. Majd a sketchben meg kell rajzolni egy kört, aminek az átmérője a „d_b” lesz.

Ezt követően a *Sketch* fülön található *EquationCurve* parancsra lesz szükség, ezzel hozható létre a görbe matematikai képlet betáplálásával. A parancs elérését a 3. ábra mutatja.

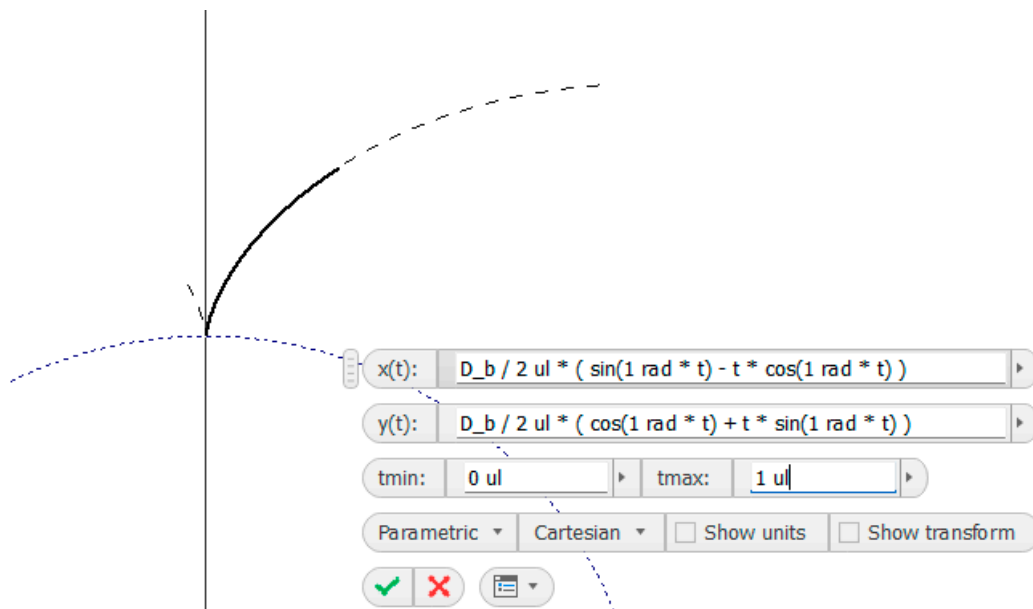


3. ábra Az EquationCurve parancs ikonja

A betáplált értékek és a görbe előnézete látható a 4. ábrán. Fontos megjegyezni, hogy amit a korábban leírt képleteknél „ φ ” változóval jelöltünk, az a szoftverben „t”-vel adtuk meg. (Megjegyzés: Az Inventor program nem támogatja a görög karaktereket.) Ezt a szöveget radiánban kell érteni, és úgy kell módosítani a képleteket, hogy

radiánnal számoljon, mert az alapértelmezett mértékegység a szoftverben a fok. Esetünkben az evolvens 0 és 1 radián között került generálásra.

Bezárva a párbeszédpanelt létrejön az evolvens, ami a paramétertáblában lévő értékek módosításával azonnal változik, asszociatív módon.



4. ábra A betáplált értékek és a görbe előnézete

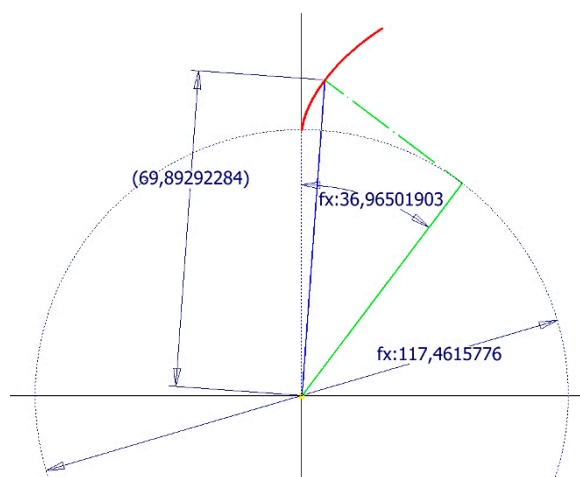
5. AZ EVOLVENS GÖRBE PONTOSSÁGÁNAK ELLENŐRZÉSE

A cél a lehető legpontosabb evolvens létrehozása, mivel a későbbiekben 3D nyomtatott fogaskerekek geometriai vizsgálatát szeretnénk elvégezni. Fontos szempont lesz az, hogy a fogaskerekek geometriai pontosságát számottevően ne befolyásolja a CAD modell. Tehát ez szükségessé teszi a szoftverrel előállított evolvens pontosságának geometriai ellenőrzését, illetve meghatározását.

A vizsgálat módszere egy ideális elméleti evolvenssel történő összehasonlítás lesz. Ehhez szükség lesz evolvens pontokat felvenni. Esetünkben ez összesen 32, egymástól egyenlő távolságra felvett értéket jelentett a 0 és 1 radián közötti intervallumon. Ezeket a radiánban vett szögeértékeket be kell helyettesíteni az 5. képletbe a „ φ ” helyére, és így megkapjuk minden szöghöz a hozzá tartozó vezérsugar hosszt. Ha a „ φ ” szélső helyzetét tekintjük, azaz éppen zérust helyettesítünk be, akkor az alapkör $d_b/2$ sugarat fogjuk megkapni, ami triviális megoldás. Ezen az értéken felül további 31 pont került meghatározásra a tartományon.

A vizsgálat elvégzéséhez az Inventorban az alábbi 5. ábra szerinti vázlatban mértük meg az egyes „ φ ” szögekhez tartozó vezérsugar hosszát. A folyamat során nagy pontossággal, 8 tizedesjeggyel vettük ki az adatokat a szoftverből.

A kiszámított elméleti evolvens pontokhoz tartozó vezérsugarat (r_{th}) és a CAD szoftverrel egyenlettel előállított görbe mérés által meghatározott vezérsugarait (r_{eq}) az 1. táblázat mutatja. A táblázat összesíti az értékek közötti eltéréseket, ami a CAD-ben előállított görbe hibájának tekinthető.



5. ábra Az evolvens mérés menete

Bizonyos CAD rendszerekben megtalálható egy beépülő alkalmazás, amely mérnöki számításokat követően képes az adott méretezett gépelemeket 3D formában automatikusan megjeleníteni. Ennek a modulnak a fantázianeve például a Solid Edge tervező

rendszerben az ún. *Engineering Handbook*. Ezzel a modullal tervezhető többek között tengely, csiga-csigakerék kapcsolat, kúpkerekpár vagy homlokkerekes hajtás. Utóbbi esetben generáltuk a korábbi paraméterekkel a fogaskerék 3D modelljét. Az így létrejött fogalak evolvens görbáját is bevontuk a vizsgálatok közé. Az elemzés célja szintén a fogprofil

geometriai pontosságának ellenőrzése volt. Az 1. táblázatban ezeket az eredményeket is megjelenítettük (r_{3D}). Jól látható, hogy az elméleti úton számított vezérsugarhoz képest lényegesen nagyobb eltérések tapasztalhatóak.

1. táblázat Az elméleti és az előállított evolvens pontok összehasonlítása

Lépés	φ [rad]	Elméleti vezérsugár	Engineering Handbook esetén		Egyenlettel előállított görbe esetén	
		r_{th} [mm]	r_{3D} [mm]	$r_{th} - r_{3D}$ [mm]	r_{eq} [mm]	$r_{th} - r_{eq}$ [mm]
0	0/31	58,73078880	58,7307888	0,00000000	58,73078880	0,00000000
1	1/31	58,76133798	58,7613168	0,00002118	58,76133798	0,00000000
2	2/31	58,85289036	58,8528793	0,00001106	58,85289036	0,00000000
3	3/31	59,00516200	59,0053822	-0,00022020	59,00516200	0,00000000
4	4/31	59,21768450	59,2182163	-0,00053180	59,21768450	0,00000000
5	5/31	59,48981213	59,4898010	0,00001113	59,48981213	0,00000000
6	6/31	59,82073146	59,8188161	0,00191536	59,82073146	0,00000000
7	7/31	60,20947313	60,2047381	0,00473503	60,20947312	0,00000001
8	8/31	60,65492536	60,6477384	0,00718696	60,65492536	0,00000000
9	9/31	61,15584897	61,1470777	0,00877127	61,15584897	0,00000000
10	10/31	61,71089313	61,7012369	0,00965623	61,71089313	0,00000000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Terjedelmi korlátok miatt ebben a tanulmányban az elvégzett mérések táblázatának csak egy részlete látható, a 10-es számú mérési ponttal bezárólag. Esetünkben ez elégséges is, hiszen ezen felül már az evolvens elhagyja a fejkört, így ott a fogalak geometriája invariáns.

6. ÖSSZEGZÉS

Az eredmények egyértelműen mutatják, hogy az egyenlettel előállított evolvens görbe esetén a hiba több nagyságrenddel kisebb, mint a Solid Edge *Engineering Handbook* moduljában készült 3D modell esetén. Az egyenlettel leképezett evolvens 10^{-11} m nagyságrendig pontosnak tekinthető, ami a kívánt jövőbeli alkalmazást figyelembe véve maximálisan elfogadhatónak mondható. Az *Engineering Handbook* modult az additív prototípusgyártás esetén, annak pontatlansága miatt nem javasolt használni.

7. IRODALOM

- [1] DR. VÖRÖS I.: *Gépelemek III. Fogaskerekek*, 4. kiadás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
- [2] PATTANTYÚS Á. G.: *Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve 3. kötet*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1961.
- [3] TÓTH L. – ZAHOLA T.: *Géprajz*, Főiskolai kiadó, Dunaújváros, 2005.
- [4] DIÓSZEGI GY.: *Gépszerkezetek Példatár*, 3. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1996.
- [5] PATTANTYÚS Á. G.: *Gépész- és Villamosmérnökök Kézikönyve 1. kötet*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1959.
- [6] KORMÁNYOS A.: *Interpoláció és extrapoláció polinommal*, ELTE Fizikai Intézet, 2018.
- [7] BOZSIK J.: *Spline interpoláció*, ELTE Informatikai Kar, 2009.
- [8] J. DUHOVNIK – I. DEMŠAR – P. DREŠAR: *Space Modeling with Solid Works and NX*, Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
- [9] I. STROUD – H. NAGY: *Solid Modelling and CAD Systems*, Springer-Verlag, London, Limited, 2011.

NAPELEMEK VISELKEDÉSE KÜLÖNBÖZŐ SZÉLVISZONYOK (HŰTÉSI HATÁS) MELLETT

BEHAVIOR OF SOLAR PANELS UNDER DIFFERENT WIND CONDITIONS (COOLING EFFECT)

Szalánczi Dávid*, Dr. Bencs Péter**

ABSTRACT

This study investigates the thermal and efficiency behavior of three photovoltaic technologies—conventional silicon, PERC, and PERC + UV film—under varying ventilation conditions using a MATLAB/Simulink-based simulation model. Simulations were conducted under representative summer irradiance and ambient temperature for three wind scenarios (calm, 3 m/s, and 5 m/s). Results indicate that increased ventilation significantly lowers internal panel temperature and reduces efficiency losses, with PERC + UV film consistently delivering the most stable and efficient performance. These findings underscore the importance of ventilation and appropriate technology selection in minimizing thermal performance losses under summer conditions.

1. BEVEZETÉS

A napelemes rendszerek teljesítményét nyáron a magas besugárzás és hőmérséklet miatti túlmelegedés rontja. A légmozgás természetes hűtőhatása kulcsszerepet játszik a hőmérséklet mérséklésében, de hatékonysága a telepítési körülményektől függ: zárt tetőkön korlátozott, míg állványos rendszerek esetén jóval hatékonyabb. Azonos külső feltételek mellett így eltérő belső hőmérséklet és hatásfok alakulhat ki. Bár több tanulmány vizsgálta a hűtési megoldásokat és a technológiák viselkedését, kevés foglalkozik a hagyományos szilícium, PERC és PERC + UV fóliás technológiák összehasonlításával különböző természetes szellőzési viszonyok között. Jelen tanulmány célja e hiány pótlása: a három technológia szimulációs vizsgálata nyári környezetben, háromféle szellőzési szint mellett, annak feltárására, hogyan befolyásolja a természetes hűtés a hőmérsékletet és a teljesítményt.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A napelemek hatásfoka jelentősen csökken a panelhőmérséklet emelkedésével. A hőmérsékleti együtthatók alapján 1 °C növekedés 0,4–0,5%-os hatásfokvesztést okozhat, különösen hagyományos szilíciumtechnológia esetén (Skoplaki & Palyvos, 2009). A túlmelegedés nemcsak a pillanatnyi teljesítményt

rontja, hanem felgyorsítja az anyagfáradást és a degradációt is [1].

A természetes hűtés – például a szélmozgás okozta konvekció – bizonyos körülmények között akár 5–15 °C-kal is csökkentheti a panel hőmérsékletét, különösen jól szellőző elrendezésben (Fouad et al., 2017). Ugyanakkor zárt tetőszerkezeteknél ez a hatás korlátozott, míg szabadon álló vagy állványos rendszerek esetén hatékonyabb lehet [2].

Korábbi vizsgálatok kimutatták, hogy a PERC technológiájú modulok alacsonyabb üzemi hőmérsékletet és nagyobb energiatermelést eredményeznek, mint a hagyományos Al-BSF típusú panelek [3]. Ennek ellenére ritkák azok a szimulációs tanulmányok, amelyek több napelem-technológiát hasonlítanak össze különböző természetes szellőzési viszonyok között. Különösen kevés kutatás vizsgálja a hőmérséklet- és hatásfokváltozást a szellőzés fokozatossága (szélcsend – gyenge – erős légmozgás) függvényében.

E tanulmány e hiányt pótolja: Miskolcra jellemző nyári környezetben, három technológia és több szellőzési szint szimulációs elemzésével mutatja be a hűtés hatását.

3. VIZSGÁLT TECHNOLÓGIÁK ÉS SZIMULÁCIÓS KÖRÜLMÉNYEK

A vizsgálat során három széles körben alkalmazott napelem-technológiát modelleztünk, amelyek lakossági és ipari rendszerekben is elterjedtek:

• Hagományos szilícium (Al-BSF):

Egyszerű felépítésű, a cellák hátoldalán összefüggő alumíniumréteggel, amely korlátozza a hőelvezetést. Magas hőérzékenysége miatt különösen kitett a túlmelegedésnek.

• PERC (Passivated Emitter and Rear Cell):

A hagyományos technológia továbbfejlesztett változata, ahol a hátoldali dielektromos rétegek javítják a fénycsapdázást és csökkentik a hőterhelést, ezáltal kedvezőbb hőmérsékleti és hatásfok-jellemzőket biztosítanak.

• PERC + UV fólia:

A PERC technológia UV-reflektáló fóliával egészül ki, amely visszaveri a nem hasznosuló közeli infravörös

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

** Egyetemi Docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

sugárzást. Ez csökkenti a hőelnyelést, különösen gyenge szellőzésű környezetben.

3.1. Szimulációs paraméterek és körülmények

A Simulink-alapú modell Miskolc földrajzi adottságaira épült, tipikus nyári nap (júliusi) besugárzási adatokkal. A sugárzás 950–1050 W/m² között változott, a számításokhoz 1000 W/m²-t, a külső hőmérséklethez 34–35 °C-ot vettünk figyelembe, 10:00–16:00 közötti időszakban.

Négy eltérő szellőzési forgatókönyvet szimuláltunk:

Szellőzés típusa	Légmozgás (m/s)	Leírás
Szélsécsend	0 m/s	Zárt tetős környezet, természetes légáramlás nélkül
Gyenge szellőzés	1 m/s	Enyhe légmozgás városi környezetben
Jó szellőzés	3 m/s	Szabadon álló rendszer, természetes hűtéssel, mérsékelt szélmozgással
Erőteljes szellőzés	5 m/s	Nyitott, szeles terület; kedvező hőelvezetésű környezet, ahol a folyamatos légáramlás segíti a túlmelegedés csökkentését

A szimuláció célja annak vizsgálata volt, hogy az eltérő szellőzési körülmények milyen hatást gyakorolnak:

- a panelek **belső hőmérsékletének alakulására**, és
- az ebből következő **hatásfokváltozásokra**, technológiánkénti bontásban.

Megjegyzés: A hatásfokgörbék a panelek relatív teljesítményét ábrázolják, a névleges (STC) teljesítményhez viszonyítva százalékos formában.

3.2. Szimulációs modell felépítése

A szimulációs vizsgálatot Simulink-alapú dinamikus modell segítségével végeztük, amely figyelembe vette a napelemek hőmérséklet-változását és az ebből eredő hatásfokváltozást. A modell a következő fő összetevőket tartalmazta:

• Energiaegyensúlyi hőmérsékleti modell:

A panel belső hőmérséklete a napsugárzás (G), a környezeti hőmérséklet (T_a), valamint a természetes hőelvezetés (konvekció és sugárzás) alapján számítottott. Az energiaegyensúly képlete:

$$Q_{be} = G \cdot (1 - \eta_{opt}), \quad Q_{ki} = h_c \cdot A \cdot (T_p - T_a)$$

ahol h_c a konvekciós hőátadási tényező, A a panel felülete, T_p a panel hőmérséklete.

• Konvekciós hűtés szimulálása:

A szellőzési scenárióknak megfelelően módosítottuk a h_c értékét, amely a szélsébséggel arányos: $h_c = a + b \cdot v$ (jellemzően $a=5$, $b=3.5$ W/m²K)

• Hatásfok-hőmérséklet összefüggés:

A pillanatnyi hatásfokot az alábbi empirikus képlettel számítottuk:

$$\eta(T) = \eta_{STC} [1 - \beta \cdot (T_p - T_{STC})]$$

ahol β a hőmérsékleti együttható (pl. 0.004/°C), η_{STC} a névleges hatásfok, és $T_{STC}=25^\circ\text{C}$.

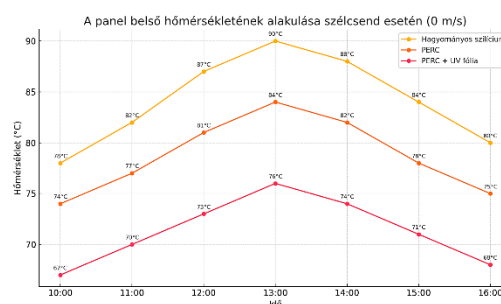
UV-fólia hatása:

A PERC + UV panelnél az abszorpciós együttható csökkentett értéket vett fel (pl. 85% helyett 75%), ami alacsonyabb hőnyelődést és így kisebb hőmérséklet-emelkedést eredményezett.

4. EREDMÉNYEK

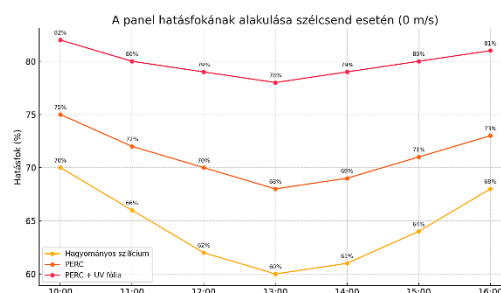
4.1. Szélsécsendes körülmények (0 m/s)

A szélsécsend – azaz természetes légmozgás nélküli állapot – különösen kritikus a napelemes rendszerek működésére nézve, mivel a hűtés hiánya jelentős mértékben fokozza a panel belső hőmérsékletét.



1. ábra: A panel belső hőmérsékletének alakulása szélsécsend esetén (0 m/s)

Az ábra szerint szélsécsendben a panelek belső hőmérséklete dél körül (12:00–14:00) jelentősen megemelkedik. A hagyományos panel eléri a 90 °C-ot, míg a PERC technológia 75–83 °C között marad. A PERC + UV fóliás panel legfeljebb 74 °C-ra melegszik, kisebb kilengéssel. Ez is alátámasztja, hogy ez a technológia hatékonyabban vezeti és sugározza el a hőt, ami előnyt jelent az élettartam és teljesítmény szempontjából.

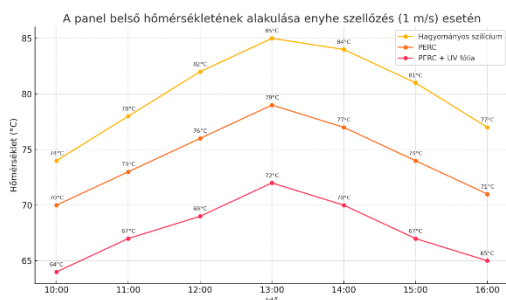


2. ábra: A panel belső hatásfokának alakulása szélsécsend esetén (0 m/s)

A hatásfokgörbék szerint a belső hőmérséklet emelkedése jelentősen rontja a teljesítményt. A hagyományos panel 60–70% között ingadozik, dél körül erős visszaeséssel. A PERC 7–8 százalékpontos csökkenést mutat, míg a PERC + UV fóliás technológia 77–81% között marad, stabil teljesítményt tartva. Az ábra alátámasztja, hogy fokozott melegedés mellett is ez a technológia nyújtja a legjobb hő- és hatásfokstabilitást.

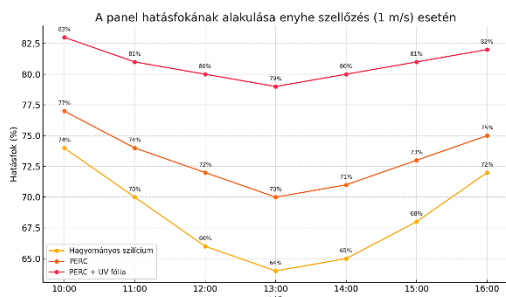
4.2. Enyhe szellőzés (1 m/s)

Az alábbi ábrák három technológia hőmérsékleti és hatásfokgörbéit mutatják be ilyen körülmények között.



3. ábra – A panel belső hőmérsékletének alakulása enyhe szellőzés (1 m/s) esetén

Enyhe légmozgás hatására minden technológiánál csökkent a belső panelhőmérséklet. A hagyományos panel még eléri a 85 °C-ot, de a kilengések mérséklődtek. A PERC 70–79 °C, míg a PERC + UV fóliás panel 64–72 °C között marad, stabilabb és kiegyensúlyozottabb hőviselkedéssel.

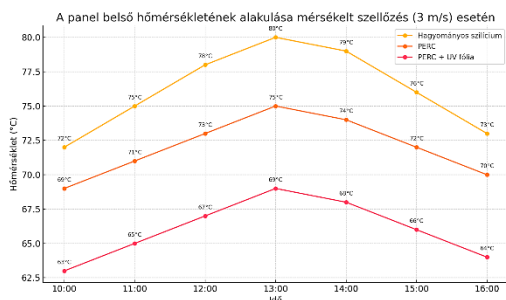


4. ábra – A panel hatásfokának alakulása enyhe szellőzés (1 m/s) esetén

A kisebb hőterhelés közvetlenül javítja a hatásfokot. Dél körül a hagyományos panel 64%-ra esik vissza, enyhe javulással szélszélhez képest. A PERC 70–77%, míg a PERC + UV fóliás technológia stabilan 79–83% között teljesít, jól kihasználva a szellőzés hűtőhatását.

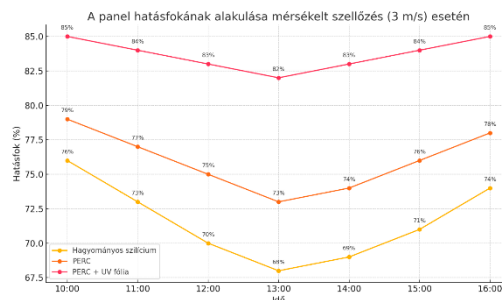
4.3. Mérsékelt szellőzés (3 m/s)

Az alábbi ábrák három technológia hőmérsékleti és hatásfokgörbéit mutatják be ilyen körülmények között.



5. ábra: A panel belső hőmérsékletének alakulása mérsékelt szellőzés esetén (3 m/s)

A hőmérsékleti görbék szerint mérsékelt szellőzés mellett is csökken a panelhőmérséklet mindhárom technológiánál. A hagyományos szilícium továbbra is melegebb, míg a PERC + UV fóliás panel stabilan a leghűvösebb marad.

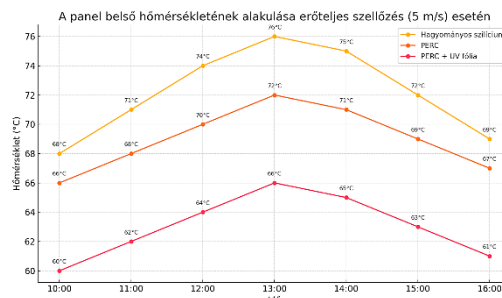


6. ábra: A panel hatásfokának alakulása mérsékelt szellőzés esetén (3 m/s)

A hatásfokgörbék szerint a nagyobb légmozgás főként a hűtési hatás révén javítja a teljesítményt. A PERC + UV fóliás panel maradt a legkiegyensúlyozottabb, magas hatásfokot tart fenn, míg a hagyományos technológia érzékenyen reagál a melegedésre.

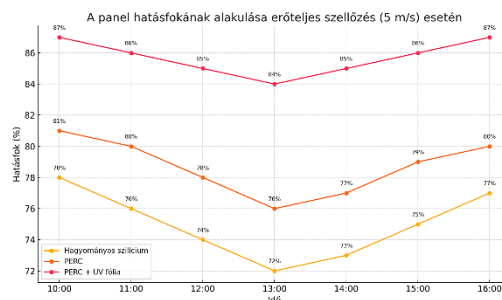
4.4. Erőteljes szellőzés (5 m/s)

Az alábbi ábrák három technológia hőmérsékleti és hatásfokgörbéit mutatják be ilyen körülmények között.



7. ábra: A panel belső hőmérsékletének alakulása erőteljes szellőzés esetén (5 m/s)

A hőmérsékleti görbe szerint a fokozott légmozgás különösen a déli órákban csökkenti a panelek belső hőmérsékletét. A PERC + UV fóliás technológia továbbra is a leghatékonyabb hűtést biztosítja.

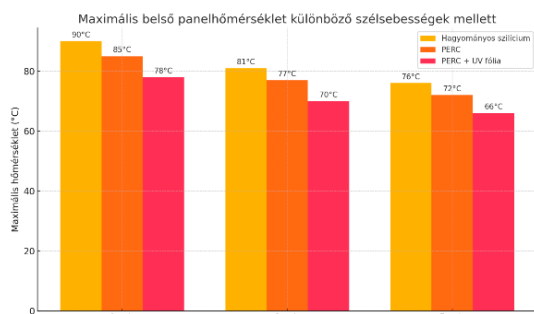


8. ábra: A panel hatásfokának alakulása erőteljes szellőzés esetén (5 m/s)

A hatásfokgörbe alapján a szellőzés minden technológiánál javítja a teljesítményt, azonban a különbségek megmaradnak: a PERC + UV fóliás panel stabilan a legmagasabb hatásfokot nyújtja.

4.5. Összehasonlító ábrák a 3 technológiáról

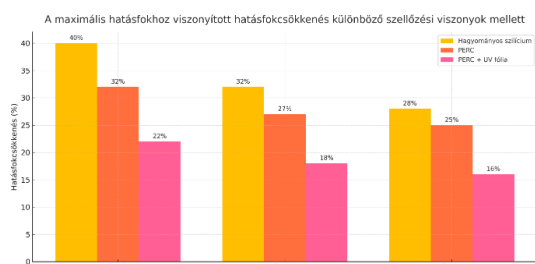
4.5.1. A maximális panelhőmérséklet alakulása különböző szellőzési viszonyok mellett



9. ábra: Maximális belső hőmérsékletek a különböző szélsebességek mellett

A diagram szemlélteti, hogy a szélsebesség növekedése minden technológiánál mérsékli a panel belső hőmérsékletét. Szélcsendben a hagyományos panel elérte a 90 °C-ot, míg a PERC + UV fóliás csak 78 °C-ot. 5 m/s-os szél esetén ezek az értékek 76 °C-ra, illetve 66 °C-ra csökkentek.

4.5.2. A maximális hatásfokhoz viszonyított hatásfokcsökkenés különböző szellőzési viszonyok mellett



10. ábra: A maximális hatásfokhoz viszonyított hatásfokcsökkenés különböző szellőzési viszonyok mellett

A második diagram a maximális hatásfokhoz viszonyított csökkenést mutatja különböző szellőzési viszonyok mellett. A PERC + UV fóliás panelek minden esetben mutatták a legkisebb hatásfokvesztést. Szélcsendben a hagyományos panelek 40%-os csökkenést mutattak, míg a PERC + UV paneleké csak 22% volt. Erőteljes szellőzésnél ezek az értékek 28%, illetve 16% körül alakultak. A két diagram egyértelműen mutatja, hogy növekvő szellőzés mellett minden technológia hűvösebben és hatékonyabban működik – a PERC + UV panel mutatta a legkisebb hatásfokvesztést minden esetben.

5. EREDMÉNYEK ÉRTELMEZÉSE ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A vizsgálat célja három napelem-technológia (hagyományos szilícium, PERC és PERC + UV fóliás) hőmérsékleti és hatásfokbeli viselkedésének elemzése volt eltérő szellőzési körülmények között, egy tipikus, 34–35 °C-os nyári miskolci napon. A szimuláció alapján az alábbi következtetések születtek:

- A szellőzés jelentősen befolyásolja a panel belső hőmérsékletét: szélcsendben 90 °C-ig, míg 5 m/s-os szél mellett 66–76 °C-ig terjedtek az értékek.
- PERC és PERC + UV technológiáknál minden szélsebesség mellett alacsonyabb hőmérséklet és magasabb hatásfok volt megfigyelhető.
- A PERC + UV fóliás panelek teljesítettek a legstabilabban: míg a hagyományos panelek hatásfoka akár 40%-kal is csökkent, ennél a technológiánál ez mindössze 16–22% volt.
- A szélsebesség és a technológia együtt döntően befolyásolja a teljesítményt – figyelembevételük elengedhetetlen a tervezés során.

Összegzőként elmondható, hogy a PERC + UV fóliás technológia biztosította a legkedvezőbb hőmérsékleti és hatásfokbeli jellemzőket, különösen meleg, szélcsendes nyári időszakokban. Az eredmények szimulációs modellen alapulnak; terepi vagy laborvalidálásuk további kutatást igényel.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13*(9), 2585–2594. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.01.005>
- [2] Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. (2017). An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77*, 331–346. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.020>
- [3] Vogt, M. R., Henning, H. S., & Blankemeyer, S. (2016). Reduced module operating temperature and increased yield of modules with PERC instead of Al-BSF solar cells. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/309756771_Reduced_Module_Operating_Temperature_and_Increase_d_Yield_of_Modules_With_PERC_Instead_of_Al-BSF_Solar_Cells

MODAL ANALÍZIS SZÉLTERHELÉSNEK KITETT FÖLDI TELEPÍTÉSŰ NAPELEMES SZERKEZETRE

MODAL ANALYSIS OF A GROUND-MOUNTED PHOTOVOLTAIC STRUCTURE UNDER WIND LOADING

Dr. Szirbik Sándor*

ABSTRACT

This paper is dealt with some issues of the finite element analysis (FEA) of ground-mounted photovoltaic (PV) structure, focusing on the entire structure where the panels under a wind load considering regional climatic data. The eigenvalue extraction used to calculate eigenfrequencies and mode shapes is based on the Lanczos iteration method. The frame and purlins were modeled as a 3D wire frame and meshed with the linear beam elements with specify C and U cross-section shapes. The PV panels were meshed with composite shell elements. The purpose of finite element analysis is to provide a starting point for studies of the forced vibrations with the results of modal analysis.

1. BEVEZETÉS

A megújuló alternatív energiaforrások közül a már meglévő energia-portfóliókba jól illeszkedő napelem rendszerek telepítése vált Magyarországon elterjedté. A háztartási kiserőműveken kívül ipari méretű, akár több száz megawatt teljesítményt jelentő napelem parkok is jelentős mértékben kiépültek. Napelem rendszer legfőbb alkotórészei az inverter, a PV panel és a panelt megfelelő pozícióba állító tartószerkezet. Az emelkedő energiahasználat miatt ipari méretű napelemes erőművek létesítéséhez szükséges a tartószerkezetgyártásnak és telepítésnek hatékony megoldása. A nagyobb erőművek létesítése során jellemzően talajra telepített, földi tartószerkezeteket alkalmaznak. A napelem tartószerkezetek kiemelt célja a hatékony, stabil és biztonságos rögzítés lehetőségének biztosítása a panelek felszereléséhez. A napelemek működése optimális lesz, ha a tartószerkezet kialakítása és elhelyezése is megfelelő. Fontos, hogy a tartóváz alkotórészei a várható igénybevételekkel szemben megfelelő merevséget mutassanak és korróziómentes kivitelben készüljenek, így időjárásállónak is bizonyuljanak. Szempont még a könnyű telepíthetőség és helyszíni szerelhetőség, amelyek biztosítják azt, hogy maximálni lehessen hosszú távon is a napenergia költséghatékony begyűjtését. A szerkezet telepítése előtt, már a tervezési folyamatban érdemes figyelembe venni az időjárási tényezőket is, például az esetleges hőmennyiséget, valamint a várható szélsőségeset és a jellemző szélirányt.

A tervezett napelemes rendszerek tartószerkezeteinek mechanikai ellenőrzése az olykor előre kiszámíthatatlan környezeti hatások okozta igénybevételekre csak azok becsült értékeivel elvégezhető. A talajcsavaros rögzítésű, kétlábás tartószerkezet részelemeinek kialakításához, a profil-tervezéshez figyelembe veendő terhelésekre az Eurocode szerinti szél-, illetve hőterhelések szolgálnak. A tartóvázszerkezet végeselemes modelljében ezek megadása alkalmasan választott megoszló terhelés formájában történik. A hőterhelést általában statikus terhelésként kell kezelni, de a szél terhelőhatása végeselemes megközelítés mellett folyadék dinamikai szimulációkkal is vizsgálható [1, 2].

A kétlábás tartók általában szabványos profilacélból készülnek, melyekből többet hossztartókkal összekötve kialakítható a szükséges tartóváz szerkezete, amely merevítőkkal tovább is erősíthető. A tartóvázak legkritikusabb elemei a több ponton alátámasztott hossztartók, azaz szelemenek. Ezek méreteit és olykor egyedi profilkialakítását a várható igénybevételekből adódó szilárdságtani feladatok megoldásával kell ellenőrizni. A szilárdságtani számításra, a terhelt, folytatólagosan alátámasztott tartó lehajlásának ellenőrzésére, veszélyes keresztmetszet meghatározására és azon ébredő maximális feszültségérték megállapítására használható az Axisvm [3] célszoftver, kiváltva a kézi számításokat, így lerövidítve a tervezési időt. A tartószerkezeteket alkotó szelvényeket általában statikusok ellenőrzik le az előírásoknak megfelelő terheléskombinációk mellett külön véve a kétlábás keretet és az azokat összekötő szelemeneket.

2. MODELLEZÉSI KÉRDÉSEK

A szerkezet tényleges feszültségi és alakváltozási állapotának és ezen túlmenően környezeti hatások okozta rezgések elemzésére hatékonyabb eljárásnak bizonyult a végeselemes analízis. A végeselem-módszer [4] alkalmazása lehetőséget nyújt többek közt egy méretpontos térbeli modellen végzett, a felmerülő terhelési esetekre módosítási lehetőséget kínáló, a mechanikai állapotok részletes vizsgálatára alkalmas analízisre, feltárva a konstrukció gyenge pontjait. Mód nyílik továbbá a szerkezeti kialakításon eszközölt egyéb későbbi változtatások befolyásának elemzésére, például a szerkezet állékonyságára. Ezzel összhangban érdemes

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Műszaki Mechanikai Intézet

a napelemeket és tartószerkezetüket egyben, azaz már összeszerelt állapotban vizsgálni a szimulációs feladatokban. Egyszerűség végett a napelem panelek egy közös táblában kerültek héjelemekkel történő modellezésre, melyben a napelemeket alkotó rétegeket alkalmasan választott kompozit anyagmodell írja le. Az egybeépített szerkezet modal analízisét így akár terhelt állapotban is el lehet végezni, mert a szimulációban a felületén megoszló terheléssel bíró tábla rezgés karakterisztikájában az azt jelentősen befolyásoló karcsú, vékony szelvényű rudakból álló tartószerkezet hatása is kimutatható. A szabvány szerint veendő szélterhelésből a napelem panelek felületére merőlegesen működő, felületen megoszló terhelések származnak, amelyek a rögzítési pontokon keresztül a paneleket tartó vázat is érik. A leterhelt napelemes szerkezet sajátrezgései és rezgésalakjai később egyes dinamikai vizsgálatokban felhasználhatók.

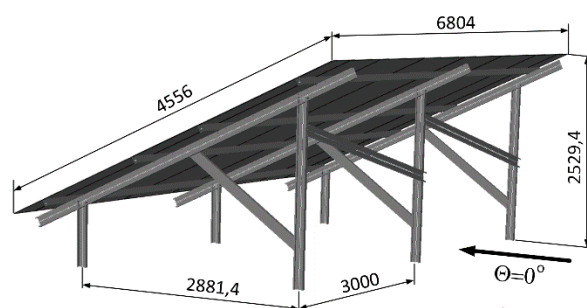
A vizsgált szerkezeti kialakítás alkotóelemeinek befoglaló méretei tipikusak, és a geometria modellezésekor az tartóváz-elemek elhelyezkedése és helyzete is ennek megtartására törekedett. Lényegében a tartószerkezetet modellező drótvázat az egyes gerendák súlyvonalai adják, így a drótvázmodell több, de nem kapcsolódó, külön álló középvonalból áll össze. A modell összeállítása így valóságközelibb lett, de szükségessé vált a drótvázmodell alkotóelemei és a napelempanelek tábláján létrehozott különálló hálók, azaz a végeleemes felbontások összekapcsolása a végeleemes modellben. A szimulációs modell megalkotása során a végeleemes hálók kapcsolódása a csavarozott szerkezet csavarkötéseinek geometriai középpontjaiban került megvalósításra.

A választott tartószerkezeti kialakítás a PV paneleknek fix, 25 fokos dőlésszöget biztosít. A tartóváz végeleemes modelljében alkalmazott hajlított-nyírt rúdelemekhez rendelt szelvények orientációja is valóságos helyzetnek megfelelő, szem előtt tartva így a szerelhetőséghez szükséges elrendezést. Tapasztalatok alapján és szoftveresen igazolhatóan, ha szükséges, lehetséges további merevítők alkalmazása a kétlábás tartókereteken, valamint a keretek összekapcsolásához, ezzel csökkentve a kihajlási hosszokat, támogatva az állékonyságot. A merevítők többféleképpen is felhelyezhetők. Célszerűnek tűnik egy bizonyos mintát követni. Az 1. ábrán látható a választott, egyébként bevett elrendezés, amely értelemszerűen merevítésekkel bír.

A tartószerkezet néhány alkotóeleme ún. profilalakító hengerléssel is készülhet egy 2 mm vastagságú acélszalagból. A folyamat során az acélszalag alakító görgők sora között halad, melyek több fázisban adnak neki alakot. Minden állomás azonban csak annyi alakítást végez, amely még nem eredményez nemkívánt deformációt az alapanyagban. A görgőalakítást mindig a gyártani kívánt profilalakhoz, illetve mérethez kell igazítani. A szerszám görgői edzett szerszámacélból készülnek, hiszen használatuk során igen jelentős koptató igénybevételeknek kitéttek. A hengerelt profil gyártási

technológiája jóval hatékonyabbnak bizonyult, mint a klasszikus élhajlítás, mert a folyamatos gyártás során gyakorlatilag az összes hajlítás egyszerre készül. A szelemeneken specifikusan további merevítést adó peremezést alakítanak ki, de ezektől itt eltekintve a szelemen profilhoz közeli U szelvény került megadásra.

A vizsgált feladat geometriai modelljében a hajlított-nyírt rúdelemekhez rendelt keresztmetszetek, azaz a keretek elemei, lábai, gerendái és a merevítők C120×45×15×2,0 profilú, míg a hossztartók, azaz szelemenek az U80×40×2,0 kialakítású hengerelt profilú acélszelvényként lettek megadva. A kétlábás tartószerkezet lábait általában a kb. 2 m mélységben földben lévő talajcsavarokhoz csatlakoznak.



1. ábra Napelemes szerkezet kialakítása jellemző befoglaló méretekkel

A talajcsavaros csatlakozás figyelembevétele a megtámasztások modellezése során a keretek lábainál előírt fix, azaz teljes megfogásokkal történt. A vázszerkezet alapanyaga, a 2 mm vastagságú acélszalag korrózióvédelmi bevonattal is rendelkezhet, amely speciális összetétele egy nagyon sűrű, stabil és tartós védőréteg kialakulását eredményezi a kezelt felületeken. Ez jelent gátat a korrózió ellen, megakadályozva azt, hogy az alatta lévő acél érintkezzen a környezettel, hatékony korrózióvédelmet adva a kültéri környezetben.

A végeleemes felbontás rúdelemeihez rendelt lineáris anyagmodellben leírt acélszalagot az $E = 2,1 \times 10^5$ MPa Young-modulus, $\nu = 0,3$ Poisson-szám és $\rho = 7,85 \times 10^{-9}$ t/mm³ sűrűség jellemzi.

A napfény segítségével létrejövő feszültség adja a napelemes panel villamosenergia termelését. A rétegekből álló napelem panel külső rétege nyújt védelmet az időjárás ellen, a belső rétegek nyerik az elektromos energiát, az alsó réteg biztosítja a mechanikai védelmet, míg egy alumínium keretezés a merevséget. A panel belső részei, kompozit anyagok felhasználásával gyártott félvezető cellák fő alkotóeleme a szilícium. A tartóvázra felszerelt PV paneleket, a szimulációs feladatokban átlagos panelméretekkel ($a = 1134$ mm, $b = 2278$ mm) bíró 12 darab PV panelt egyetlen kompozittábla modellezi, amelynél a kompozit rétegek anyagi tulajdonságai: rugalmassági modulusuk, sűrűségük és vastagságaik kerültek megadásra az anyagmodellek összeállítása során a numerikus szimulációban.

A PV paneleket a szelemenekhez általában csúszó csavarozással rögzítik, így a modell összeállításakor figyelembevételre került, hogy egy-egy PV panel 4 pontban rögzül a vázhoz. Maga a tartószerkezet is csavarokkal összeszerelt. A csavarkötésbe tett helyeknél az egyes alkotórészek végeselemes felbontásainak összekötésére az ún. MPC (Multi-Point Constraint) kapcsolatok definiáltak a teljes szerkezet végeselemes modelljében, amelyben a globális kontakt előírása is meg történt.

3. SZÉL OKOZTA TERHELÉSNEK KITETT SZERKEZET MODAL ANALÍZISE

A szélterhelés megadásával az Eurocode MSZ EN 1991-1-4 szabvány foglalkozik, amely alapján a végeselemes modellben a terheléserőterek megállapításra kerültek. A telepítési helyek meteorológiai adatai hozzáférhetőek. A napelemekkel felszerelt talajcsavaros földi telepítésű tartóvázat pedig nyitott épületnek tekintjük. A szélteher karakterisztikus értéke a

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (1)$$

képlet alapján adódik a mérsékelt szeles vidéknek vehető Magyarországon átlagos értékű $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ levegő sűrűség és a $v_b = 20 \text{ m/s}$ referencia szélesebesség értékből 250 N/m^2 nagyságúnak. A lokális tényezők által is befolyásolt

$$q_p(z) = q_b c_e(z) \quad (2)$$

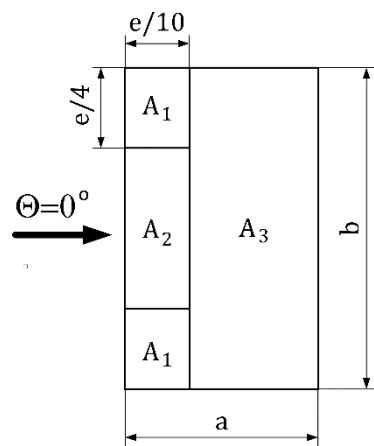
szélesebességet a különböző beépítettségi kategóriák határozzák meg a helyszíntényező diagramból kivett értékkel. Az A felület nagyságtól is függő c_{pe} külső nyomási tényezővel szorzódó szélesebesség megadja a

$$w_e = q_p(z) c_{pe} \quad (3)$$

szélnyomást. Ha a táblafelület $A \geq 10 \text{ m}^2$, akkor $c_{pe} = c_{pe,10}$, külső nyomási tényező értékei egy θ szöggel jellemzett szélirányokhoz szabványból, táblázatos formában, adott hajlásszöghöz megállapíthatók. Esetünkben az értéke $w_e = 375 \text{ N/m}^2$.

A napelem táblán különböző nyomási tényezőjű zónákat különböztetünk meg. A zónák meghatározásához szükséges $b = 6804 \text{ mm}$ itt a napelem tábla szélirányra merőleges oldalhossza, $h = 2529,4 \text{ mm}$ a szerkezet széltámadta oldal magassága, és $a = 4556 \text{ mm}$ itt a napelem tábla széliránnyal párhuzamos oldalhossza. Ezek felhasználásával képezhető egy $e = \min \{b, 2h\}$ érték, amely segítségével a 2. ábrán látható zónák különböztethetők meg az említett, ábrán is berajzolt, $\theta = 0^\circ$ szöghöz rendelt szélirány esetében. Ez igaz az ellenirányban, $\theta = 180^\circ$ szélirányból, azaz ismét merőlegesen a tábla hosszabb

oldalára, de a dőlésszög miatt alacsonyabb, szélirányba $h = 604 \text{ mm}$ magasságú szerkezetet támadó esetre.



2. ábra Zónák szélteherre $\theta = 0^\circ$ szélirányra

A napelem táblán a szélterhelés meghatározott zónákra előírt nagyságban kerül előírásra. A zónák területe, illetve elhelyezkedése a 2. ábra alapján megállapítható az adott szélirány esetében.

A külső felületre ható szélnyomásból és a különböző nyomási tényezőjű zónákból számítható az

$$F_w = c_s c_d \sum w_e A_{ref} \quad (4)$$

összegzett szélerő is, melyben $c_s c_d$ mérettényező és szélhatás dinamikus tényező szorzata adja a szerkezeti tényezőt, mely szokványos esetben egynek vehető fel, míg az A_{ref} a 2. ábrán látható A_1 , A_2 és A_3 részterületek nagyságát jelenti. Hasonló gondolatmenetet követve, de más kiosztású zónákkal a $\theta = 90^\circ$ szélirányhoz is meghatározható összetett szélerő.

A napelemes szerkezet modal analízise során sajátfrekvenciák és vonatkozó rezgések képek kerülnek meghatározásra a numerikusan pontosabb és általában hatékonyabb Lánczos-módszer kiválasztása mellett szoftveresen [5], ahol a megoldás részeként a sajátrezgések képek grafikus megjelenítésére is van lehetőség. A terhelések hatását figyelembe vevő sajátfrekvencia-számítások csak két egymást követő lépésben végezhetők el. Első lépésben kerül sor a szélerők adott zónákban, mint terhelések felvétele és a lábak teljes megfogása mellett a rugalmas alakváltozást elszenvedő szerkezet deformált alakjának meghatározására. Az első lépést az Abaqus szoftverben az Nlgeom beállítás mellett tesszük, mert a szoftverben csak így lehetséges a terhelés hatására kialakuló egyensúlyi deformált alakot adni a második szimulációs lépésben végzett lineáris perturbációnak. Az első lépésnek alárendelt második lépésben kerül sor a statikusan már felterhelt szerkezet deformációt szenvedett geometriáján a sajátértékek kinyerésére.

Amíg a hőterhelés napelem tábla felületére statikusan, talajra merőlegesen és értelemszerűen lefelé irányított

módon definiált, addig a szélterhelés a napelem tábla alapsíkjára merőlegesen, adott intenzitással az adott zónákban fejti ki hatását. Szélterhelésnél meg kell különböztetni a szélirány és a szerkezet orientációja alapján a szélnyomást és a szélszívást.

A terheletlen szerkezet esetén a sajátrezgések első sajátfrekvenciája 6 Hz-nél van és a rákövetkező 5 darab 8,9 Hz és 10 Hz közé esik. A szélterhelések közül értelemszerűen a $\Theta = 0^\circ$ szélirányhoz tartozó emeli meg a napelem táblát nagyobb mértékben, azaz alakapva a szerkezetnek a tartószerkezet lábainak megfogásaitól húzza felfele, megfeszítve azt, így csak magasabb frekvenciákon jöhet rezgésbe a szerkezet. Ez az állapot veszélyes a csúszó csavarozással rögzített panelek csavarkötéseire. A nagyobb mértékű terhelést jelentő hőteher viszont csökkenti az első sajátfrekvenciát 5,8 Hz értékre. Ez esetben a szerkezet nagyobb hajlandóságot mutat a hőteher alatti összecsuklásra, azaz a vázszerkezet karcsú lábai veszélyesek.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A terhelések megadása a regionális időjárási adatok figyelembevételével történt a napelem panelek felületére vonatkozó szélterhelés, illetve hőterhelés alapján. A deformációk és sajátrezgések vizsgálata panelokat modellező táblán és annak rögzítését biztosító tartószerkezeten egyben történt, mert a kétlábás, földi telepítésnél a tartószerkezeti kialakítás a rezgésekre a másféle megoldásoknál nagyobb mértékben mutat érzékenységet. A vizsgált vázszerkezeten ezek hatását a gyakorlati tapasztalatok alapján eleve a hossz- és keresztmerezítésekkel csökkenteni sikerül.

A tartóváz drótmódeljét alkotó hajlított-nyírt rúdelemekből álló végeleemes felbontások és a napelemeket egy táblában kezelő héjelemekre bontott felület csatlakozási pontjai a valós csavarozási helyek középpontjainak felelnek meg. A napelem paneleket tartó szelemenek és a vázszerkezet rúdjai nyitott, vékonyfalú szelvényű gerendák, amelyek csavarkötéssel szereltek.

Modal analízis az Abaqus szoftver használatával került elvégzésre a napelem tábla és a tartóváz-elemek végeleemes felbontásainak egy végeleemes modellben történő összekapcsolása után. Megállapíthatóvá vált az összeszerelt szerkezet rezgéstani karakterisztikája terheletlen állapotban, illetve környezeti terhelések mellett is. Az eredmények azt mutatják, hogy a szerkezet legsérülékenyebb részeinek szilárdságtani szempontból a hossztartók mutatkoznak, illetve a csúszó csavarkötések, ha a szelvények deformációja szélhőkések hatására jelentős lesz.

A számítások igazolták, hogy a szerkezet mozgásait befolyásoló sajátrezgések hő- és szélterhelés alatt kis mértékben, de változnak és elindíthatnak lehetséges károsodási folyamatokat. Ezek a hatások értelemszerűen okozhatják egyes csavarkötések lazulását, illetve idő előtti tönkremenetelét is. Ha a szerkezet károsodik, a csavarfejek alatt elhelyezkedő nem nagyon kiterjedt

felületű részek könnyen deformálódhatnak, amely a bemutatott szélterhelések esetében $\Theta = 0^\circ$ széliránynál jelent veszélyt.

A dolgozat a napelemes rendszerek szerkezeti tervezésének optimalizálásához, illetve szélhőkések későbbi vizsgálatához hasznos segítve a hosszú távú megbízható működést és a fenntarthatóságot.

5. SUMMARY

The current study was devoted to the modal analysis of a ground-mounted photovoltaic structure, focusing on the entire structure where the panels under a wind load considering regional climatic data. The finite element analysis can be used to predict the shape modes and natural vibrations of the entire structure including structural elements, namely, the solar panels and support structure. The modal analysis was performed not only the PV panel, as two-pile mounting structure is more susceptible to vibrations than other support solutions.

The wire frame consists of open, thin-walled beams, while the PV panels were meshed with composite shell elements. The software Abaqus was used to perform the modal analysis. The elements of the support structure and the solar panels are connected by multi-point constraints. Simulations confirm that the natural vibrations of the structure change slightly under wind load, which can trigger possible damage processes that may lead to the loosening deformation of the screws of sliding connections or even distortions of the frame prematurely. The open, thin-walled tie beams and its portions under the screw heads can be easily deformed, which poses the greatest risk in the case of wind loads in the $\Theta = 0^\circ$ direction.

Overall, the study contributes to the optimization of the structural design of solar PV systems, helping to ensure long-term reliable operation and sustainability.

6. IRODALOM

- [1] REINA G. P., DE STEFANO G.: *Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays*, Aerodyn. 170, 2017, pp. 283-293.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.002>
- [2] JUBAYER C. M., HANGAN H.: *A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 153, 2016, pp. 60-70.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.009>
- [3] AXISVM, Statikai számító és méretező szoftver <https://axisvm.hu/>
- [4] BATHE K. J.: *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.
- [5] *Abaqus 6.13 online documentation*, Dassault Systems, 2015

KÖTÉSI SZILÁRDSÁG VIZSGÁLATA POLIMER KOMPOZITOK ÉS 3D-NYOMTATOTT FÉM KÖTŐELEMENEK ESETÉN

EXAMINATION OF BOND STRENGTH IN THE CASE OF POLYMER COMPOSITES AND 3D PRINTED METAL FASTENERS

Dr. Markovits Tamás^{*}, Dr. Varga Ferenc László^{**}, Dr. Szabó Gábor^{***}, Fehér Bálint^{****}

ABSTRACT

With the spread of the use of polymer composite parts, bonding technologies are becoming increasingly important. In this research, in the case of the most used gluing technology for metal parts and composite flat plates, we investigated how the bond strength can be increased for fasteners made with 3D printing. We developed different structural changes, taking advantage of additive manufacturing because geometric designs can be created more freely. Based on the presented results, it can be seen what effect the binding advance has on the developed construction, and which constructions provide the possibility of increasing it.

1. BEVEZETÉS

A polimer kompozit alkatrészek szerkezeti elemekként való felhasználása lehetőséget nyújt nagy szilárdságú, kis tömegű alkatrészek gyártására. Ez elengedhetetlen azoknál a járműveknél, ahol az alkatrészek tömege is jelentősen befolyásolja az energiafogyasztás mértékét. Ilyen járművek például a légi közlekedésben használt pilóta nélküli légi járművek (drónok), amelyeknél a mozgatandó tömeg csökkentése növeli a mozgatható hasznos teher tömegét [2]. A polimer kompozitok gyártására többféle technológia létezik. A gyantha injektálási technológia (RTM: Resin Transfer Molding) az egyik legelterjedtebb. A polimer kompozit szerkezeteket vékony héjszerkezetként gyártják, de sok esetben más alkatrészeket is hozzájuk kell rögzíteni. A rögzítéshez különböző technológiákat alkalmaznak, attól függően, hogy úgynevezett betéteket rögzítenek-e a kompozit felületéhez, vagy az egész kompozit anyagból készül. Gyakran használnak úgynevezett „BigHead” beépíthető vagy ragasztható talpas kötőelemeket is a felületi rögzítéshez [4]. Ezek a speciális kötőelemek vagy betétek hagyományos vagy új módszerekkel, például additív gyártással, 3D nyomtatással is készülhetnek.

A hagyományos szubtraktív technológiákhoz képest az additív gyártási folyamat egy másik koncepciót valósít meg az alkatrészek gyártásában. Ezzel az eljárással olyan új geometriák hozhatók létre, amelyek a hagyományos technológiákkal nem vagy nem költséghatékonyan valósíthatók meg [1]. A 3D-nyomtatás ezen előnye több helyen is kihasználható, például speciális térbeli vagy strukturális alakzatoknál [3], amelyek segítségével még a ragasztási megoldások is továbbfejleszthetők. Ezek a szerkezetek fémek és polimerek esetében egyaránt létrehozhatók. A fém talpas kötőelemek esetén létrehozott speciális struktúrák nagyobb ragasztási szilárdságot tesznek lehetővé [5]. A nyomtatott betét speciális kialakítású ragasztott illesztéseknél is előnyös lehet. Az előny abból adódhat, hogy a betét struktúrái hozzájárulhatnak a kötés szilárdságához, emellett a 3D nyomtatott felületek létrehozásakor könnyen kialakíthatók a kompozit formát követő felületek is. Az alábbiakban bemutatott kutatás ezeknek az előnyöknek a kiaknázására irányult.

A kutatás célja az volt, hogy a ragasztási technológia esetében a betét struktúrájának megváltoztatásával növelje a 3D nyomtatott fémbetétek és a polimer kompozit anyagok közötti kötési szilárdságot.

2. VIZSGÁLATOK

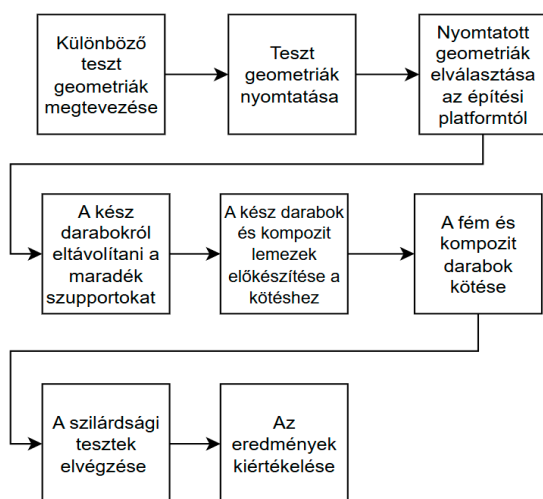
Az 1. ábrán a kutatási munka folyamatábrája látható, amely bemutatja az egymást követő főbb lépéseket. Különböző teszt geometriák megtervezése során jellemzően az alkatrész talp részének geometriája került módosításra, amely a ragasztott kötés szempontjából fontos. A teszt geometriák elemzése és értékelése során kiválasztásra kerültek azok, amelyek végül fém 3D nyomtatással elkészültek. A nyomtatás után szükséges utómunkálásokkal elkészültek a fém alkatrészek. A polimer kompozit alkatrészek és a fémalkatrészek összeragasztása és a szükséges várakozási idő után szakító vizsgálatok történtek, amelyeknek az eredményei kerültek kiértékelésre.

^{*} egyetemi docens, Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, BME

^{**} egyetemi adjunktus, Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, BME

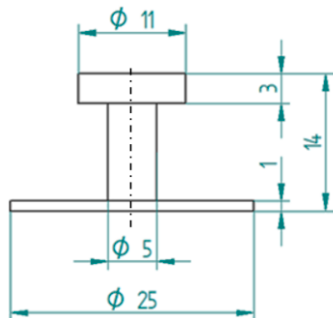
^{***} egyetemi docens, Polimertechnika Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

^{****} fejlesztőmérnök, Mould Tech Systems Kft, Fuvar utca 3, 8900, Zalaegerszeg.



1. ábra. Az elvégzett vizsgálatok lépései

A 2. ábra a talpas kötőelemek vagy más néven betétek alap geometriai méreteit mutatja. A talpas kötőelem kialakításánál cél volt, hogy a szakítóvizsgálatokhoz megfelelő befogással rendelkezzen, ezért a talpra merőleges hengeres szár egy nagyobb átmérővel rendelkező befogó geometriával végződik. A talp 25 milliméteres átmérője biztosítja a megfelelő méretű felületet a ragasztáshoz.



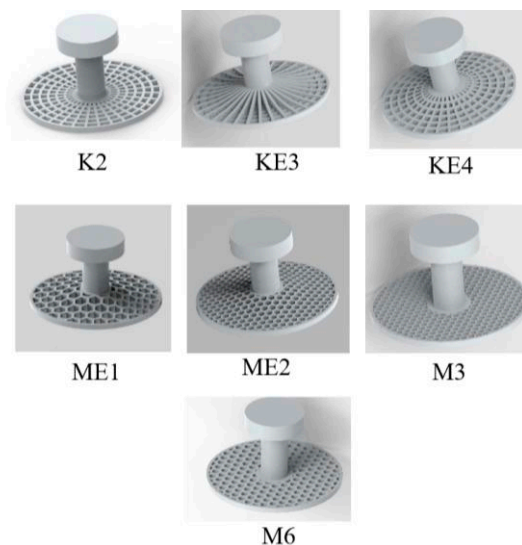
2. ábra. A talpas kötőelem alapvető geometriája

A talpas kötőelemek geometriájának tervezésekor csak a talprész kialakítását módosítottuk különböző térbeli struktúrákkal. A fém alkatrész szár részét úgy terveztük, hogy illeszkedjen a szakítóvizsgálat rögzítőrendszeréhez. Végül több mint 15 változat készült, amelyek közül a jelenlegi tanulmányban szereplő alkatrészeket a 3. ábra mutatja be. Méhsejt és koncentrikus mintázatból álló szerkezetek tervezése történt. A méhsejt és a koncentrikus minták modelljeinek több változata is elkészült. (A betétek megkülönböztetésére a következő jelölést használtuk: K: koncentrikus mintázat, M: méhsejt, E: megemelt talprész, a végén szereplő szám a verziószámot jelzi).

A fém 3D nyomtatási eljárás során szelektív lézeres olvasztás (SLM, Selective Laser Melting) eljárása került alkalmazásra, amelynél lézersugárral történik a porágyban a porszemcsék összeolvasztása, a lézeres pásztázás eredményeképpen.

A 3D nyomtatáshoz az EOS cég által forgalmazott Ti6Al4V port használtuk (EOS Titanium Ti64 9011-

0039). A szelektív lézeres olvasztáshoz EOS M100-as berendezést használtunk. A berendezés maximálisan 200 W lézerteljesítménnyel használható. Az építési rétegvastagság 20 mikrométer, a lézerfolt mérete pedig 40 mikrométer volt. A munkaterület hengeres volt, melynek átmérője 100 mm, magassága 95 mm.



3. ábra. A megtervezett különböző talp kialakítások és jelölésük

A felhasznált kompozit tulajdonságai: diszpergált fázis: 8 réteg 0/90 üvegszövet. Mátrix: AH12 (MR 3012) epoxi és MR3122 térhálósító. A kompozit lapok esetében a gyártási eljárás a gyanta injektálási technológia (RTM) volt. A kompozit lemezek 80 x 80 mm-es darabokra kerültek levágásra a szakítószilárdsági vizsgálatához. A vastagságuk 3 mm volt.

A ragasztáshoz Huntsman Araldite® 2011 ragasztót használtunk. Ez egy kétkomponensű epoxi ragasztó, amely számos anyag ragasztásához használható. Átlagos nyírószilárdságát 40 °C-on éri el, a kötési idő 16 óra. A kapott kötési szilárdság 23 °C-on 17-27 MPa között van. A teszt során a ragasztókomponensek 100:80 tömegarányban kerültek keverésre.

A Zwick Z020 szakító gép a BME Polimertechnika Tanszékén található. A gép maximális terhelése 20 kN. A kötések 24 órával a szobahőmérsékleten történő ragasztás után 10 mm/perc sebességgel kerültek elszakításra.

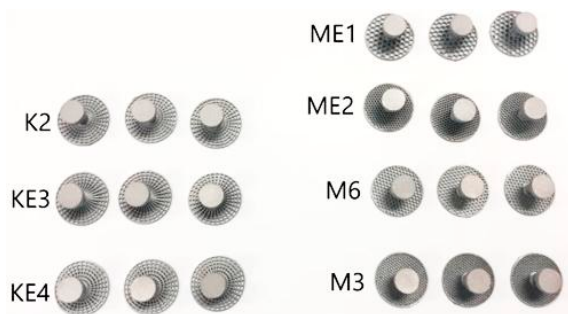
3. EREDMÉNYEK

A betétek tervezésének kiválasztása és a nyomtatás előkészítése után az alkatrészeket lézersugaras porágyas fém 3D nyomtató berendezéssel készítettük el és a kötőelemeket a 4. ábrán láthatjuk az építési platformon. A fotón megfigyelhető a kiválasztott nyomtatási orientáció is, amely lehetővé tette, hogy a ragasztásban résztvevő felületek támaszanyag nélkül kerülhessenek kinyomtatásra. Az egyes alkatrészek egymáshoz történő közel helyezésével az egy lépésben kinyomtatható alkatrészek száma növelhető volt.



4. ábra. A kinyomtatott modellek az építési platformon

A nyomtatás után az alkatrészek leválasztásra kerültek az építési platformról, majd a támaszanyagok eltávolítása történt meg. Az így elkészült alkatrészekre látható néhány példa az 5. ábrán. Itt már a hengeres talp forma is látható. Minden geometria típusból 3-3 alkatrész került kinyomtatásra és további vizsgálatra. Az eljárás során a felületre tapadt porszemcsék eltávolítása üveg szemcseszóróval történt.



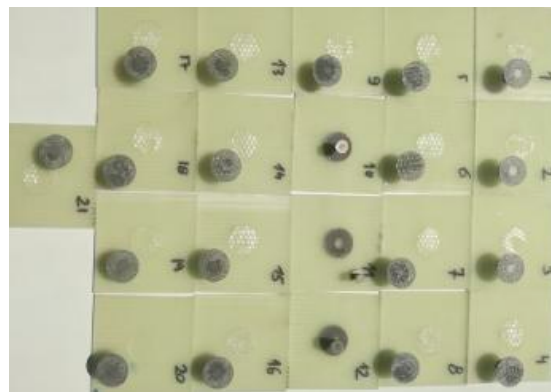
5. ábra. A kinyomtatott modellek az építési platformról való leválasztás után

Az azonos méretű kompozit lapok közepére helyezve történt fém kötőelemek felragasztása, hogy a szakítógéppel befogója szimmetrikusan elhelyezhető legyen a vizsgálatokhoz. A fém-polimer kompozit kötések ragasztás utáni állapotban láthatók, a 6. ábrán.



6. ábra. A fém-kompozit kötések a ragasztás után

A ragasztó anyaghoz tartozó kötési idő letelte után történt meg a kötések szakítása, amely utáni állapot figyelhető meg a 7. ábrán. A szakadás helye általában a ragasztóanyagban vagy a kompozit mátrix felső részén volt található. Több esetben a kompozit anyag felületén láthatóvá vált az üvegszálak szerkezete a mátrix gyanta anyag eltávolítása miatt. A fém alkatrész felületén ragasztómaradványok is voltak, de nem 100%-ban, ami azt jelenti, hogy még van lehetőség a fém oldalon lévő kötés megerősítésére.



7. ábra. A fém-kompozit ragasztott kötések a szakítás után

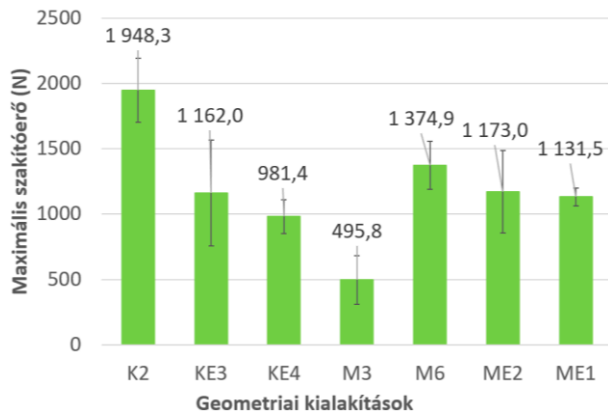
A 8. ábrán a különböző talprész geometria kialakítás esetén láthatóak a maximális szakító erő átlagok és szórások diagram formájában. A szakítás során a maximális szakító erőt használtuk a kötőerő jellemzésére. A szakítószilárdság a csatlakozó felületek összetettsége miatt nehezen lett volna meghatározható és nagy bizonytalanságot jelentett volna.

A diagramon megfigyelhető, hogy jelentős eltérések vannak a maximális szakítóerőben a különböző talp geometria kialakításától függően. A legnagyobb szakítóerőt a K2 kialakítás érte el, annak ellenére, hogy a legnagyobb ragasztási érintkezési felület nem ennél a változatnál volt. Az M3 kialakítás kivételével a többi darab átlagos szakítóereje 980 és 1370 N között volt. Korábbi kísérleteinkben már megmértük a struktúra nélküli talppal rendelkező kötőelemet, ahol az alkatrész geometriája úgy került kialakításra, ahogy a strukturált kötőelemek, azonban semmilyen struktúrát nem tartalmazott. Itt teljesen tömör homogén felület került ragasztásra, tehát az alakzárás nem játszott szerepet a kötési erőben. Ebben az esetben a mért maximális szakító erő átlaga 567,5 N volt.

Ez azt is jelenti, hogy a struktúra akár csökkentheti is a kötés szilárdságát a struktúra nélküli állapothoz képest. Ezzel együtt azonban a kiválasztott és megvizsgált struktúrák egy kivételével (M3) mind nagymértékben növelték a kötésesterősséget. Ez szakító erő változás 2-3 háromszoros növekedést is jelenthet. A legnagyobb szakító erőt biztosított talp kialakításnál 3,4 szoros növekedés volt tapasztalható a struktúra nélküli változathoz képest.

Megfigyelhető ugyanakkor a diagramokon, hogy a mért maximális szakítóerő értékek szórása az átlag értékekhez képest jelentős, ami a ragasztás bizonytalanságából is fakadhat.

Összességében tehát megállapítható, hogy az ilyen kötőelemek talp részének speciális kialakítása lehetőséget biztosít a ragasztott kötés szilárdságának növelésére.



8. ábra. A maximális szakítóerők átlag értékei különböző geometriai kialakítások esetén

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatási eredményekből a következő következtetések vonhatók le:

- A 3D fémnyomtatás segítségével speciális struktúrák hozhatók létre a talpas kötőelemek esetében, amelyek mechanikai terhelés szempontjából is alkalmasak erősebb kötés létrehozására.
- A különböző struktúra kialakítások eltérő módon befolyásolják a kötési szilárdságot polimer kompozitokhoz való kötés esetén.
- Ahhoz, hogy a strukturált felület jobb kötési szilárdságot biztosítson a megfelelő struktúra típus alkalmazása szükséges.
- A különböző talp geometria kivitelek között akár háromszoros kötési erő eltérések is lehetnek
- A kutatásban bemutatott konstrukciók közül a legnagyobb kötési erőt a K2 kialakítás biztosította. A kötési szilárdság 3,4-szer nagyobb lett a strukturálatlan felülethez képest, és 40 %-kal több volt, mint a második helyen álló strukturális kialakításnál (M6).

5. SUMMARY

The following conclusions can be drawn from the results of the research work:

- 3D metal printing can be used to create special structures in the case of BigHead-type inserts, which are suitable for creating a stronger bond, even from the point of view of mechanical load
- Different structural designs affect bond strength differently when bonding to polymer composites.

• For the structured surface to provide better bond strength, it is necessary to use the appropriate structure type

• There can be up to threefold differences in bond strength between different geometry designs.

• Among the constructions presented in the research, the largest bonding forces were given by design K2. The bond strength increased by 3.4 times compared to the unstructured surface and 40 % more than the structural design (M6) in second place.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projektet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIH) finanszírozza. A projekt címe: „Innovatív megoldásokon alapuló, többcélú, rögzített szárnyú drón fejlesztése és a szükséges kompetenciák megteremtése”. A pályázat azonosító száma: 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139. A szerzők köszönetüket fejezik ki a pénzügyi támogatásért. A szerzők köszönetet mondanak Végh Ákosnak a kutatás megvalósításában végzett munkájáért.

7. IRODALOM

- [1] Mark Armstrong, Hamid Mehrabi, Nida Naveed (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. Journal of Manufacturing Processes 84 pp. 1001–1029
- [2] Nick Tepylo, Anna Straubinger, Jeremy Laliberte (2022). Public perception of advanced aviation technologies: A review and roadmap to acceptance. Progress in Aerospace Sciences Volume 138, 1 April 2023, 100899
- [3] Guo Liu, Xiaofeng Zhang, Xuliang Chen, Yunhu He, Lizi Cheng, Mengke Huo, Jianan Yin, Fengqian Hao, Siyao Chen, Peiyu Wang, Shenghui Yi, Lei Wan, Zhengyi Mao, Zhou Chen, Xu Wang, Zhaowenbo Cao, Jian Lu (2021). Additive manufacturing of structural materials. Materials Science and Engineering: R: Reports Volume 145, July 2021, 100596
- [4] J. Schwenen, V. Sessner, J. Fleischer (2016). A new approach on integrating joining inserts for composite sandwich structures with foam cores. Procedia CIRP 44 (2016) 310–315
- [5] J. Gebhardt, J. Fleischer (2014). Experimental investigation and performance enhancement of inserts in composite parts. Procedia CIRP 23 (2014) 7–12

AMSLER DUPLATÁRCSÁS MÉRŐMŰSZER HASZNÁLATA VASÚTI KERÉK-SÍN KAPCSOLAT VIZSGÁLATÁHOZ

EXPERIMENTAL USE OF AN AMSLER DUAL-WHEEL INSTRUMENT FOR ANALYSING RAILWAY WHEEL-RAIL CONTACT

Zudor Levente Béla*, Dr. Zwierczyk Péter Tamás**

ABSTRACT

The properties of the rail-wheel connection have changed significantly thanks to the developments in the industry. Faster and heavier vehicles and their electronic auxiliary equipment have given rise to new types of faults. Using measurements, we examined and demonstrated that the Amsler twin-disc device is suitable for testing tribological connections.

1. BEVEZETÉS

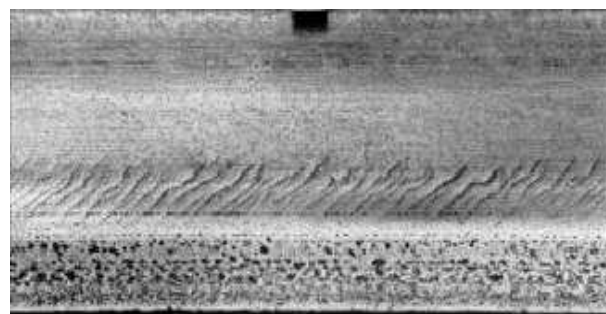
Napjaink vasútipara merőben eltér és nagy utat tett meg a kezdeti állati erővel vagy gőzgéppel hajtott járművek világától. A jelenleg elterjedt és használatos szerelvények az első kötőpályás járművekhez képest nagyobb terhek szállítására alkalmasak, sebességük túlszárnyalja történelmi társaikat, ezzel szemben azonban tömegük is jelentősen nagyobb. A modern járművek számos olyan segédberendezésekkel vannak felszerelve (kocsik, mozdonyok egyaránt) amelyek befolyásolják a jármű üzemi viselkedését (pl.: blokkolásgátló, kipörgésgátló berendezések), azonban ezek a berendezések a pályára is hatást gyakorolnak. [1]

Üzem közben, a jármű kerekek nagy terhelés alatt bekövetkező, bár az említett üzembiztonságot és az utazási kényelmet növelő elektromos segédrendszerek, mint a kipörgésgátló és blokkolásgátló rendszerek által korlátozott kerék megcsúszások nem csak mechanikai, hanem nagy lokális hőterheléssel is járnak mind a kerék, mind pedig a pálya esetében. [1]

Ezeknek az üzemi körülményeknek következményeképp új, eddig nem, vagy csak ritkán tapasztalt meghibásodások és tönkremenetek jelentkeztek mind a kerék, mind pedig a sín oldalon egyaránt. Annak érdekében, hogy garantáljuk a biztonságos üzemeltetést és tervezhetővé tegyük a karbantartási munkákat ütemezését, újfajta vizsgálati módszereket szükséges felhasználnunk és mélyebben meg kell ismerni a megjelent hibák okait, keletkezését, forrásait.

Kutatásunk során egy már régóta ismert és gyakran használt több mint 100 éves eszközt kezdtünk felmérni, hogy a már említett új károsodások vizsgálatára milyen körülmények között tudjuk használni. Az Amsler-féle duplatárcsás mérőberendezés alkalmas topológiai vizsgálatokra, viszont a mérőrendszer nem fejlődött a kor előrehaladtával és teljes mértékben analóg maradt. A korszerűtlen mérőegységek miatt a mérések során alkalmaztunk digitális egységeket és kibővítettük a mérhető paramétereket. Az eszköz teljes mértékben megfelel és alkalmas a vasúti kerék-sín kapcsolatának arányosított vizsgálatára. A mérőműszer alkalmas végeeselemes és numerikus számítások validálására és verifikálására, ezeket a méréseket nehezen vagy teljes mértékben lehetetlen és gazdaságtalan lenne valódi vasúti járművekkel elvégezni. [2]

A sínek esetében a head-check repedések szintén a már korábban említett, terhelések, nagyobb terhelhetőségű, de ridegebb sínanyagok, valamint részben vélhetően az említett menetbiztosító berendezések következménye. A repedések a sín fején (a futófelület peremén) jelentkeznek a jellemzően a pálya azon szakaszán, ahol a kigyorsítás történik, valamint kitérők esetében is jellemző tönkremenetel. Jól felismerhető, jellegzetes „V” alakú, egymást 3-25 mm távolságban követő repedéseket alkotnak, ahogy látható az 1. ábrán. [3]



1. ábra. Head-check hajszálrepedések [4]

* doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék

**adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék

2. MÉRÉSEK

A mérések megkezdése előtt felmérésre kerültek a jelenleg szükséges fizikai mennyiségek, amelyek mérése elengedhetetlen. A kutatás szempontjából fontos mérési paraméterek a következők:

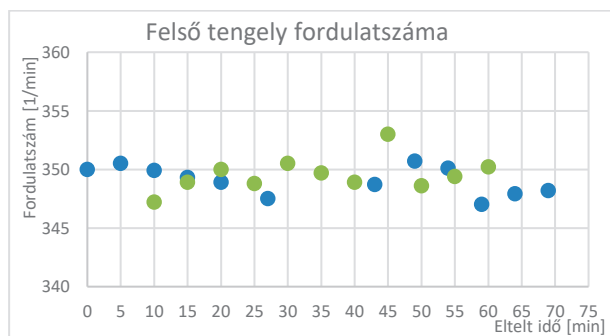
- fordulatszám,
- összeszorító erő,
- súrlódási nyomaték,
- hőmérséklet,
- mérési idő.

A berendezés az alábbi elven működik. A duplatárcsás AMSLER készüléket egy villanymotor hajtja, ennek mozgását leosztva a két egymással szembe forgó tengelyekre. A két tengely fordulatszáma eltérő, hogy folyamatosan biztosítva legyen a csúszás (slip) állapota. A tengelyekre felhelyezett próbatestek folyamatosan egymáshoz vannak szorítva egy rugó segítségével. A rugó egy menetes száron keresztül tudjuk előfeszíteni a kíván értéknek megfelelően. A rugó terhelésének, előfeszítésének értékét egy kilogramm skálán lehet visszakövetni. A készülék tartalmaz mindkét tengelyre egy-egy átfordulás darabszámát mérő tárcsás számlálót. Az alul elhelyezkedő tengelyen egy ingás műszerrel a súrlódási nyomatékot lehet mérni egy centiméter kilogramm skálán és megfelelő papírhenger segítségével ábrázolni is a kilengéseket.



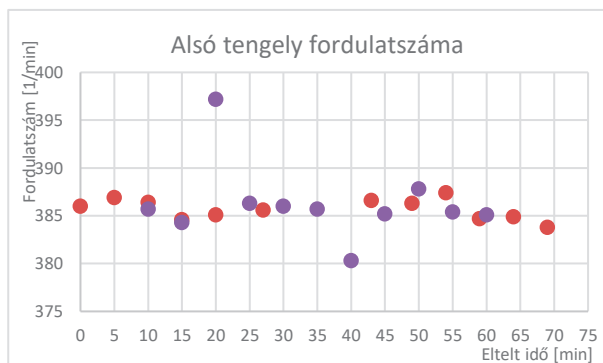
2. ábra. Amsler-féle duplatárcsás mérőműszer

A mérések során megállapítottuk, hogy a készüléket hajtó motor fordulatszáma nem mutat nagy kilengéseket járás közben, ahogy a 3. ábrán is látható, ezért nem szükséges a minden mérés alkalmával folyamatosan nyomon követni a fordulatszámot. Jól látható, hogy a felső tengely fordulatszáma 350 ± 5 1/perc, ezek alapján állandónak tekinthető.



3. ábra. Felső tengely fordulatszám diagram

A 4. ábrán látható az alsó tengelyen mért fordulatszámok görbéje. Azonosan, ahogy az előző esetben, itt sem tapasztalható nagy szórás. Alsó tengely 385 ± 5 1/perc tartományon belül ingadoznak.



4. ábra. Alsó tengely fordulatszám diagram

A lézeres elven működő fordulatszám-mérést kézi eszközzel végeztük. A jelölő matrica felragasztási pontatlansága és a kézi mérés miatt enyhe mérési hiba, figyelhető meg a fordulatszám diagrammon. Az alsó tengely görbéjén ez jól is látható az ötödik mérési pontban.

A mérést egy HoldPeak HP-9236C fordulatszám-mérő készülékkel végeztük, a készülék mérési pontossága $\pm 0,01\%$.

A csúszás (slip) hatására jelentős hő fejlődik az ipari környezethez hasonlóan. A hőterhelés a szerelvények indulási és fékezési pályaszakaszán (ahol a head-check is kialakul) a kis megcsúszásokból adódik.

A Testo 881-3 hőkamera < 50 mK termikus érzékenységgel és magas pontosságú és jól szegmentálható, kontrasztos felvételeket képes készíteni. A hőkamera pozicionálásához egy fényképész állvány került alkalmazásra, hogy a mérési pontok felvételénél a képeket azonos, biztos helyről készüljenek. Az elkészült képek a hőkamara saját programjával kerültek kiértékelésre. A hőkamera és annak mérési elhelyezése a 5. ábrán látható.



5. ábra. Hőkamera és mérési elhelyezése

3. MÉRÉS MENETE

A mérésekhez, egyszerű, széles körben elérhető és jól ismert anyagjellemzőkkel rendelkező alapanyag került felhasználásra, mivel a cél a berendezés alkalmazhatóságának feltérképezése volt. A választás az általános, S235-ös szerkezeti acélra esett, amiből 32 mm-es külső átmérőjű próbatestek kerültek kialakításra, a hengereket 7 mm-es falvastagsággal készültek el. Minden mérésnél a tengelyekre való felszerelés közben kiemelt figyelmet kapott a próbatestek beállítása. Cél az volt, hogy a hengeres próbatestek a teljes külső palástfelületükön érintkezzenek ezzel biztosítva az egyenletes kopást és egyenletesebb járást. Fontos kiemelni, hogy a próbatesteket a geometriájuk kialakítása után semmilyen módon nem kerültek előkészítésre, illetve tisztításra.

Minden mérés során a duplatárcsás mérőkészülék magasabb 2850 1/perc-es fordulatszámra üzemelt. A mérés időtartamát a vizsgálati, teszt mérések alkalmával az egyensúlyi állapot biztos beállásával került meghatározásra. A próbatesteket összeszorító erőt 10 kg-ban került rögzítésre minden mérés esetében.

4. MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE

A kiértékeléseket minden alkalommal a próbatestek szemügyre vételezésével kezdődött. A felszínről fényképes felvételek készültek úgy, hogy azok a mérés befejezésének állapotát mutassák, ahogy a 6. ábrán is látható.



6. ábra Próbatestek a mérés után
a) felső tengely, b) alsó tengely

Mivel a mérőműszer a repedések létrejöttének és terjedésének vizsgálatára szolgál megtisztításra került a próbatestek felülete, hogy penetrációs vizsgálatot, illetve mikroszkópos felvételek készülhessenek. Már a szemügyre vételezés során is sejthető volt, de a penetrációs vizsgálat elvégzésével vált bizonyossá, hogy nem alakult ki repedés. A próbatestek anyagának szívós tulajdonsága, a mérések rövid ideje és igénybevétel mértéke nem volt elegendő a képlékeny alakváltozási képesség kimerítéséhez, de az elsődleges cél a mérési folyamat vizsgálata, ideértve annak stabilitása, paramétereinek állandósága volt.

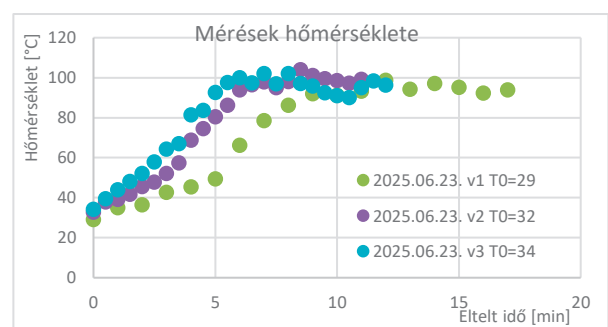
A felületeket tisztítás előtt és után is érdekes elváltozások voltak megfigyelhetők. A felső próbatestesről levált szennyeződések és fémreszelék az alsó próbatestre „hullott” és a felületébe nyomódott és éget a hő hatására. Ahogy a 6. ábrán is látható erős eltérés mutatkozik a bal oldalon található felső tengely és a jobb oldalon lévő alsó tengely felülete között a leállítás pillanata után. A felső tengely felülete egyenletes és fényes, míg az alul elhelyezkedő próbatest felületét szennyeződés borítja.



7. ábra Próbatestek a mérés után

A 7. ábrán látható mikroszkópos képeken is azonosan erős a felületek eltérése tisztítást követően. A bal oldali, felső próbatest felszíne egyenletes, fényes csak egy enyhe peremképződést lehet felfedezni a nem pontos palástfelületi átfedés miatt. A jobb oldali, alsó próbatest felszíne durva és erősen egyenetlen. A mérésközben keletkezett fémreszelék lehullva a folyamatos mozgás miatt barázdákat munkált az anyagba.

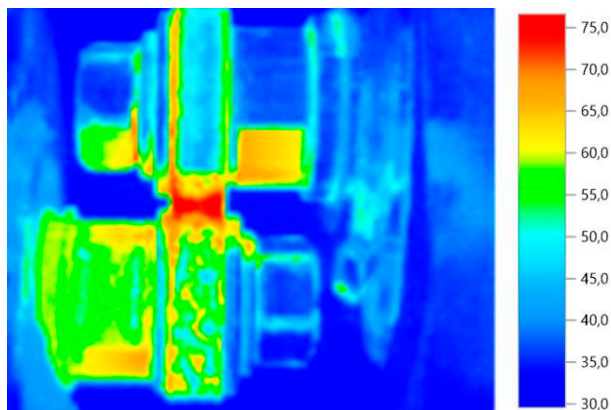
Érdekes megnézni a rögzített hőmérsékleti adatok görbáját is. A 8. ábrán látható a mérés alatt felvett hőmérsékleti mintavételi pontok értéke. A mérés alkalmával három azonos, már korábban is említett próbatest geometriát vizsgáltam megegyező mérési paraméterekkel. Az egyetlen változó a környezeti hőmérsékelt volt, aminek hatására kicsit eltérő görbék alakultak ki. Érdekes megfigyelni, hogy az idő előrehaladtával a maximális vagy állandósult hőmérséklet csökkenni kezd.



8. ábra Mérési hőmérséklet diagram

A jelenséget a hőkamerás képek elemzése után lehet egyértelműen magyarázni. A 9. ábrán látható a felületi hőmérséklet nagy mértékben inhomogén, ami a vártaknak ellent mond. A felületen lerakódott szennyeződés detektálható mértékben megváltoztatja a felület termodinamikai tulajdonságait ezzel érezhetően

változtatva a test felületi hőmérsékletét. A szennyeződés réteg és annak elhelyezkedése, vastagsága folyamatosan változik ezzel a maximális hőmérsékletet befolyásolva.



9. ábra. Próbatest hőmérséklet térképe

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elvégzett mérések alátámasztják, hogy a készüléket sikerült kiegészíteni a mérések során a szükséges mérőeszközökkel, amelyek alkalmassá teszik vasúti-kerék-sín kapcsolat arányosított vizsgálatára. A kiegészített műszerkészlettel egyszerűen és könnyedén lehetséges a kor elvárásainak megfelelően méréseket végezni. A próbamérések segítségével kiküszöbölésre kerültek a kisebb hibák és hiányosság, hogy a későbbi, hosszú időtartamú mérések biztonságosan folyhassanak.

Nem várt eredményként könyvelhető el, hogy már a próbamérések közben is volt lehetőség következtetéseket levonni, megfigyeléseket tenni, ami új ötleteket és terveket inspirált. Ez a megfigyelés a későbbi mérések során is alkalmazható ismeretanyag és a szennyeződés hatására való lehűlést érdemes mélyebben megvizsgálni.

Kijelenthetjük, hogy az Amsler duplatárcsás készülék teljesen megfelel a vasúti sín-kerék kapcsolat arányosított vizsgálatára. A rövidtávú mérések bebizonyították, hogy hosszabb idejű vizsgálatokat is lehetséges végezni az eszközzel. A kutatás későbbi szakaszában alkalmazható a numerikus és szimulációs számítások ellenőrzésére. Végezhető validációs és verifikációs méréseket a szimulációk eredményeinek alátámasztására. A berendezés lehetőséget biztosít arra is, hogy egy harmadik réteg okozta termikus viszony megváltozást is vizsgáljak, amely bemenő, illetve kontrol adatként szolgálhat kerék-sín kapcsolat hőtani numerikus vizsgálatához.

6. JÖVŐBELI TERVEK

A mérések során kiderült, hogy a műszer alkalmas a szükséges adatok mérésére és a vizsgálatok elvégzésére. Hátrányt jelent, hogy az eszköz műszerei teljesen analóg módon működnek, ez nem felel meg a kor elvárásainak és követelményeinek. Mindenképp szükséges a mérőrendszer teljesen digitális rendszerének kiépítése.

A digitális eszközök alkalmazásán túl egy automatikus mérőhálózat elkészítése is szükséges. Annak érdekében, hogy a teljes repedés kialakulás folyamatát monitorozni lehessen hosszú méréseket kell eszközölni, aminek mérése digitálisan automatizálható.

Annak érdekében, hogy a biztonsági követelményeknek is megfeleljünk a mérési paraméterek rögzítésén túl a vezérlést is irányítani kell. A rendszert vész-stop funkcióval kell ellátni valamilyen bemenő paraméter alapján. A hiba esetén a rendszer leállítja a teljes mérést és naplózza a hibát.

Érdemes megvizsgálni, hogy a hosszútávú mérés során a súrlódásból keletkező szennyeződés okozta lehűlés mennyire jelentős, szükséges-e annak későbbi elemzése és szimulációba implementálása. Meg kell állapítani a hőingadozás mértékének nagyságát, illetve, hogy az mennyire befolyásolja a sín vagy kerék oldali anyagokat.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Doktoranduszi Kiválóság Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem támogatása alapján valósult meg.

8. IRODALOM

- [1] Zwierczyk Péter Tamás. Thermal and stress analysis of a railway wheel-rail rolling-sliding contact. PhD thesis, Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, 2015.
- [2] Renan Carreiro Rocha & Heiter Ewald. Using twin disc for applications in the railway: a systematic review. Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 45(191), 2023.
- [3] Vossloh Group, Ralis defects, <https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/products-at-a-glance/rail-turnouts.maintenance/schienenfehler.html>
- [4] R. Krull, H. Hintze, M. Luke, Eddycurrent Detection of Head Checks on the Gauge Corners of Rails: Recent Results, NDT.net - June 2002, Vol. 7 No.06.

MODERN VASÚTI CSÚSZÁS- ÉS KIPÖRGÉSGÁTLÓ BERENDEZÉSEK OKOZTA TÖNKREMENTELI FORMÁK A KERÉK-SÍN KAPCSOLATBAN - ÁTTEKINTÉS

POSSIBLE FAILURE MODES IN THE WHEEL-RAIL CONNECTION CAUSED BY MODERN RAIL ANTI-SLIP AND ANTI-SPIN DEVICES - A REVIEW

Dr. Zwierczyk Péter Tamás*

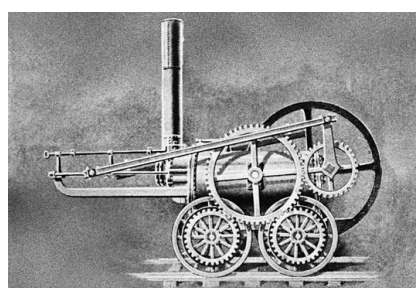
ABSTRACT

The adhesion-based railway system, as it is known today, has come a long way in its development over the more than 200 years of its history. Thanks to various advancements, the speeds of vehicles and the amount of cargo transported have significantly increased in both passenger and freight transport sectors. This article aims to draw attention to the new or previously less frequently observed forms of damage associated with wheel-rail contact, which have emerged with the introduction of safety-enhancing auxiliary devices (such as slip and spin prevention devices).

1. BEVEZETÉS

A ma ismert adhéziós vasút nagy utat tett meg a fejlődése során az elmúlt több mint 200 éves történelme alatt. A kezdeti állapot, majd gőzgép vontatta szerelvényekhez képest manapság nagy, 250-350 km/h utazósebességgel közlekedő, menetrendszerinti járatokat használhat az utazóközönség a világ számos pontján. Ezt a jelentős fejlődést nagyon jól szemlélteti az 1. ábra.

A fejlesztéseknek köszönhetően jelentősen növekedett a járművek sebessége, valamint a szállított teher mértéke mind a személy, mind pedig a teherszállítás területén egyaránt. A hagyományos szárazföldi közlekedési formák közül a vasúti közlekedés tekinthető talán legbiztonságosabb, a legkisebb hely-, illetve energia igényű közlekedési formának. Így gazdaságos, környezettudatos megoldást kínál a személyszállítás mellett a teherszállítás területén egyaránt [1]. Ez a cikk a futásbiztonságot növelő segédberendezések (csúszásgátló és kipörésgátló berendezések) megjelenésével a kerék-sín kapcsolat esetén jelentkező, eddig nem, vagy pedig jelentősen ritkábban tapasztalt károsodási formákra szeretné felhívni a figyelmet.



a)¹



b)²

1. ábra. Richard Trevithick által tervezett mozdony, 1804 a),
sebesség világrekorder TGV szerelvény, 2007 b)

2. PROBLÉMAFELVETÉS

A jelentős fejlesztések elérésében kulcsszerepet játszott az elektronikai technológia robbanásszerű fejlődése.

A járművek magasabb sebességen történő üzemeltetése, magasabb futásbiztonsági követelményeket is támasztott a gyártók és üzemeltetőkkel szemben. A számos passzív ellenőrző rendszer mellett a vasúti járművek esetében is megjelentek az aktív befolyásoló rendszerek, mint a csúszásgátló berendezések (WSP – Wheel Slide Protection System), valamint az aktív kipörésgátló berendezések, amelyek ugyan nem gátolják meg teljesen, de egy kontrolált tartományon belül tartják a kerék-sín kapcsolat jelentkező csúszás mértékét különböző,

*adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék

¹ Kép forrása: <http://kids.britannica.com/comptons/art-126065/The-first-successful-locomotives-were-built-in-Britain>

² Kép forrása: www.railpictures.net Photo: Sylvain Bouard

alacsony adhéziós üzemi körülmények esetében. Ezeknek a segédberendezéseknek a megjelenésével rövidebb fékút mellett a kerék és sín geometria degradációja is csökkenthető (csúszásgátlóval elkerülhető a kerekek teljes blokkolása, illetve a kontrolálatlan, magas csúszási sebességek, amelyek mind a kereket, mind pedig a pálya oldalt jelentősen károsítja, a keréknél például poligonosodást, esetleg ellaposodást idézhet elő (2. ábra)).

Vontatás esetében a kerekek kipörgése jelentősen csökkenti a kifejthető vonóerő értékét. Az adhéziós körülmények (súrlódási viszonyok) javítása érdekében, korábban homokoló berendezéseket használtak, később megjelentek az elektronikus kipörgésgátló berendezések. A kontrolálatlanul kipörgő kerekek jelentős károsodást idéztek elő a vasúti pályákban is (3. ábra).



2. ábra. Vasúti kerék ellaposodása blokkolós fékezés hatására [2]



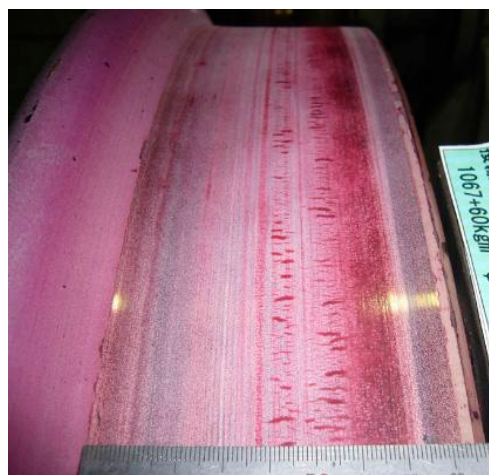
3. ábra. Kipörgő kerék okozta jelentős helyi kopás a vasúti sín futófelületén [3]

Az elektronikus csúszás- és kipörgésgátló berendezések megjelenésével a fenti ábrákon bemutatott szélsőséges tönkremeneteli formák előfordulása jelentősen csökkent, ezzel biztosítva a magasabb futásbiztonságot, valamint a gazdaságosabb üzemeltetést.

A korlátozott csúszás a kerék-sín kapcsolatban azonban más jellegű problémák megjelenését indukálta több további tényező együttes megjelenésével együtt, amelyek külön-külön az előző berendezésekhez hasonlóan jelentősen hozzájárultak a vasúti közlekedés fejlődéséhez. Röviden összefoglalva egyrészt a kizárólag tárcsafékkal, mint elsődleges, nagyteljesítményű üzemi fékkel szerelt járművek megjelenése, továbbá az anyagtechnológia fejlődésével a korábbiaknál nagyobb terheirés, azonban ridegebb anyagok kifejlesztése

mind a kerekek, mind pedig a sínek kialakításában. Mindezek a körülmények olyan repedések megjelenéséhez vezettek a kerék és a sín esetében, amelyek korábban nem, vagy csak szórványosan voltak tapasztalhatóak az üzemeltetők által.

A vasúti kerekek esetében a csúszva gördülés hatására, amelyet fékezés során a csúszásgátló berendezés szabályoz, de nem szünt meg teljesen, jelentős lokális hő fejlődik mind a kerék, mind pedig a sín futófelületén, amely apró repedések (angol terminológia szerint micro thermal cracks) megjelenéséhez vezethetnek a futófelületen, illetve közvetlenül alatta (4. ábra). Ezek a felületi mikrórepedések az idő előrehaladtával a felület alatt összenyílnak, ezáltal nagyobb felületi darabok válhatnak le a kerék futófelületéről, amely jelentős futásbiztonsági kockázattal jár. A probléma súlyosságát fokozza a nagyobb teljesítményű, tisztán tárcsafékkal szerelt járművek esetében, hogy a korábbi, tuskós egységgel történő fékezés felület koptató és tisztító hatása teljesen elmarad, amely képes mérsékelni a repedések szabad terjeszkedését.



4. ábra. A hőmérséklet okozta repedések elhelyezkedése a futófelületen [4]

A sín esetében jelentős problémákat okoz az ún. „head-check” (a továbbiakban HC) repedések. A sín futófelületének peremén megjelenő, apró, jellegzetes „V” alakban, egymáshoz nagyon közel elhelyezkedő repedések (5. ábra) megjelenése a nagyobb terheirés, ámde ridegebb alapanyagú sínek megjelenésével megszaporodtak. A HC repedések megjelenése különösen elszaporodott azokon a pályaszakaszokon, kitérő körzetekben, ahol a járművek gyorsítása történik. Habár a HC repedések kialakulásának elsődleges okaként a gördülő érintkezés okozta kifáradást szokták megjelölni (RCF – Rolling Contact Fatigue), azonban, hasonlóan a csúszásgátló berendezésekhez, a gyorsítás esetében, a nagyteljesítményű vontatójárművek trakciós erejének átadása során a korlátozott megcsúszást (kipörgést) biztosító kipörgésgátló berendezés következményeképpen itt is lejátszódik egy lokális hőfejlődés, ami elősegíti ezeknek a repedéseknek a kialakulását.

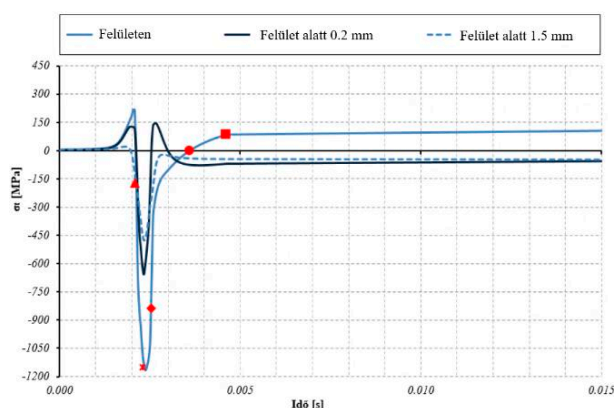


5. ábra. Head-check repedések a sín futófelületének peremén [5]

3. REPEDÉSEK KIALAKULÁSÁNAK HÁTTERE

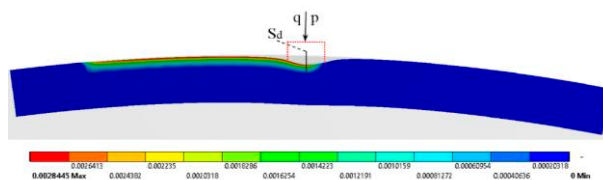
Látható, hogy mind a kerék, mind pedig sín esetében hasonló károsító mechanizmus játszódik le. A korlátozott csúszva gördülés jelentős lokális hőfejlődést eredményez, amelyet további tényezők, mint a ridegebb szerkezeti anyagok, valamint a korábbiaktól eltérő szerkezeti kialakítások, példaként említve a nagyobb fékteljesítmények miatt megjelenő tárcsás fékrendszerek tovább fokoznak. Általánosságban megállapítható, hogy fékezés során jellemzően a kerék, gyorsítás során pedig a sín oldalon jelentkezhetnek a korábban ismertetett repedések.

A csúszva gördülés okozta hőfejlődés több szakember is vizsgálta mind fizikai kísérletek, mind pedig numerikus analízisek segítségével [4, 6, 7, 8, 9]. Az eredmények azt mutatják, hogy a csúszási sebességtől függően lokálisan jelentős hő fejlődik, amely lokális tágulást okoz az érintkezési felületen. Ez a hő a későbbiekben a mélyebb rétegekbe vándorol, ott is lokális, de már korlátozott tágulást eredményez. A folyamat során ébredő tangenciális irányú (menetiránynak megfelelő) feszültség komponens eloszlását egy csúszáságtólóval fékezett kerék példáján szemléltetve a 6. ábra mutatja be.



6. ábra A tangenciális irányú feszültség komponens eloszlása a kerék futófelületén és közvetlenül alatta az idő függvényében az első negyed fordulat során [10]

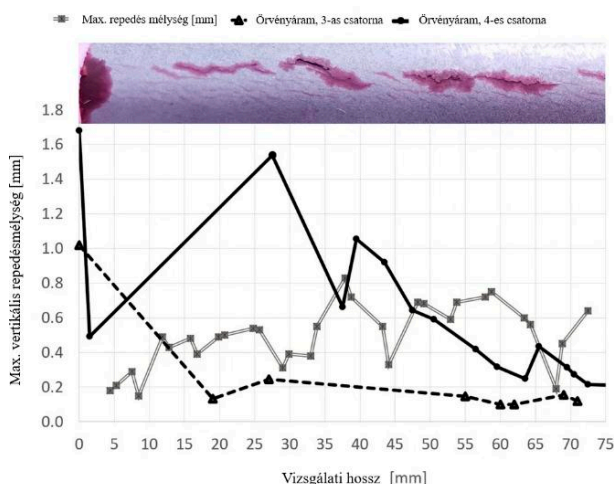
A 6. ábra az alábbi folyamatot mutatja be az idő függvényében. A csúszva gördülés hatására a lokálisan megemelkedő hőmérséklet, az érintkezési tartomány közvetlen környezetében a felületi, majd később a mélyebb rétegekben létrejövő korlátolt hőtágulás váltakozó előjelű feszültségállapotot hoz létre, amely a ciklikus igénybevételnek köszönhetően folyamatosan ismétlődik. A jobb megértés érdekében a vizsgált kerék esetében jelentkező plasztikus nyúlás eloszlását mutatja be a 7. ábra. Az ábrán a kerék hosszirányú metszetben, a numerikus vizsgálat során használt modellorientáció szerint látható (a terhelés: h - q , érintkezési nyomás - p) felülről, radiális irányba terheli a kereket az érintkezési tartománynak megfelelő mértékben, a sín fizikailag elhanyagolásra került a számítás során). Jól látható, hogy a vizsgált esetben, a hőterhelésből és az érintkezési nyomásból származó terhelés mértéke együttesen meghaladta a kerék alapanyagának rugalmas határát, így képlékeny állapot alakul ki.



7. ábra. Egyenértékű plasztikus nyúlás eloszlása a kerék menetiránynak megfelelő szimmetria síkján (deformációs lépték 50:1) [10]

A csúszási sebesség mértékétől függő hőfejlődés tehát egy olyan érintkezési környezetet hozhat létre, amely a folyamatosan váltakozó húzó és nyomó igénybevételnek köszönhetően elősegíti a mikro repedések megjelenését, valamint a repedések tovább terjedését. Ez a folyamat nem csak a példaként szolgáló kerék oldalon figyelhető meg, hanem a sín esetében is hasonlóak a folyamatok, amelyek az RCF mechanizmusa mellett jelentősen hozzájárulhat a HC repedések kialakulásához.

További probléma, hogy a cikkben tárgyalt meghibásodási formák detektálási pontossága is korlátozott. Erre kiváló példa a [11] publikációban bemutatott eredmények. Az iparágban, Európa szerte széleskörben elterjedt örvényáramú mérőberendezés segítségével méri fel a gyakorlatban, a vizsgálni kívánt sínszakaszokat HC repedések detektálására. A mérési eredmények függvényében kerül meghatározásra a szükséges beavatkozás mértéke. Pontatlan mérési eredmények, nem megfelelő karbantartási beavatkozást eredményeznek. A 8. ábrán a cikkben vizsgált sínszakasz örvényáramú berendezéssel, valamint azt követően felszeletelt és mikroszkóp alatt a repedésmélység meghatározására irányuló vizsgálatok eredményeit szemlélteti. Az eredményekből jól látható, hogy a tényleges repedésmélységet az örvényáramú berendezés sokszor túl vagy alul becsüli, amely komoly bizonytalanságot okozhat az örvényáramú mérésre alapozott karbantartás esetében.



8. ábra. HC repedések mélysége örvényáramú berendezés különböző mérőcsatornáin, illetve a sinkeresztmetszetek vizuális mikroszkópos vizsgálatának eredményei a vizsgált sínszakaszon [10]

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vasút fejlődésével, az újabb és újabb segédberendezések megjelenésével, amelyek biztosítják a biztonságos vasúti közlekedést magasabb sebességek és nagyobb szállítható hasznos teher mellett, korábban nem, vagy csak ritkábban tapasztalható károsodási formák jelentek meg, amelyek új kihívások elé állítják mind a berendezések gyártóit, mind pedig a járművek és a pályák üzemeltetőit. Sok esetben nehézséget okoz az is, hogy a rendelkezésre álló és széles körben elterjedt mérési/ellenőrzési eljárások nem biztosítanak kellően megbízható eredményeket, amelyekre megbízható karbantartási és hibamegelőzési előírásokat lehet készíteni. Ezért kiemelten fontos, hogy ezek fizikai hátterét minél pontosabban feltárjuk, megértsük, hogy kiváltó okokat figyelembe tudjuk venni a jelenlegi és új segédberendezések fejlesztésénél.

5. SUMMARY

With the development of railway technology and the appearance of new auxiliary devices that ensure safe railway traffic at higher speeds and with greater payloads, new and previously less frequent or unseen forms of damage have emerged. These pose new challenges for both equipment manufacturers and vehicle and track operators. In many cases, it is also difficult because the existing and widely used measurement/inspection procedures do not provide sufficiently reliable results to establish dependable maintenance and fault prevention guidelines. Therefore, it is crucial to explore their physical background as accurately as possible and to understand the root causes, so that these insights can be considered in the development of current and new auxiliary devices.

6. IRODALOM

- [1] I. Zobory, szerk., Vasúttechnikai kézikönyv. Budapest, Hungary: Magyar Államvasutak Zrt., 2006.
- [2] Alena Favorskaya, Nikolay Khokhlov, Modeling the impact of wheelsets with flat spots on a railway track, *Procedia Computer Science* 126, pp. 1100–1109, 2018
- [3] WJ Wang, HF Zhang, QY Liu, MH Zhu, XS Jin, Investigation on adhesion characteristic of wheel/rail under the magnetic field condition, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology* 0(0) 1–7, 2015
- [4] Handa K. és Morimoto F., Influence of wheel/rail tangential traction force on thermal cracking of railway wheels, *Wear*, vol. 289, pp. 112–118, 2012.
- [5] Vossloh Group, Ralis defects, <https://www.vossloh.com/en/products-and-solutions/products-at-a-glance/rail-turnouts.maintenance/schienenfehler.html>
- [6] M. A. Tanvir, Temperature rise due to slip between wheel and rail—an analytical solution for hertzian contact, *Wear*, vol. 61, no. 2, pp. 295–308, Jun. 1980.
- [7] V. Gupta, G. T. Hahn, P. C. Bastias, and C. A. Rubin, Calculations of the frictional heating of a locomotive wheel attending rolling plus sliding, *Wear*, vol. 191, no. 1–2, pp. 237–241, Jan. 1996
- [8] F. Kolonits, Wheel running surface temperature generated by a moving narrow heat source when wheel sliding occurs due to overbraking, *9th Int. Conf. Railw. Bogies Run. Gears*, pp. 95–102, 12 2013.
- [9] K. Handa, Y. Kimura, and Y. Mishima, Surface cracks initiation on carbon steel railway wheels under concurrent load of continuous rolling contact and cyclic frictional heat, *Wear*, vol. 268, no. 1–2, pp. 50–58, Jan. 2010.
- [10] Zwierczyk Péter Tamás, Thermal and stress analysis of a railway wheel-rail rolling-sliding contact. PhD thesis, Pattantyús-Ábrahám Géza Gépészeti Tudományok Doktori Iskola, 2015.
- [11] Máté, T.; Zwierczyk, P.T., Comparison of Rail Head Checks Using Destructive and Non-Destructive Examination Methods, *Journal of Failure Analysis and Prevention* 22 pp. 1898-1904., 7 p., 2022

ADDITÍVAN GYÁRTOTT POLIMER PRÓBATESTEK PIN-ON-DISK VIZSGÁLATA

EXPERIMENTAL PIN-ON-DISK STUDY ON ADDITIVELY MANUFACTURED POLYMERS

Zsibók Marcell*, Dr. Baka Ernő Zsolt**, Dr. Horák Péter***

ABSTRACT

The aim of this work is to observe how contact pressure p and sliding speed v affect the thermal response of additively manufactured polymer specimens in a Pin-on-Disk setup. Cylindrical PLA, PETG, and ABS pins ($h=6$ mm, $d=5-10$ mm) were tested against a polymer disk at a track radius $R=25$ mm. For each test, the pin and the disk were made from the same material. Surface temperature was recorded during 6-minute dry runs. In the present series, the maximum temperatures mostly remained below 50 °C. Therefore a $p \cdot v$ chart cannot be established. The preliminary observation is consistent with expectations: increasing normal load and rotational frequency leads to a higher temperature rise. Future measurements will extend the parameter range (smaller pin diameters, higher frequency) to reach the threshold region and enable construction of the chart. Determining these limits is necessary to define safe operating conditions for additively manufactured polymer components.

Keywords: Additive manufacturing; Pin-on-Disk; tribology; tribometer; dry friction; $p \cdot v$ chart, FDM; PLA; PETG; ABS

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártást egyre gyakrabban alkalmazzák prototípus-fejlesztésben, mert viszonylag gyorsan és költséghatékonyan állíthatók elő egyedi vagy kis szériás alkatrészek [6]. Korábban ez a technológia elsősorban geometria ellenőrzésre szolgált. Napjainkra azonban jelentősen bővült az anyagválaszték. Megjelentek a töltőanyaggal megerősített filamentek is, pl. szénszállal, üvegszállal erősített típusok is [7]. Fogaskerekek esetén azonban nem elegendő pusztán a nagy szakítószilárdság. A méretezés kulcsa a felületi nyomás által keletkezett Hertz-féle érintkezési feszültség és a fogtókifáradás. Az érintkezési zónában pedig emelkedik a hőmérséklet. Polimer fogaskerekeknel ez a hőterhelés elsődlegesen korlátozza a használhatóságot; tipikus szerkezeti polimereknél (pl. PLA) már ~50–60 °C környékén észlelhető funkcionális romlás [9]. Egy konkrét műszaki

polimer ABS esetén 95-105 fok körül, már csökken a rugalmassági modulusz értéke [3]. Ez annak tudható be, hogy az ABS üvegesedési hőmérséklete (T_g) általában 95 és 105 Celsius fok közé esik [3].

A polimer fogaskerekek széles körű ipari bevezetését tovább nehezíti a nyomtatott felületek érdessége és azok méretpontossága. Fontos kiemelni a rétegirányból adódó anizotrópiát is, valamint a hőérzékenységet [7]. Mindemellett az így előállított fogaskerekeknek reális jövője van olyan alkalmazásokban, ahol a gyors előállítás, változatosság és kis szériás gyártás kiemelt fontos [8]. Ehhez azonban számos mérésre van szükség, hogy meghatározzuk a terhelés és fordulatszám tartományokat, amelyekben a nyomtatott polimerek üzemszerűen működtethetők.

Ezt a célt szolgálja a Pin-on-Disk (PoD) módszer: rögzített csapot (pin) definiált normálerővel egy forgó tárcsára nyomunk, és adott terhelés kombinációk esetén mérjük többek között a hőmérsékletváltozást [1]. A vizsgálatokból felépíthető a nyomás és kerületi sebesség szorzatán alapuló $p \cdot v$ burkoló diagram, amely kijelöli a javasolt üzemi tartományt [2].

A próbatestekeket és később a fogaskerekeket számos technológiával elő lehet állítani. Jelen dolgozatban az FDM (Fused Deposition Modeling) -technológia által kinyomtatott a próbatestekeket használtunk. Az FDM-nek az előnye, hogy rendkívül sokat fejlődtek a próbatestek. [8]. Néhány filament esetén olyan mechanikai tulajdonságok érhetőek el, mintha az ötvözetlen alumínium lenne. Ebből is látszik, hogy van jövője az additívan gyártott fogaskereknek [4]. Meg kell azonban határozni, hogy milyen körülmények között érdemes őket használni és milyen célra [5]. A mérésnek az alábbiak a céljai:

- Hőterhelési viselkedés feltárása: additívan gyártott, 100% tömörségű, kontrollált rétegorientációjú polimer próbatestek hőmérséklet-emelkedésének vizsgálata különböző normálerő és frekvencia kombinációk esetén,
- $p \cdot v$ burkológörbe felállítás: a nyomás és kerületi sebesség szorzatából kísérleti burkoló görbe meghatározása, amely alapján meghatározható a javasolt

* PhD Hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép és-Terméktervezés Tanszék

**Adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép és-Terméktervezés Tanszék

***Egyetemi docens, Tanszékvezető Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép és-Terméktervezés Tanszék

üzemi terhelés és fordulatszám kombinációk fogaskerék-alkalmazásokhoz,

- geometriai paraméterek hatásának vizsgálata: a pin átmérő változtatásának hatása a hőmérséklet-válaszra és a $p \cdot v$ értékekre, ezek alapján összefüggéseket felállítani,
- anyagválasztás előszűrése: PLA, PETG és ABS próbatestek összehasonlítása (azonos geometria és mérési protokoll mellett), és a mérési eredmények alapján annak meghatározása, hogy mely anyag alkalmas további mérések elvégzésére.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZER

2.1. Próbatest geometria és gyártás

A mérés során három különböző anyagot vizsgáltunk PLA, PETG és ABS. A tárcsa és a pin anyaga megegyezett. A koptatás során mindig azonos anyagpárokkal dolgoztunk. Azonos beállítások lettek alkalmazva mindhárom anyag esetén. A pin magassága $h=6$ mm volt. Különböző átmérő sorozatokkal lett a mérés elvégezve [5,6,7,8,9,10 mm]. A réteg orientáció függőleges volt, a rétegnek a magassága pedig 0,2 mm. A kitöltési tényező 100 %-os volt.

2.2. Mérőberendezés ismertetése

Tárcsa: $\varnothing 130$ (mm), vastagság (t) $t=5$ (mm),
Mérőberendezés: Pin-on-Disk Tribométer (1. ábra),
Hajtómű: Ciklohajtómű, kimeneti fordulatszám ($n_{ki}=23,87$ rpm)
Adatgyűjtés: PMX típusú mérőerősítő, a mért értékek feldolgozása EVIDAS szoftver



1. ábra. Pin-on-Disk tribométer

A terhelést a látható rúdra helyezett súlyokkal állítjuk be. A tárcsa az acél korongra kerül, és csavarokkal rögzítjük. A pin a lineárisan megvezetett megfogóba kerül. A próbatestek belső átmérőjét úgy definiáltuk, hogy a megfogóba gyorsan, hézagmentesen és stabilan rögzíthetők legyenek. A méréshez felhasználtunk egy LM16 típusú Motovario frekvencia váltót, így a bemenő

fordulatszámot tetszőleges értékre tudjuk beállítani. Így egy a fordulatszám is egy plusz paraméter lesz, így nem csak a terhelés nagysága lesz a változó értékünk. A frekvencia váltót a motorral együtt láthatjuk a 2. ábrán. A hőmérséklet méréséhez fel lett használva egy ThermPro TP30 típusú infravörös hőmérő. A hőmérsékletet $\pm 1,5$ °C hibával. Ezt láthatjuk a 3. ábrán.



2. ábra. Motovario. LM16 frekvencia váltó



3. ábra. Infravörös digitális kijelzésű hőmérő

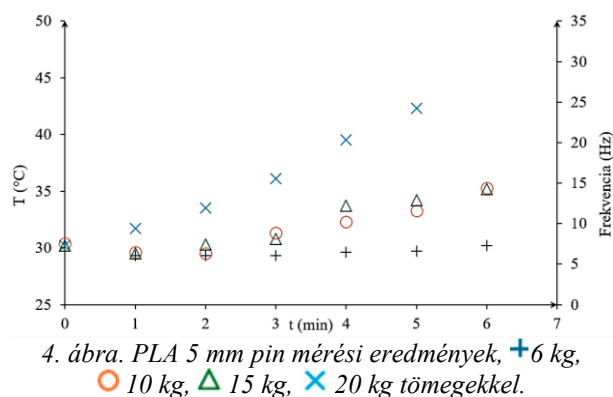
A mérés során először felhelyeztük a tömegeket és ezután 15 Hz frekvencián elindítottuk a motort. Majd percenként 5 Hz-es lépésként lett növelve a frekvencia, miközben a hőmérővel megkerestük a maximális hőmérséklet értékeket. A terhelés nem változott, csupán növeltük a frekvenciát. Amikor elértük a maximális frekvencia értéket, ezután visszaállítottuk a kezdeti 15 Hz-es frekvenciára. Ezután egy nagyobb tömeg lett ráhelyezve a rúdra és folytatódott a mérés. A mérés során azonban technikai okok miatt nem tudtunk 40 Hz frekvencia fölé menni. A terhelés során először 5 kg volt, melyet később fokozatosan növeltünk. A mérőberendezés maximálisan 30 kg-al (300 N) terhelhető. Miután egy mérési ciklus lefutott, az adatokat manuálisan és szoftveresen is dokumentáltuk.

2.3. Mérési eredmények

A mérés sorozatok során egyszer sem közelítettük meg a polimer anyagra jellemző üvegesedési hőmérsékletet, így a burkológörbét sem lehet még elkészíteni. Így a további mérések esetén érdemes kisebb átmérővel elvégezni a méréseket. Mert akkor kisebb felület és azonos terhelések esetén, hamarabb elérhetjük a határértékeket. A kiértékelés során minden egyes anyagpárhoz, egy-egy mérési adat lesz kiértékelve.

PLA:

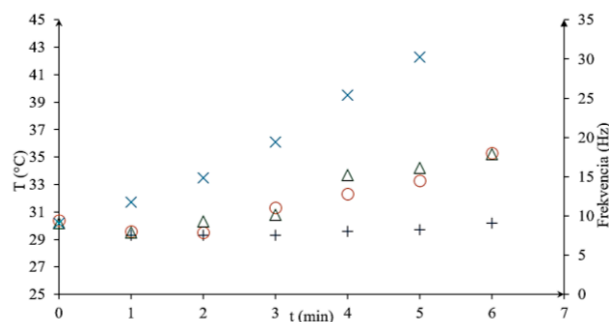
Először a PLA anyagból készült próbatestet vizsgáltuk. Azért ezzel kezdtünk, mert a PLA esetén tudjuk kikísérletezni a mérés alapjait. Az eredményeket ismerteti a 4. ábra. Azt a következtetést tudjuk levonni, hogy kis terhelés esetén a nagyobb fordulatszám sem igazán befolyásolja a hőmérséklet értékét. Azonban amennyiben jobban megterheljük, például 17 kg-akkor megfigyelhető, hogy nagyon gyorsan fog emelkedni a hőmérséklet. Ilyenkor azt tapasztaltuk, hogy nagyon gyorsan elkopott az alkatrész és a tárcsa deformációt is szenvedett.



4. ábra. PLA 5 mm pin mérési eredmények, + 6 kg, ○ 10 kg, △ 15 kg, × 20 kg tömegekkel.

PETG:

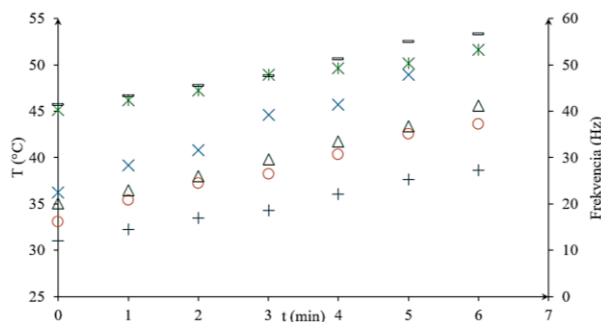
Az előzetes elvárás, hogy a PETG jobban fogja bírni a terhelést, mint a PLA. Ugyanis a PETG-t felszokták használni műszaki célokra is [6]. Az eredményeket ismerteti az 5. ábra. Azonban jelentős változást nem tapasztaltunk a két anyag között. Érdemes további méréseket elvégezni. A PETG azért lenne jó választás műszaki szempontból, mert könnyen nyomtatható, így célszerű az ideális üzemelési tartomány meghatározása. Másrészt a PETG esetén az üvegesedési $T_g=85\text{ °C}$ [10]. Látható, hogy az általunk mért értékek, meg sem közelítik ezt a hőmérsékletet. A későbbiekben úgy kell meghatározni mind a terhelést, mind a fordulatszámot, hogy meg tudjuk közelíteni ezt az értéket.



5. ábra. PETG 5 mm pin mérési eredmények, + 6 kg, ○ 10 kg, △ 15 kg, × 20 kg tömegekkel.

ABS:

Az ABS esetén a kiértékelésnél a 10 mm átmérőjű PIN-hez tartozó adatokat értékeljük ki. Azért erre esett a választás, mert ebben az esetben, elértük a gépnek a maximális megengedett terhelhetőségét, ami jelen esetben 30 kg. Azonban azt tapasztaljuk, hogy nem látunk semmilyen kiugró értéket, vagy közel exponenciálisan növekvő hőmérséklet értéket. A nyomtatott próbatest a terhelést jól bírta, kopásnak szinte nyoma sem volt. Meg sem közelítette az ABS üvegesedési hőmérsékletét, ami $T_g=95\text{ °C}$ [9]. Az eredményeket láthatjuk a 6. ábrán. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a további méréseknél érdemes lenne az ABS-re helyezni a hangsúlyt.



6. ábra. ABS 10 mm pin mérési eredmények, + 6 kg, ○ 10 kg, △ 15 kg, × 20 kg, * 25 kg, — 30 kg tömegekkel.

2.4. Próbatesteken tapasztalt eredmények:

A kísérletek alapján az alábbi következtetéseket tudjuk levonni:

PLA: Amennyiben növeltük a fordulatszámot és növeltük a terhelést, a PLA nem tudta elviselni a terhelést. Nagyobb terhelés esetén szinte azonnal elkapott, a tárcsán nagy mértékű deformációt tapasztaltunk.

PETG: Nagyobb terheléseket el tudott viselni, mint a PLA jobban bírta. Jobban bírta a terhelést, kisebb mértékű kopást tapasztaltunk, mint a PLA esetén egységnyi idő alatt. Azonban nagyobb terhelés és fordulatszám esetén azt tapasztaltuk, hogy a próbatest gyorsan elkopott.

ABS: A három anyag közül az ABS a leginkább műszaki polimer. Azt tapasztaltuk, hogy a kopás szinte elhanyagolható volt. Ilyenkor tudtuk a legnagyobb terhelést kifejteni a próbatestre. A motor frekvenciája itt volt a legmagasabb. Azonban a mérőberendezés korlátja miatt nem tudtuk nagyobb fordulatszámon mérni.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A méréshez három különböző fajtájú additív technológiával előállított próbatestet használtunk fel. Az alábbi következtetéseket tudjuk megtenni:

PLA: Nem igazán alkalmas komoly műszaki feladat ellátásra, inkább a geometria ellenőrzésére jó, mert könnyen nyomtatható.

PETG: Amennyiben az igénybevétel nem jelentős, akkor alkalmas lehet műszaki feladatok ellátására. Az sem elhanyagolható szempont, hogy viszonylag könnyen nyomtatható.

ABS: Ez a leginkább alkalmas anyag nagyobb terhelések elviselésére, azonban további mérésekre van szükség, hogy az optimális üzemelési tartományt meghatározzuk.

A mérési sorozatnak köszönhetően kaptunk egy bizonyos fajta visszacsatolást, a jövőbeni irányokról. Következő lépésként definiáljuk a paramétereket. Két csoportba soroljuk őket, egyrészt nyomtatási paraméterek, ezekből kell definiálni azokat, amik a legjobban befolyásolják az alkatrész mechanikai tulajdonságait. következő lépésként pedig azt vizsgáljuk, hogy miképpen befolyásolja a hőmérséklet, valamint a polimerek morfológiája az alkatrész terhelhetőségét.

4. SUMMARY

We used three types of additively manufactured polymer specimens in the measurements. Based on the current series the following preliminary conclusions can be drawn:

PLA: Generally not suitable for demanding engineering duties, better for geometry verification and quick prototyping due to easy printability.

PETG: Conditionally suitable for engineering tasks when loads are moderate, also relatively easy to print.

ABS: The most promising for higher loads among the tested materials. Further tests are required to delimit the optimal operating range.

The measurement campaign provides useful feedback for future work. As a next step, we will define the key parameters, grouped as follows. Printing parameters identify those that most strongly affect the mechanical properties (e.g., infill density, layer orientation, layer height, perimeter count). Material/thermal factors investigate how temperature and polymer morphology (e.g., crystallinity, T_g -related behavior) influence the load-carrying capacity of the parts.

5. IRODALOM

- [1] ASTM International (2023): ASTM G99-23: Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://www.astm.org/standards/g99>
- [2] Fraunhofer IST (2025.) Pin-on-Disk. Braunschweig: Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST. <https://www.ist.fraunhofer.de/en/expertise/analytic-s-testing-technology/pin-on-disk.html>
- [3] NETZSCH Analyzing & Testing (2025) ABS: Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Copolymer — Polymer database (DSC, $T_g \sim 95-105$ °C typical). Selb: NETZSCH.: <https://analyzing-testing.netzsch.com/en-US/polymers-netzsch-com/commodity-thermoplastics/abs-acrylonitrile-butadiene-styrene-copolymer>
- [4] Rogers, K (2025) 'Is anyone printing gears using metal additive manufacturing?', Gear Solutions Magazine. <https://gearsolutions.com/features/is-anyone-printing-gears-using-metal-additive-manufacturing/>
- [5] Kónya, G. (2024) 'Investigating the Impact of Productivity on Surface Roughness and Dimensional Accuracy in FDM 3D Printing', Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 52(2), pp. 128–133. <https://www.pp.bme.hu/tr/article/view/22952>
- [6] igus GmbH (2025) 3D-printed gears from igus: <https://www.igus.com/custom-parts-services/3d-printing/3d-printed-gear>
- [7] Dong, C. and Davies, I.J. (2024) 'Mechanical properties of continuous glass fibre-reinforced composites made by material extrusion', Progress in Additive Manufacturing, 9, pp. 2131–2141 <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-024-00566-4>
- [8] Ciobanu, R., Rizescu, C.I., Rizescu, D. and Grănescu, B. (2024) 'Surface Durability of 3D-Printed Polymer Gears', Applied Sciences, 14(6), 2531 <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/6/2531>
- [9] NETZSCH Analyzing & Testing (2025) LA: Polylactide (Polylactic Acid). Glass Transition Temperature: 45–65 °C (DSC) <https://analyzing-testing.netzsch.com/en-US/polymers-netzsch-com/commodity-thermoplastics/pla-polylactide-polylactic-acid>
- [10] BigRep (2025) PETG 3D Printing Filament Technical Data Sheet. T_g (DSC): 85 °C [PETG 3D Printing Filament - High Resistance Material | BigRep](https://www.bigrep.com/en/PETG-3D-Printing-Filament-High-Resistance-Material)

ÉRZELEMVEZÉRELT GENERATÍV MINTÁZAT, MINT MŰVÉSZETI ALKOTÁS

EMOTION-DRIVEN GENERATIVE PATTERN AS AN ARTISTIC CREATION

Dr. Trautmann Laura*

ABSTRACT

This paper presents Emotional Pattern Generator (EmPatGen) 2.0, an advanced model that combines fuzzy logic with linguistic association to generate geometric patterns driven by emotions. The updated system introduces a new input structure—Motion, Mood and Character—and integrates an emotion-lexicon-based module capable of deriving emotional profiles from textual sources such as poems. The case study based on the Hungarian children's poem "Nyuszi Gyuszi" demonstrates how linguistic and emotional cues can be transformed into visual compositions. EmPatGen 2.0 bridges engineering reasoning and artistic interpretation, enabling emotion-driven design processes across art, interior design, and product development.

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években az érzelmek és a mesterséges intelligencia kapcsolatát vizsgáló kutatások különös hangsúlyt kaptak a művészet, a design és a mérnöki tudományok területén [1].

A generatív rendszerek – amelyek algoritmusok segítségével képesek mintázatokat és formákat létrehozni – ma már nem pusztán technológiai eszközök, hanem érzelmi és kulturális jelentésrendszerek hordozói is.

Korábbi kutatásaim során kidolgoztam az Emotional Pattern Generator (EmPatGen) rendszert, amely fuzzy logikán alapulva képes volt különböző érzelemprofilokból geometriai mintázatokat előállítani [4][5].

Az EmPatGen 1.0 kezdetben ipari terméktervezési környezetben működött, azonban a módszer szimbolikus és esztétikai kimenetei messze túlmutattak ezen a kereten.

Jelen tanulmányban bemutatom a továbbfejlesztett EmPatGen 2.0 modellt, amely már nemcsak fuzzy alapú érzelemlékepezést valósít meg, hanem nyelvi-asszociációs értelmezést is alkalmaz.

A modell így képes szöveges bemenetektől – például versekből, vagy narratív szövegekből – automatikusan érzelemprofilot alkotni, majd ebből geometriai és színbeli mintázatot generálni.

Célom annak bemutatása, miként válhat egy mérnöki alapokon nyugvó fuzzy rendszer művészeti és

alkalmazott designeszközzé, amely érzelmeket és szimbólumokat jelenít meg geometriai struktúrákon keresztül.

2. AZ EMPATGEN 1.0 ÉS 2.0 KONCEPCIÓJA

2.1. Az EmPatGen 1.0 fuzzy modellje

Az EmPatGen 1.0 fuzzy alapú rendszer célja az volt, hogy különböző érzelemprofilokat geometriai mintázatok formájában reprezentáljon [4][5].

A modell három bemenettel dolgozott – Dinamika, Stílus és Orientáció – amelyek a designkommunikációban gyakori fogalmak, és a termékek vizuális jellemzőit (felületstruktúra, arányrendszer, formai ritmus) érzelmi kategóriákkal kötötték össze.

A fuzzy szabályrendszer a következő ellentétpárokat kezelte: Elegáns – Sportos, Klasszikus – Fiatalos és Nőies – Férfias.

Ezek az inputok különböző geometriai kimeneteket generáltak, mint például az amplitúdó (A), a geometriák oldalainak száma (n), vagy az eltolás (dSft).

Az EmPatGen 1.0 főként autópipari design-kutatási környezetben szolgált a formai arányok és érzelemérzet közötti összefüggések vizsgálatára.

2.2. Az EmPatGen 2.0 bemeneti rendszerének átalakulása

A továbbfejlesztett EmPatGen 2.0-ban a bemeneti struktúra pszichológiai alapokra épült, a Russell–Mehrabian-féle érzelemlkör dimenzióit alkalmazva [2][3].

A korábbi, formai jellemzőkre épülő kategóriák helyett három új, pszichológiailag értelmezhető fuzzy bemenet került bevezetésre (1. táblázat):

1. táblázat Az EmPatGen 2.0 bemeneti dimenzióinak új értelmezése

Új bemenet	Köznnyelvi skála	Fő jelentés
Mozgás (korábban: Dinamika)	Csendes ↔ Lendületes / Nyugodt ↔ Mozgékony	Az energia és aktivitás szintje, a ritmus gyorsasága.

* egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék

Új bemenet	Köznnyelvi skála	Fő jelentés
Hangulat (korábban: Stílus)	Szomorkás ↔ Derűs / Hagyományos ↔ Játékos	Az érzelm pozitív–negatív tónusa, a vizuális derűség és játékoság.
Karakter (korábban: Orientáció)	Lágy ↔ Erőteljes / Íves ↔ Szögletes	A vizuális formaerő, a kontúrok határozottsága és a geometriai élesség.

Az átalakítás során a fuzzy szabályrendszer struktúrája nem változott, de kibővült az output-dimenziók száma: a geometriai változók mellé színbeli paraméterek is kerültek, amelyek a vizuális érzelmkifejezéshez kulcsfontosságúak [6][7].

Ezáltal a rendszer képes egyaránt kezelni a formai (pl. hullám, eltolás) és a színbeli (pl. tónus, telítettség) érzelmi összetevőket, miközben a fuzzy szabálybázis egységes marad.

3. A NYELVI-ASSZOCIÁCIÓS ÉRTELMEZÉS KÉT SZINTJE

Az EmPatGen 2.0 a nyelvi értelmezést két szinten valósítja meg:

(1) a nyelvi-asszociációs modul a fuzzy bemeneteket állítja be,

(2) a nyelvi-asszociációs finomítás pedig a kimenetet korrigálja.

Ez a kettős feldolgozási lánc biztosítja, hogy a modell egyszerre tükrözze a szöveg érzelmi hangulatát és szimbolikus jelentéseit.

3.1. Nyelvi-asszociációs modul – bemenetek módosítása

A nyelvi-asszociációs modul a bemeneti fuzzy értékeket a szöveg érzelmi tartalma alapján állítja be.

A nyelvi-asszociációs feldolgozást egy mesterséges intelligencián alapuló nyelvi modul támogatja, amely képes a természetes nyelvi szövegeket érzelmi és szimbolikus mintázatokhoz kapcsolni.

A modul működése a ChatGPT (OpenAI, 2025) nyelvi-feldolgozó architektúrájára épül, amely nagyméretű szövegtörzsekben tanult szintaktikai és szemantikai összefüggések alapján képes érzelm-, asszociáció- és metafora-azonosításra [11][12].

Ezzel az EmPatGen 2.0 rendszere nemcsak fuzzy-logikai, hanem AI-alapú nyelvi-érzelmi feldolgozási réteggel is rendelkezik, amely képes a szöveges tartalmat közvetlenül leképezni a geometriai kimeneti paraméterekre.

Ehhez egy érzelmszótárt használ, amely az egyes szavakat pszichológiai dimenziókhoz rendeli [8][9].

A nyelvi-asszociációs modul működését egy konkrét példán, a „Nyuszi Gyuszi” című népi eredetű mondokán, gyermekversen keresztül mutatom be, amely a magyar kultúrában ismert, egyszerű szerkezetű és vizuálisan gazdag képi világot hordoz.

A vers nyelvi elemei jól alkalmasak az érzelmi–szimbolikus leképezés vizsgálatára, hiszen egyaránt tartalmaznak statikus (pl. „fekszik”) és dinamikus („pislant”) mozgásleírásokat, valamint szín- és formautalásokat („piros szem”, „bojt”, „fűl”). A szöveg tehát kiválóan illeszkedik a fuzzy–nyelvi modell teszteléséhez, mivel az érzelmi tónus és a képi metaforák egyaránt befolyásolják a bemeneti értékeket.

Nyuszi Gyuszi fekszik árokban,
Bojtos, hosszú füle van,
Kicsi piros szeme van.
Idenéz, odanéz, szétpislant.

A „Nyuszi Gyuszi” vers elemzése során az alábbi kulcsszavak hatottak a bemeneti értékekre (2. táblázat):

2. táblázat Nyelvi kulcsszavak és hatásuk a fuzzy bemenetekre

Kulcsszó	Módosítás	Indoklás
piros	Hangulat ↑↑ (+2)	Élénk, figyelemfelkeltő szín
szem / szeme	Karakter ↑ (+1)	Fókuszpont, figyelem, életérzet
fekszik	Mozgás ↓↓ (–2)	Nyugalom, statikus testhelyzet
pislant / szétpislant	Mozgás ↑ (+1)	Mikromozgás, finom aktivitás
fűl / bojt	Mozgás ↑ (+1)	Íves, hullámos asszociáció
árok / árokban	Karakter ↓↓ (–2)	Földközeli, visszafogott kompozíció

A kiinduló értékek (Mozgás = 5, Hangulat = 5, Karakter = 5) alapján a módosítások után a javasolt bemenetek: $u = [5, 7, 4] \rightarrow [Mozgás = 5, Hangulat = 7, Karakter = 4]$.

3.2. Nyelvi-asszociációs finomítás – kimenet korrekciója

A második szint a fuzzy kimenetet finomhangolja.

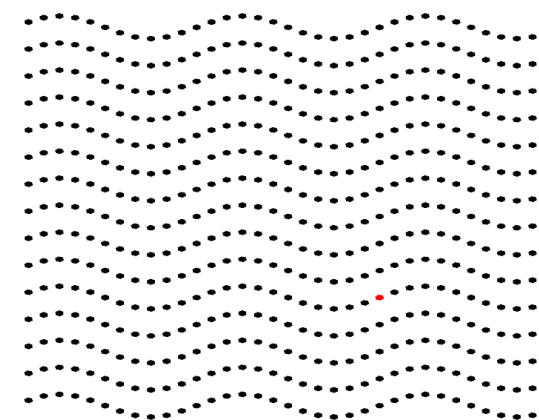
A szövegben található szimbolikus elemek (pl. „piros szem”) konkrét vizuális beavatkozásokat generálnak: színtkiemelést, lokális pontsűrítést vagy alaktorzítást.

A finomítási réteg posztprocesszálo korrekciókat hajt végre a generált képen, a fuzzy szabályok módosítása nélkül.

A bemeneti értékek továbbra is: Mozgás = 5, Hangulat = 7, Karakter = 4. A modell fuzzy (alap) és finomított kimeneteinek paraméterei az alábbi táblázatban láthatók (3. táblázat).

3. táblázat Az EmPatGen 2.0 fuzzy (alap) és nyelvi-asszociációs finomítás utáni paraméterei a „Nyuszi Gyuszi” esettanulmányban

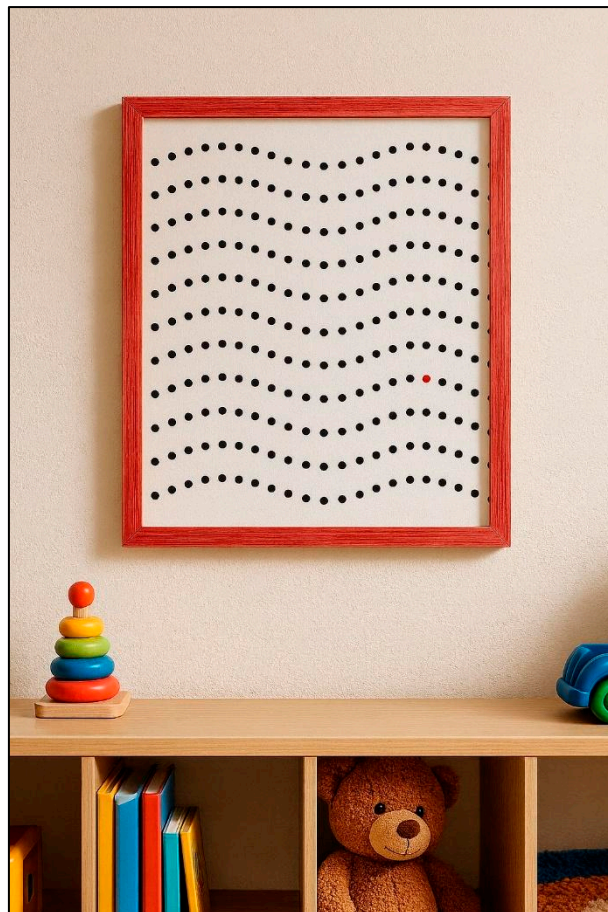
Paraméter	Jelentés	Fuzzy-only (1.0)	Finomított (2.0)	Változás indoka
r	Egyenletes skála	0.72	0.72	
e	Nem egyenletes skála	1.12	1.12	
n	Oldalak száma	6.00	6.00	
rot	Forgatás	0.26	0.26	
VStS	Sorok távolsága	4.43	4.43	
A	Amplitúdó (hullám magassága)	2.90	3.19	„fűl”, „bojt” → íves, lengő formák → +10% hullámamplitúdó
dRng	Dinamikus tartomány	5.41	6.41	„pislant”, „szétpislant” → kisebb mozgás → +1 egység
dSft	Dinamikus eltolás	3.00	2.08	„fekszik” → vízszintesebb, nyugodtabb kompozíció
dScU	Egyenletes skálázás	1.02	1.02	
dSnU	Nem egyenletes skálázás	1.12	1.12	
dRot	Dinamikus forgatás	0.26	0.26	
useRedDot	Színes akcentus („piros szem”)	–	aktív (1 elem)	„piros szem” → egy rácspont piros kitöltéssel



1. ábra. „Nyuszi Gyuszi” esettanulmányhoz készült mintázat MatLab szoftverrel

4. LÁTVÁNYTERV ÉS KÖRNYEZETBE ILLESZTÉS

A generált mintázat alkalmazhatóságát óvodai környezetben demonstrálom: a kompozíció fali képként, piros kerettel jelenik meg, igazodva a tér játékos vizuális karakteréhez.



2. ábra. „Nyuszi Gyuszi” esettanulmányhoz készült mintázat környezetbe helyezve

5. VALIDÁCIÓ ÉS KITEKINTÉS

Az EmPatGen 2.0 validációját interaktív kiállítási formában tervezem megvalósítani, amely során a látogatók által megadott szövegekből generált mintázatok érzelmi hatása és esztétikai befogadása is mérhető lesz [1][10].

A rendszer potenciálja azonban túlmutat a művészeti kontextuson.

Alkalmazási területei lehetnek többek között:

- irodai és közösségi belső terek designja,
- építészeti és városi környezetek vizuális mintázatai,
- vállalati arculattervezés és termékdesign,
- textil- és ruházati mintázatok,

- papíráruk és grafikai termékek,
- járműipari belső design és lézertextúrák,
- adaptív okosfelületek,
- épületakusztikai mintázatok.

Ezek az irányok azt mutatják, hogy az EmPatGen 2.0 nem csupán egy generatív esztétikai modell, hanem egy mérnöki alapokon nyugvó, érzelmvezérelt tervezési eszköz, amely képes hidat képezni az emberi érzelmek és a gépi kreativitás között.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk az EmPatGen 2.0 rendszert mutatja be, amely a fuzzy logikát és egy AI-támogatott nyelvi-asszociációs modult egyesítve érzelmekből és szövegekből (pl. versekből) generál geometrikus mintázatokat. Az EmPatGen 2.0 a bemeneteket három, köznyelvben is jól értelmezhető dimenzióra alakítja (Mozgás, Hangulat, Karakter), miközben a kimenetek a korábbi geometriai paraméterek mellett színbeli jellemzőkkel is bővülnek. A „Nyuszi Gyuszi” esettanulmány részletesen bemutatja a nyelvi modul kétlépcsős működését: (1) érzelemszótáras beállítás a bemeneteken, majd (2) szimbolikus finomítás (pl. „piros szem” akcentus) a kimeneten. A cikk közli a 5–7–4 bemenethez tartozó fuzzy és finomított paramétereket, és javaslatot tesz a kiállítás-alapú validációra. Az EmPatGen 2.0 alkalmazási potenciálja kiterjed a művészetre, belsőépítészetre, termék- és felületdesignra, textil- és grafikai tervezésre, valamint ipari lézertextúrákra.

7. SUMMARY

This paper introduces EmPatGen 2.0, a system that fuses fuzzy logic with an AI-assisted linguistic association module to generate geometric patterns from emotions and textual prompts (e.g., poems). Inputs are re-framed into three intuitive dimensions—Motion, Mood, and Character—while outputs extend classic geometric parameters with color features. The “Nyuszi Gyuszi” case study details the two-stage language pipeline: (1) emotion-lexicon-based input setting and (2) symbolic post-refinement (e.g., a “red eye” accent) on the output. The paper reports the fuzzy-only and refined parameters for the 5–7–4 inputs and proposes exhibition-based validation. EmPatGen 2.0 shows broad applicability across art, interior environments, product and surface design, textiles and graphics, and industrial laser texturing.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A TKP-6-6/PALY-2021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

9. IRODALOM

- [1] AGUDO U., ARRESE M., LIBERAL K. G., MATUTE H.: Assessing Emotion and Sensitivity of AI Artwork, *Frontiers in Psychology*, Vol. 13, 2022.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.879088>
- [2] [MEHRABIAN A., RUSSELL J. A.: *An Approach to Environmental Psychology*, MIT Press, 1974.
- [3] RUSSELL J. A.: A Circumplex Model of Affect, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 39, No. 6, 1980, pp. 1161–1178.
<https://doi.org/10.1037/h0077714>
- [4] TRAUTMANN L.: The Concept of EmPatGen (Emotional Pattern Generator), *SN Applied Sciences*, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2765-5>
- [5] TRAUTMANN L., PIROS A., BOTZHEIM J.: Application of the Fuzzy System for an Emotional Pattern Generator, *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 19, 2020, Article 6930.
<https://doi.org/10.3390/app10196930>
- [6] PICARD R. W.: *Affective Computing*, MIT Press, 1997.
- [7] YU Y.-C.: Research on Emotion-Based Inspiration Mechanism in Art Creation by Generative AI, *Mathematics*, Vol. 13, No. 16, 2025, Article 2597.
<https://doi.org/10.3390/math13162597>
- [8] MOHAMMAD S. M., TURNEY P. D.: NRC Emotion Lexicon, *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 2013.
<https://doi.org/10.4224/21270984>
- [9] CAMBRIA E., WHITE B.: Jumping NLP Curves: A Review of Natural Language Processing Research, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2014.
<https://doi.org/10.1109/MCI.2014.2307227>
- [10] HO A. G., SHIM K.: Investigating the Emotional Responses to Generative Art, *Archives of Design Research*, Vol. 37, No. 3, 2024, pp. 65–79.
<https://doi.org/10.15187/adr.2024.07.37.3.65>
- [11] OPENAI: GPT-5 Technical Report – Multimodal Large Language Model Capabilities, 2025.
- [12] BENDER E. M., KOLLER A.: Climbing towards NLU: On Meaning, Form, and Understanding in Large Language Models, *Proceedings of the ACL*, 2020, pp. 5185–5198.
<https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.463>

JEGYZET

CONTENTS

1. Judit Albert, Dr. Ágnes Takács: <i>Mathematical modeling and energy efficiency optimization in in-creasing the efficiency of biogas plants</i>	5	18. Krisztián István Kocsis, Márton Boronyák, Roland Szabó, András Dr. Hány: <i>Methodology for testing the thickness uniformity of food industry films</i>	76
2. Alaa Alrudhan, Gabriella Vadászné Dr. Bognár: <i>Thermal performance of aluminium porous media metal foam</i>	9	19. J. Balázs, Kriston Károly Dr. Jálcs: <i>Efficiency test of the TDOA method on L-shape metal plate</i>	80
3. Kristóf Bányai, Sándor Kovács, Gabriella Vadászné Dr. Bognár: <i>Experimental optimization of Ni-B coating parameters</i>	13	20. Géza Németh: <i>Planar and spatial models and kinematic diagrams in effective engineering education</i>	84
4. Klára Benyó: <i>The psychological background of the education of generation Z</i>	19	21. Ferenc Dr. Orbán, Sándor Fenyvesi: <i>The effect of earthquake on tank dimensions</i>	88
5. János Dr. Bihari, Imre Marada: <i>Measuring the heating of small plastic gears</i>	23	22. Attila Dr. Piro, Laura Dr. Trautmann: <i>Postgraduate teaching of specialized CAD/CAM engineers</i>	92
6. Sándor Döbrentei, Péter Tamás Dr. Zwierczyk: <i>Methodology of critical plane determination</i>	27	23. Lili Suller, Gabriella Vadászné Dr. Bognár, József Dr. Fajtli: <i>Literature summary on the phenomenon of sphere settling in non-newtonian media</i>	96
7. Csaba Dr. Dömötör: <i>The late invention of the wheel and the lack of natural patterns as a technological constraint</i>	31	24. Ferenc János Dr. Szabó: <i>Optimization of a collision situation</i>	100
8. Dávid Dömötör, Dániel Tóth, Róbert Dávid Farkas, Dániel Horváth, András Dr. Hány: <i>Experiences of welding simulations</i>	35	25. Zoltán Dr. Bihari, Sándor Imre Szabó: <i>Construction of the involute by different methods</i>	104
9. Katreen Ebrahim, Szávai Dr. Szabolcs: <i>The evolution of lumbar total disc replacement (LTDR): Research trends of device design, biomechanics, and clinical outcomes</i>	39	26. Dávid Szalánczi, Péter Dr. Bencs: <i>Behavior of solar panels under different wind conditions (cooling effect)</i>	108
10. Péter Fodor, Zoltán Dr. Bihari: <i>Automation of combustion air control for wood stoves</i>	43	27. Sándor Dr. Szirbik: <i>Modal analysis of a ground-mounted photovoltaic structure under wind loading</i>	112
11. Viktor Dr. Gotthard: <i>Application of dxf techniques during machine design</i>	47	28. Tamás Dr. Markovits, Ferenc László Dr. Varga, Gábor Dr. Szébenyi, Bálint Fehér: <i>Examination of bond strength in the case of polymer composites and 3D printed metal fasteners</i>	116
12. Dávid Dr. Gönczi: <i>Determination of stresses and displacement in orthotropic radially graded disks</i>	51	29. Levente Béla Zudor, Péter Tamás Dr. Zwierczyk: <i>Experimental use of an amsler dual-wheel instrument for analysing railway wheel-rail contact</i>	120
13. Dávid Dr. Gönczi: <i>A study on the finite element modelling of lifting lugs</i>	55	30. Péter Tamás Dr. Zwierczyk: <i>Possible failure modes in the wheel-rail connection caused by modern rail anti-slip and anti-spin devices - A review</i>	124
14. Csaba Dr. Heteyi: <i>Correction factor for comparing linear and nonlinear static simulation results of bearing press-fit</i>	59	31. Marcell Zsibók, Ernő Zsolt Dr. Baka, Péter Dr. Horák: <i>Experimental pin-on-disk study on additively manufactured polymers</i>	128
15. Pálma Kapitány, Tamás Dr. Szabó, László Dr. Rónai: <i>Development of a special-purpose measurement system for electromagnet modeling</i>	63	32. Laura Dr. Trautmann: <i>Emotion-driven generative pattern as an artistic creation</i>	132
16. Ferenc Áron Kasó, Péter Tamás Dr. Zwierczyk: <i>Evolution of structural integrity assessment of steam generator heat transfer tubes in pressurized water reactors</i>	67		
17. László Dr. Kátai, István Nagy, Péter Dr. Gárdonyi: <i>3D modeling of the ankle joint</i>	72		

GÉP

The technical, business, investment, sales, research and development, market information journal of
THE SCIENTIFIC ASSOCIATION FOR MECHANICAL ENGINEERING

President of Editorial Board:

Dr. Gabriella Vadászné Bognár

General Editor:

Dr. Csaba Dömötör

Deputy editors-in-chief:

József Vesza

Deputy:

Dr. György Ábrahám

Dr. István Barkóczy

Dr. Lajos Borbás

Dr. Árpád Czifra

Dr. József Danyi

Dr. Gusztáv Fekete

Dr. Péter Horák

Dr. Sándor Horváth

Dr. Béla Illés

Dr. Endre Jánosi

Dr. Károly Jármay

Dr. József Kakuk

Dr. Gábor Kalácska

Dr. Márk Lelkes

Dr. János Kanócz

Dr. László Könözy

Dr. Tamás Mankovits

Dr. Márton Máté

Dr. Ferenc Orbán

Dr. Gyula Patkó

Dr. Attila Piros

Dr. László Soltész

Dr. István Szabó

Dr. Szabolcs Szávai

Dr. János Száva

Dr. Ferenc Szigeti

Dr. Imre Timár

Dr. Zoltán Weltsch

DEAR READER,

This journal, which you hold in your hands, summarises the material of the development and research works presented in the professional lectures of the XLI Seminar of Machine Designers and Product Developers. The authors submitted 40 presentations for the conference held on November 13-14, 2025. Most of the presentations and some other publications, a total of 32 articles, are published here in printed form. We would like to thank the authors and reviewers for their work.

Allow me, Dear Reader, to briefly introduce the history of the National Seminar of Machine Designers and Product Developers. At the national secretary meeting of the Scientific Association for Mechanical Engineering in town Téglyás in August 1972, took part 234 delegates from 110 companies and institutions, mostly senior specialists in construction activities, dealt with industrial construction work and its organization. The meeting dealing with construction and design process was initiated by prof. Dr. Zénó Terplán, prof. Dr. József Magyar and Dr. Rezső Száday chief designer, at that time.

The first meeting was held on 22-24 August, 1973 with the participation of the staff of the Department of Machine Elements of the University of Miskolc. The meeting was opened by Professor Dr. Jenő Varga, chief designer of the GANZ Company, emphasizing that there was no such event in Hungary before. After the 1975 event, the Conference of Leading Designers was transformed into the National Seminar of Machine Designers in 1977.

In keeping with our traditions, several industry professionals will be represented at this year's conference. The new research and development projects presented that the world is constantly changing. Today's priority topics include developments centered around the additive manufacturing technologies, the environmental protection or research into modern practices of product development and machine construction. In parallel, the continuous development of traditional technologies supporting new directions is also taking place.

The organizers of the seminar understood that the engineers at the beginning of their career and BSc, MSc and PhD students are also happy to attend regular professional gatherings and would be happy to publish their research and development works. The articles are published in printed form on journal GÉP and on the gepujsag.hu website, in our case with the support of the Scientific Association for Mechanical Engineering and Gazdász Ltd. Thanks for that.

Dr. Csaba Dömötör
Secretary of the Seminar

Managing Editor: Dr. Csaba Dömötör • Editor's address: H-3515 Miskolc, Egyetemváros

Phone: +36-46/565-111 (12-90) • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: http://www.gepujsag.hu • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP

https://www.posta.hu/ugyfelszolgalat/webform/hirlap, via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262,

or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest. Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14. • T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 • ISSN 0016-8572 (Printed) • ISSN 3057-9473 (Online)

The published articles have been reviewed. • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary

XLI. Conference of Machine and Product Designers

Miskolc, 13th to 14th November 2025 (Thursday to Friday)

– PROGRAM –

Date/time: 13th November 2025 (Thursday) 10.00-12.20 (Plenary session)
Location: Headquarters of MAB (3. Erzsébet square, Miskolc), Auditorium (I. floor)
Chairman: Dr. JÁLICS Károly

10:00 10:05 Dr. JÁLICS Károly associate professor University of Miskolc: **OPENING**
10:10 10:30 Prof. Dr. ORBÁN Ferenc professor emeritus Pécsi Tudomány Egyetem, Mérnöki és Smart Technológiák Intézete, Gépészmérnöki Tanszék: **Earthquake design. The effect of earthquake on tank dimensions.**
10:40 11:00 Dr. GOTTHARD Viktor egyetemi adjunktus BME, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Application of dxf techniques during machine design**
11:10 11:30 KIS-MIHÁLY Csaba Sales Engineer Nord-Lock Group: **Bolt fastening solutions Nord-Lock**
11:40 12:00 KEVICZKI Domicián Projektfelelős Gyémánt-Pirazol Kft.: **Design features of a modular system for drying sewage sludge generated on seagoing ships**
12:00 12:20 Questions, informal conversation
12:45 13:45 Lunch and coffee break for registered participants of the seminar

Date/time: 13th November 2025 (Thursday) 14.00-18.00 (1. Professional section)
Location: Headquarters of MAB (3. Erzsébet square, Miskolc), Auditorium (I. floor)
Chairman: Dr. TAKÁCS Ágnes, Dr. GOTTHARD Viktor

14:00 14:10 ÁRVAI Tamás PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Analysis of mechanical wave propagation in vehicle structures**
14:20 14:30 Dr. HETYEI Csaba Szimulációs mérnök ZF Hungária Kft.: **Correction factor for comparing linear and nonlinear static simulation results of bearing press-fit**
14:40 14:50 Dr. ZWIERCZYK Péter adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Possible failure modes in the wheel-rail connection caused by modern rail anti-slip and anti-spin devices – A review**
15:00 15:10 ZUDOR Levente PhD hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem: **Experimental use of an amsler dual-wheel instrument for analysing railway wheel-rail contact**
15:20 15:30 Döbrentei Sándor PhD hallgató BME, Gépészmérnöki kar, Gép- és Terméktervezés tanszék: **Methodology of critical plane determination**
15:40 16:00 Coffee break
16:00 16:10 Dr. DÖMÖTÖR Csaba egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **The late invention of the wheel and the lack of natural patterns as a technological constraint**
16:20 16:30 ALBERT Judit PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Mathematical modeling and energy efficiency optimization in in-creasing the efficiency of biogas plants**
16:40 16:50 MARADA Imre PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Measuring the heating of small plastic gears**
17:00 17:10 SZALÁNCZI Dávid PhD hallgató Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék: **Behavior of solar panels under different wind conditions (cooling effect)**
17:20 17:30 KRISTON József Balázs PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Efficiency test of the TDOA method on L-shape metal plate**
17:40 17:50 BESENYEI István PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Compatibility test between aluminium profiles and groove nuts**
18:00 18:10 BODNAR Dávid PhD hallgató Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet: **Detecting abnormal vibrations in an industrial robot arm using machine learning**
18:20 18:30 DOBRÓSI Henrietta BSc hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **The story of harvesting**

Date/time: 13th November 2025 (Thursday) 14.00-18.00 (2. Professional section)
Location: Headquarters of MAB (3. Erzsébet square, Miskolc), Deák hall (I. floor)
Chairman: Dr. LOVAS László, Dr. SARKA Ferenc

14:00 14:10 Dr. GÖNCZI David adjunktus Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet: **A study on the finite element modelling of lifting lugs**
14:20 14:30 Dr. GÖNCZI David adjunktus Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet: **Determination of stresses and displacement in orthotropic radially graded disks**

14:40 14:50 Katreen EBRAHEM PhD student University of Miskolc, Institute Machine and Product Design: **The evolution of lumbar total disc replacement (LTDR): Research trends of device design, biomechanics, and clinical outcomes**
15:00 15:10 Alrudhan ALAA PhD student University of Miskolc, Institute Machine and Product Design: **Thermal Performance of Aluminum Porous Metal Foam**
15:20 15:30 Karam SHAYYA PhD student, Ferenc Sarka associate professor University of Miskolc, Institute Machine and Product Design: **The effect of the nozzle diameter to the accuracy of the FDM printed gears**
15:40 16:00 Coffee break
16:00 16:10 Dr. SARKA Ferenc egyetemi docens, Dr. Bolló Betti egyetemi docens, Pedro Baiao hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar: **Simulation and experimental investigation of the effect of macrostructural modifications of a specimen on thermal conductivity**
16:20 16:30 DOMJÁN János Márk, PÉTER Máté, TÖRÖK Olivér, BORONYÁK Ferenc, Dr. HÁRY András, Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.: **Challenges and aspects of Industry 5.0 in mechanical engineering design**
16:40 16:50 DÖMÖTÖR Dávid, TÓTH Dániel, FARKAS Róbert, HORVÁTH Dániel, Dr. HÁRY András, Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.: **Experiences of welding simulations**
17:00 17:10 KOCSIS Krisztián István, BORONYÁK Márton, SZABÓ Roland, Dr. HÁRY András, Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.: **Methodology for testing the thickness uniformity of food industry films**
17:20 17:30 SULLER Lili PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Literature summary on the phenomenon of sphere settling in non-newtonian media**
17:40 17:50 VENCZEL Luca BSc hallgató, Sarka Ferenc egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Designing a wooden hair ornament**
18:00 18:10 SZABÓ Sándor Imre PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Construction of the involute by different methods**
18:20 18:30 KASÓ Ferenc Áron óraadó tanár Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Evolution of structural integrity assessment of steam generator heat transfer tubes in pressurized water reactors**

Date/time: 14th November 2025 (Friday) 9:00-12.30 (3. Professional section)
Location: Headquarters of MAB (3. Erzsébet square, Miskolc), Auditorium (I. floor)
Chairman: Dr. PIROS Attila, Dr. DÖMÖTÖR Csaba

9:00 9:10 Dr. PIROS Attila egyetemi docens Neumann János Egyetem GAMF Kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék: **Postgraduate teaching of specialized CAD/CAM engineers**
9:20 9:30 Dr. TAKSÁS Balázs órnagy egyetemi docens Nemzeti Köszolgálati Egyetem, Pénzügyi és Katonai Közlekedési Tanszék: **The impact of the 4th Industrial Revolution on warfare and the new paradigm of defense innovation**
9:40 9:50 Dr. SZIRBIK Sándor egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet: **Modal analysis of a ground-mounted photovoltaic structure under wind loading**
10:00 10:10 Dr. TRAUTMANN Laura egyetemi adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Emotion-driven generative pattern as an artistic creation**
10:20 10:30 Dr. SZABÓ Ferenc egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Optimization of a collision situation**
10:40 10:50 Coffee break
11:00 11:10 BORSODI Eszter PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Multidimensional product evaluation**
11:20 11:30 ZSIBÓK Marcell PhD hallgató Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Gép- és Terméktervezés Tanszék: **Experimental Pin-On-Disk study on additively manufactured polymers**
11:40 11:50 NÉMETH Géza adjunktus Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Planar and spatial models and kinematic diagrams in effective engineering education**
12:00 12:10 FODOR Péter tervező mérnök, MSc hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Automation of combustion air control for wood stoves**
12:20 12:30 BANYAI Kristóf BSc hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet: **Experimental optimization of Ni-B coating parameters**
12:40 12:50 CLOSING WORD

