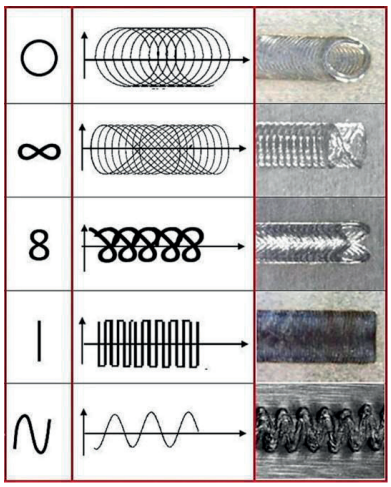
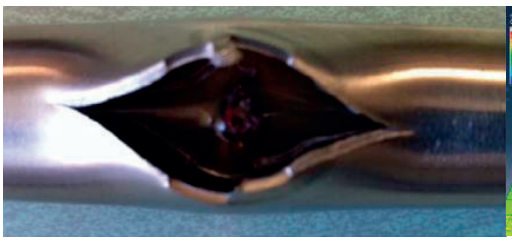
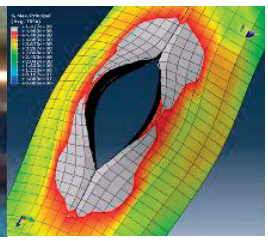
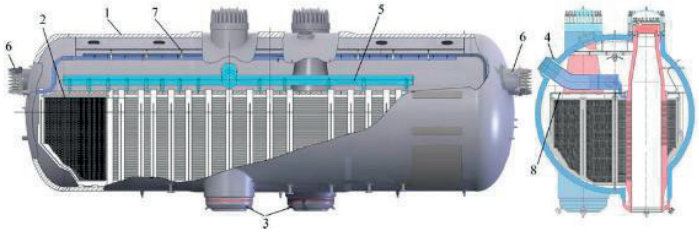
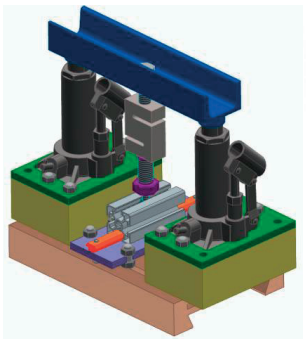
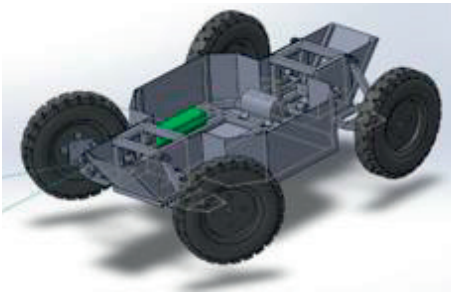
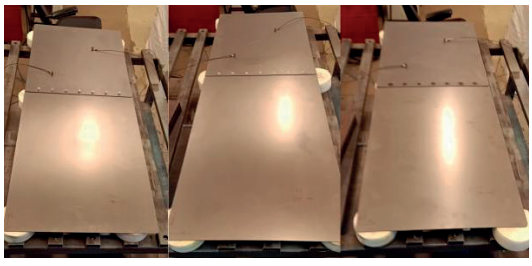
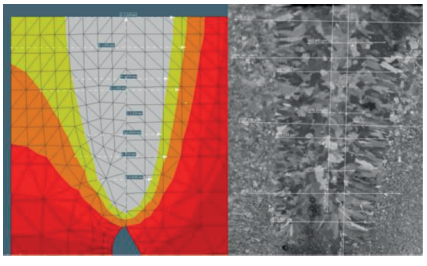
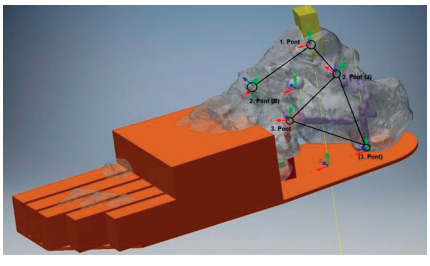
GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA





GÉPTERVEZŐK ÉS TERMÉKFEJLESZTŐK XLII. SZEMINÁRIUMA

2026/3-4.

136 oldal
LXXVII. évfolyam

Géptervezők és Termékfejlesztők XLII. Szemináriuma

Miskolc, 2026. november 12 (csütörtök)

– P R O G R A M –

Időpont: **2026.11.12. csütörtök 10:00-12:20 (Plenáris ülés)**
Helyszín: **MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3., Díszterem (I. em.)**
Elnök: **Dr. Jálics Károly**

10:00 10:05 *Dr. Jálics Károly intézetigazgató egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **MEGNYITÓ**

10:10 10:30 *Dr. Szeghő Krisztina adjunktus BME, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **A mérnök mint digitális karmester – tervezés a mesterséges intelligencia korszakában**

10:40 11:00 *Metál Attila fejlesztési részlegvezető Knorr-Bremse Hungária Kft.:* **A digitális transzformáció evolúciós lépcsője: modellalapú, rajzmentes tervezési és gyártási folyamatlánc megvalósítása a Knorr-Bremse-nél**

11:10 11:30 *Dr. Háry András ügyvezető, Szabó Roland fejlesztő mérnök TC-Zone Mérnöki Kft.:* **A terméktervezési folyamat versenyképességi kérdései**

11:40 12:00 *Dr. Lovas László egyetemi docens BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék:* **Módszer feltárás nélküli csőbélelés alkalmazhatóságának vizsgálatára**

12:00 12:20 Kérdések, kötetlen beszélgetés

12:45 13:45 Ebéd és kávészünet a szemináriumra regisztrált résztvevőinek

Időpont: **2026.11.12. csütörtök 14:00-18:30 (1. Szakmai szekció)**
Helyszín: **MAB Székház, Miskolc, Erzsébet tér 3., Díszterem (I. em.)**
Elnök: **Dr. Takács Ágnes, Dr. Gotthard Viktor**

14:00 14:10 *Dr. Szirbik Sándor egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet:* **Görgőkárosodás hatása a szállítószalag és egy pályát tartó rácsos hídváz vizsgálatánál**

14:20 14:30 *Dr. Gönczi Dávid egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet:* **Radiálisan gradiens görbült rudak hőrugalmasságtani megoldásai feszültségfüggvények segítségével**

14:40 14:50 *Mikolás János oktató ZSZC Ganz Ábrahám Technikum:* **Oktatási célú mobil robot platform fejlesztésének tapasztalatai**

15:00 15:10 *Mózer András tanszéki mérnök Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **Egyedi terhelő modul koncepcionális tervezése lineáris aktuátorok számára**

15:20 15:30 *Dr. Szabó Ferenc János ny. egyetemi docens Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Globális folyamatok vizsgálata szigmoid görbékkel**

15:40 16:00 Kávészünet

16:00 16:10 *Dr. Marada Imre adjunktus Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **3D nyomtatott 0,3 mm modulú műanyag fogaskerekek pontossága**

16:20 16:30 *Szalai Miklós László tanársegéd Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék:* **Relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám hatása a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött PA66 polimerben**

16:40 16:50 *Kovách Katalin demonstrátor Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **MI támogatott vizuális koncepciótervezés egy háztartási gombatermesztő rendszer fejlesztésén keresztül**

17:00 17:10 *Zsibók Marcell PhD hallgató Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **Additívan gyártott PCTG és PETG-PTFE anyagpárok tribológiai vizsgálata Pin-on-Disk módszerrel**

17:20 17:30 *Borsodi Eszter PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **A generatív tervezés alkalmazási területeinek és a termékjellemzőkre gyakorolt hatásának elemzése**

17:40 17:50 *Besenyei István tanársegéd, PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Profilhorony vizsgáló berendezés tervezése**

18:00 18:10 *Árvai Tamás PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **A hegesztés, ragasztás és mechanikus kötések hatása a hullámterjedésre gépjármű karosszériákban**

18:20 18:25 ZÁRSZÓ

Időpont: **2026.11.12. csütörtök 14:00-18:30 (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 *Shaaya Karam Dheyaa Jirjees PhD student Institute of Machine and Product Design:* **Effect of Infill Pattern on the Strength of 3D-Printed Spur Gears**

14:20 14:30 *Deeb Tamim PhD student MATE University, Doctoral school of Mechanical Engineering:* **Vibration Analysis in non rotary machines**

14:40 14:50 *Alrudhan Alaa PhD student Mechanical Engineering/Design of machines and structures:* **Design and Manufacturing of Porous Aluminum Pipes Using Selective Laser Melting**

15:00 15:10 *Wanous Batoul PhD student Institute of Machine and Product Design:* **Factors influencing the creep properties of 3D printed plastic parts – a literature review**

15:20 15:30 *Junqueira Inácio PhD student Institute of Manufacturing Science, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics:* **Investigation of Cutting Force, Surface Roughness, and Cylindricity during Turning of C45 Steel**

15:40 16:00 Kávészünet

16:00 16:10 *Dömötör Dávid duális mérnök hallgató Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.:* **A szimuláció szerepe és tapasztalatai a hegesztési technológia kialakítása során**

16:20 16:30 *Fekécs Bálint duális mérnök hallgató Széchenyi István Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.:* **Elektromos kisjármű tervezési tapasztalatai**

16:40 16:50 *Rohály Áron PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Magyarországi tervezőiskolák legutóbbi tervezésmódszertani kutatásai**

17:00 17:10 *Bata Zsófia BSc hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Többfunkciós bútorok fejlődéstörténete**

17:20 17:30 *Béres Máté BSc gépészmérnök hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **PET-G alapanyagú FDM nyomtatott alkatrészek kitöltési geometriáinak mechanikai vizsgálata**

17:40 17:50 *Spekker Dorina egészségügyi mérnök MSc, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Személyre szabott koponyaortézis tervezése és additív gyártása**

18:00 18:10 *Szabó Sándor Imre PhD hallgató Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Anizotróp anyagmodell építése korlátozott anyagadatokból FDM-nyomtatott PLA vizsgálatához**

18:20 18:25 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. Jármai Károly
Dr. Kakuk József
Dr. Kalácska Gábor
Dr. Lelkes Márk
Dr. Kanócz János
Dr. Könözsy 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 XLII. Szemináriumának szakmai előadásain ismertetett fejlesztő-kutató munkák anyagát foglalja össze írásos formában. A szerzők 28 előadással jelentkeztek a 2026. november 12-én rendezett konferenciára. Az előadások túlnyomó része, illetve néhány további publikáció, mindösszesen 28 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 főkonstruktőr.

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 főkonstruktőre nyitotta meg, kiemelve, hogy ilyen rendezvény hazánkban korábban nem volt. A Vezető Konstruktőrök 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. Szalai Miklós László, Dr. Takács János, Dr. Kónya Gábor, Hansághy Pál: A RELATÍV PÁRATARTALOM ÉS A CSAVARBEHAJTÁSI FORDULATSZÁM HATÁSA A MENETKISZAKADÁSI NYOMATÉKRA FRÖCCSÖNTÖTT PA66 POLIMERBEN 5

2. Dr. Szilárd Jaskó, Dr. Tamás Ruppert: A 21. SZÁZAD IPARI OPERÁTORÁNAK DEFINÍCIÓJA 12

3. Árvai Tamás, Dr. Jálics Károly: A HEGESZTÉS, RAGASZTÁS ÉS MECHANIKUS KÖTÉSEK HATÁSA A HULLÁMTERJEDÉSRE GÉPJÁRMŰ KAROSSZÉRIÁKBAN 18

4. Béres Máté, Dr. Bihari Zoltán: PET-G ALAPANYAGÚ FDM-ELJÁRÁSSAL NYOMTATOTT ALKATRÉSZEK KITÖLTÉSI GEOMETRIÁINAK MECHANIKAI VIZSGÁLATA 22

5. Besenyei István, Dr. Bihari Zoltán: PROFILHORONY VIZSGÁLÓ BERENDEZÉS TERVEZÉSE 26

6. Borsodi Eszter, Dr. Takács Ágnes Judit: A GENERATÍV TERVEZÉS ALKALMAZÁSI TERÜLETEINEK ÉS A TERMÉKJELLEMZŐKRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK ELEMZÉSE 30

7. Tamim Deeb, Dr. László Kátai: FORGÓ ÉS EGYENESVONALÚ HALADÓ MOZGÁST VÉGZŐ TALAJMŰVELŐ SZERSZÁMOK REZGÉSEI: A JELKARAKTERISZTIKA KÜLÖNBSÉGEI ÉS JELFELDOLGOZÁSI KÖVETKEZMÉNYEI 34

8. Dömötör Dávid, Nagy Dávid, Tóth Dániel, Horváth Dániel, Dr. Háry András: A SZIMULÁCIÓ SZEREPE ÉS TAPASZTALATAI A HEGESZTÉSI TECHNOLÓGIA KIALAKÍTÁSA SORÁN 40

9. Fekécs Bálint, Marai Ádám, Nyirő Ákos, Dr. Háry András: ELEKTROMOS OFF-ROAD KISJÁRMŰ TERVEZÉSI TAPASZTALATAI 45

10. Forrai Sándor, Dr. habil. Szabó P. Balázs: A MÉHFÉSZKEK ÉS A MESTERSÉGES KAPTÁRAK HŐHATÉKONYSÁGI ELEMZÉSE 51

11. Dr. Gönczi Dávid: RADIÁLISAN GRADIENS GÖRBÜLT RUDAK HŐRUGALMASSÁGTANI MEGOLDÁSAI FESZÜLTSÉGFÜGGVÉNYEK SEGÍTSÉGÉVEL 55

12. Kasó Ferenc Áron, Dr. Zwierczyk Péter Tamás: GŐZFEJLESZTŐ-CSÖVEK SZERKEZETINTEGRITÁSI VIZSGÁLATÁNAK MI-TÁMOGATOTT KIEGÉSZÍTÉSE 59

13. Dr. Kátai László, Dr. Mező Róbert, Dr. Gárdonyi Péter, Nagy István: BOKA ÍZÜLET MOZGÁSANALÍZISE KINEMATIKAI SZERKEZETTEL 64

14. Kovách Katalin, Dr. Gotthard Viktor: MI TÁMOGATOTT VIZUÁLIS KONCEPCIÓTERVEZÉS EGY HÁZTARTÁSI GOMBATERMESZTŐ RENDSZER FEJLESZTÉSÉN KERESZTÜL 68

15. Dr. Lovas László, Dr. Égető Csaba: MÓDSZER FELTÁRÁS NÉLKÜLI CSŐBÉLELÉS ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATÁRA 72

16. Dr. Marada Imre: 3D NYOMTATOTT 0,3 MM MODULÚ MŰANYAG FOGASKEREKEK PONTOSSÁGA 76

17. Mikolás János, Konkoly István Junior, Dr. Bartók Roland, Hus Sándor, Dr. Háry András: OKTATÁSI CÉLÚ MOBIL ROBOT PLATFORM FEJLESZTÉSÉNEK TAPASZTALATAI 80

18. Mózer András, Dr. Farkas Zsolt József: EGYEDI TERHELŐ MODUL KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE LINEÁRIS AKTUÁTOROK SZÁMÁRA 84

19. Rohály Áron, Dr. Takács Ágnes, Dr. Jálics Károly: MAGYARORSZÁGI TERVEZŐISKOLÁK LEGUTÓBBI TERVEZÉSMÓDSZERTANI KUTATÁSAI 88

20. Dr. Siposs István: VOLT EGYSZER EGY STÚDIÓ 94

21. Spekker Dorina, Dr. Bihari Zoltán: SZEMÉLYRE SZABOTT KOPONYAORTÉZIS TERVEZÉSE ÉS ADDITÍV GYÁRTÁSA 95

22. Szabó Kristóf: ALKATRÉSZ TERVEZÉSE ÉS FEJLESZTÉSE SZIMULÁCIÓVEZÉRELT MÓDSZEREKKEL 99

23. Szabó Roland, Fehér Bálint, Dr. Háry András, Dr. Tóth Csilla: A TERMÉKTERVEZÉSI FOLYAMAT VERSENYKÉPESSÉGI KÉRDÉSEI 103

24. Szabó Sándor Imre, Dr. Bihari Zoltán: ANIZOTRÓP ANYAGMODELL ÉPÍTÉSE KORLÁTOZOTT ANYAGADATOKBÓL FDM-NYOMTATOTT PLA VIZSGÁLATÁHOZ 109

25. Dr. Szeghő Krisztina Katalin: A MÉRNÖK MINT DIGITÁLIS KARMESTER – TERVEZÉS A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA KORSZAKÁBAN 113

26. Dr. Szirbik Sándor, Dr. Virág Zoltán: GÖRGŐKÁROSODÁS HATÁSA A SZÁLLÍTÓSZALAG ÉS EGY PÁLYÁT TARTÓ RÁCSOS HÍDVÁZ VIZSGÁLATÁNÁL 117

27. Zsibók Marcell, Dr. Zwierczyk Péter Tamás: ADDITÍVAN GYÁRTOTT PCTG ÉS PETG-PTFE ANYAGPÁROK TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATA PIN-ON-DISK MÓDSZERREL 121

28. Inácio Manuel Junqueira, Dr. Csaba Felhő: A FORGÁCSOLÓERŐ, A REZGÉS, A FELÜLETI ÉRDESSÉG ÉS A HENGERESSÉG VIZSGÁLATA C45 ACÉL ESZTERGÁLÁSA SORÁN 127

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.1

A RELATÍV PÁRATARTALOM ÉS A CSAVARBEHAJTÁSI FORDULATSZÁM HATÁSA A MENETKISZAKADÁSI NYOMATÉKRA FRÖCCSÖNTÖTT PA66 POLIMERBEN

EFFECT OF RELATIVE HUMIDITY AND SCREWDRIVING SPEED ON THREAD STRIPPING TORQUE IN INJECTION-MOLDED PA66 POLYMER

Szalai Miklós László, Dr. Takács János**, Dr. Kónya Gábor***, Hansághy Pál*****

ABSTRACT

A csavarkötések teherbírását alapvetően befolyásolja a menetkialakítás és a terhelési körülmények. Jelen vizsgálat célja a csavarbehajtási fordulatszám hatásának elemzése a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött PA66 polimer alapanyagú minták esetén. A mintákat a vizsgálatok előtt különböző relatív páratartalom mellett kondicionáltuk, majd a csavarozást eltérő fordulatszámokon végeztük el, és meghatároztuk a kialakult menetek tönkremeneteli nyomatékát.

Az eredmények alapján a fordulatszám hatása a menetkiszakadási nyomatékra kimutatható, azonban mértéke más vizsgált paraméterekhez képest korlátozott. A mérési eredmények enyhén csökkenő trendet mutatnak a fordulatszám növekedésével, amely a súrlódási viszonyok és az anyag lokális deformációs viselkedésének változásával magyarázható. Az alacsonyabb fordulatszámok esetén nagyobb menetkialakulási ellenállás és ezáltal nagyobb kiszakadási nyomaték figyelhető meg.

A vizsgálatok rámutatnak arra, hogy a csavarbehajtási fordulatszám nem elsődleges, de nem elhanyagolható technológiai paraméter a csavarkötések terhelhetőségének szempontjából, míg a kondicionálási páratartalom meghatározó szerepet játszik a csavarkötések terhelhetőségének alakulásában. Az eredmények hozzájárulnak a műanyag csavarkötések technológiai optimalizálásához és a megfelelő folyamatparaméterek kiválasztásához.

1. BEVEZETÉS

Manapság a műanyag alapanyagok egyre szélesebb körű alkalmazása a gépiparban és a járműiparban jelentősen megnövelte a csavarkötések szerepét a polimer anyagok esetében is. A fröccsöntött polimerek, különösen a poliamid alapú anyagok, kedvező mechanikai tulajdonságaik és feldolgozhatóságuk miatt gyakran kerülnek felhasználásra. Felhasználásuk kiterjed többek között burkolati elemekre, rögzítő- és tartószerkezetekre, elektromos csatlakozóházakra, ventilátorházakra, valamint különböző gépegységek kisebb igénybevételű szerkezeti alkatrészeire. Ezen alkalmazásokban gyakran követelmény az oldható kötés kialakítása, amelyet költséghatékony módon menetformázó csavarokkal valósítanak meg [1].

A csavarral létrehozott menetek költséghatékony és rugalmas megoldást biztosítanak, azonban teherbírásuk nagymértékben függ a menetkialakítás körülményeitől. A vizsgált kötésekben alkalmazott menetformázó csavarok forgácsleválasztás helyett hidegalakítással hozzák létre a menetet, ahol az anyag lokális képlékeny deformációja és a súrlódási viszonyok együttesen határozzák meg a menet kialakulását [2] [3].

A csavarkötések viselkedését műanyagok esetében számos tényező befolyásolja, többek között a geometria, az anyag mechanikai tulajdonságai és a technológiai paraméterek. A szakirodalom elsősorban a furatméret és az anyagjellemzők hatásával foglalkozik, míg a csavarbehajtás dinamikus paramétereinek, mint a fordulatszám hatása kevésbé vizsgált [4].

A fordulatszám ugyanakkor közvetlenül befolyásolja a menetkialakulást, a súrlódási viszonyokat és az anyag lokális deformációját, ezáltal hatással lehet a menet teherbírására és tönkremeneteli mechanizmusára. A poliamid anyagok esetében további fontos tényező a nedvességtartalom, amely jelentősen módosítja az anyag mechanikai jellemzőit, ezáltal befolyásolva a csavarkötések viselkedését [5] [6].

Jelen kutatás célja a csavarbehajtási fordulatszám hatásának vizsgálata a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött PA66 polimer anyagban, különböző

** doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.; műszaki ügyintéző, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, 6000 Kecskemét Izsáki út 10.*

*** prof.em., Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Gépjárműtechnológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*

**** adjunktus, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, 6000. Kecskemét Izsáki út 10.*

***** doktorandusz, Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, 1088 Budapest, József körút 6.; tanársegéd, Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, 6000 Kecskemét Izsáki út 10.*

páratartalom mellett kondicionált minták esetén. A vizsgálat során a fordulatszám hatását a kialakult menet teherbírására kísérleti úton elemeztük, kiemelve ennek a paraméternek a jelentőségét a csavarkötések technológiai optimalizálása szempontjából [7] [8].

2. KÍSÉRLETTERVEZÉS

A kísérletsorozat összeállításának célja egy olyan vizsgálati elrendezés kidolgozása volt, amely egyrészt jól reprezentálja az ipari szerelési körülményeket, másrészt lehetőséget biztosít a csavarkötések viselkedését meghatározó főbb tényezők elkülönült értékelésére. Ennek megfelelően a vizsgálati metodika a teljes technológiai folyamatot lefedte, a minták előkészítésétől és kondicionálásától kezdve a csavarkötés létrehozásán át egészen a tönkremeneteli jellemzők meghatározásáig.

A vizsgálatsorozat középpontjában a PA66 polimer alapanyag nedvességi állapotának változása, valamint a csavarbehajtási fordulatszám szerepe állt. Különös tekintettel ezek hatására a menet kialakulására és végső teherbírására. A csavarbehajtás hatására bekövetkező tönkremenetel a menet kiszakadásával jelentkezett, amelyhez tartozó maximális nyomatékot menetkiszakadási nyomatékként értelmeztük. A kísérletek során a minták meghatározott relatív páratartalmú környezetben történő kondicionálást követően kerültek vizsgálatra, miközben a csavar geometriai és anyagi jellemzői változatlanok maradtak. A másik változó paramétert a csavarbehajtás fordulatszáma jelentette, így lehetőség nyílt annak hatásának célzott elemzésére a kialakuló menet mechanikai jellemzőire, kontrollált környezeti feltételek mellett.

2.1. Vizsgált anyagok és kötőelemek

PA66 polimer komponens: A vizsgálatok során alkalmazott próbatestek egy ipari felhasználásból származó, fröccsöntött PA66 alapanyagú alkatrészből készültek, amely elektromos kapcsolóegységének tartószerkezeti elemeként szolgál. Ezt az anyagválasztást a PA66 kedvező mechanikai tulajdonságai, jó feldolgozhatósága, valamint széles körű ipari elterjedtsége indokolja. A vizsgálatokhoz felhasznált minták azonos gyártási tételből származtak, és egyazon fröccsöntési ciklus során, egymást követően kerültek legyártásra. Ennek köszönhetően a feldolgozási feltételek és az ebből adódó anyagszerkezeti sajátosságok közötti eltérés elhanyagolhatónak tekinthető. A mintaválasztás így lehetővé tette a fröccsöntési technológiából eredő szórás minimalizálását, biztosítva, hogy a mért különbségek elsődlegesen a kondicionálási állapot és a vizsgált technológiai paraméterek hatására vezethetők vissza. A csavarkötés kialakítása során a műanyag komponens speciális geometriája révén egyben alátétként is funkcionált. Így a csavarkötés kialakítása során a két PA66 komponens között egy hálózati kábel került befogásra, amely a kötési zónában kompresszió alá került, és a szerelési konfiguráció részét képezte. A furat zsákfurat kialakítású, amelynek mélységi mérete meghaladja a csavar behajtási hosszát, ugyanakkor átmérője a csavar névleges külső átmérőjével egyezik meg. Ez a kialakítás biztosítja a menetformázás reprodukálható körülményeit és az üzemi alkalmazásokhoz hasonló kötési konfigurációt.

Csavar komponens: A csavarkötések kialakításához közepes széntartalmú, bórötvözésű acélból készült, galvanikusan horganyzott felületű kötőelemet használtunk. A csavar 20MnB4 alapanyagú, 9.8 szilárdsági osztályba tartozik, geometriai kialakítása és anyagminősége megfelel az ipari szabványok követelményeinek, ezáltal biztosítva a vizsgálatok során a reprodukálható és összehasonlítható kötéskialakulást. A csavar és a polimer komponens párosítása a gyakorlatban széles körben használt menetformázó kötési megoldást reprezentál, így a kapott eredmények közvetlenül értelmezhetők ipari alkalmazások szempontjából. A csavar REMFORM II típusú, trilobuláris keresztmetszetű menetformázó geometriával rendelkezik, amely a menetet anyagleválasztás nélkül, hideg képlékeny alakítással hozza létre. A kialakításból adódóan a csavarbehajtás során mérsékelt radiális deformációsállapot alakul ki, miközben a kötés nagy kihúzási ellenállással rendelkezik. Ez a geometria különösen alkalmas műanyag és könnyűfém komponensek esetében, ahol a menetkialakítás a lokális anyagdeformáció révén valósul meg.

2.2. Vizsgálati berendezések és eszközök

A vizsgálatok során használt berendezések kiválasztásánál elsődleges szempont volt a megfelelő mérési pontosság és ismételhetőség biztosítása, valamint az ipari körülményekhez közeli mérési feltételek kialakítása. A kísérletek megvalósításához a polimer minták nedvességtartalmának beállítására és meghatározására, valamint a csavarkötések menetkiszakadási nyomatékának mérésére alkalmas berendezéseket használtunk.

A kondicionálást megelőzően a minták előszárítása Nabertherm TR 240 típusú kemencében történt. Annak érdekében, hogy a kezdeti nedvességtartalom egységes és alacsony szintre csökkenjen, biztosítva a további kondicionálási lépések reprodukálhatóságát.

A minták kondicionálása Ascott CC-100iP típusú klímakamrában történt, amely biztosította a levegő relatív páratartalmának és hőmérsékletének szabályozott, stabil beállítását.

A minták nedvességtartalmát TA Instruments Discovery TGA Q5000 típusú termogravimetriás analizátor segítségével határoztuk meg. A termogravimetriás vizsgálat (TGA) lehetővé teszi a PA66 minták nedvességtartalmának nagy pontosságú meghatározását, a nedvességhez kapcsolódó tömegveszteség elkülönítésével az anyag termikus

bomlásától, valamint biztosítja az eredmények szakirodalmi összehasonlíthatóságát.

A csavarkötések kialakítása és a menetkiszakadási nyomaték mérése Atlas Copco POWER FOCUS 8 vezérlőegységgel, IRTT-B 5-I06 nyomatékmérővel, valamint ES21-07-I06-PS típusú elektromos csavarozóval történt, TX15×50 bitfej alkalmazásával. A rendszer lehetővé tette a különböző fordulatszámok beállítását és a csavarbehajtás során fellépő nyomatékértékek pontos mérését és digitális rögzítését. A mérések minden esetben azonos berendezés-, adat- és paraméterbeállítások mellett zajlottak, csökkentve a mérési környezetből származó szórást.

A használt berendezések együttese biztosította a polimer nedvességi állapota és a menetkiszakadási nyomaték közötti összefüggések megbízható vizsgálatát, miközben a kialakított mérési elrendezés az ipari szerelési körülményekhez jól közelítő feltételeket biztosított.

2.3. Vizsgálati és beállított paraméterek

A kísérletsorozat során kétváltozós kísérlettervet alkalmaztunk, amelyben fő változó a relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám volt. A csavar geometriai és anyagjellemzői, a csavarozási technológia egyéb paraméterei, valamint a mérési környezet jellemzői állandó értéken kerültek rögzítésre. Ez a kísérleti megközelítés lehetővé tette a relatív páratartalom, a fordulatszám és a menetkiszakadási nyomaték közötti összefüggések egyértelmű értelmezését.

A vizsgálatokat megelőzően a minták 24 órán keresztül 80 °C hőmérsékleten kerültek előszárításra.

A minták kondicionálása szabályozott klímakamrában történt 25%, 40%, 50%, 60% és 75% relatív páratartalom mellett, 23 °C hőmérsékleten. Ezt követően három napig 25% relatív páratartalmú környezetben kondicionáltuk őket. A magasabb páratartalmi szintek közötti átállás során minden mérési lépcső között 48 órás kondicionálási időt biztosítottunk, a relatív páratartalom fokozatos növelése mellett. Minden egyes páratartalmi szinten három mintán történtek mérések, így a teljes vizsgálatsorozat során összesen 60 mérési eredmény került meghatározásra, átlag- és szórásértékek számításával. A csavarbehajtási fordulatszámok: 558, 681, 805 és 930 1/min értékekre kerültek beállításra.

A TGA mérések során a hevítő kemence gyors felfűtését a JUMP parancs alkalmazásával biztosítottuk, amely lehetővé tette a minta 170 °C hőmérsékletre történő minél gyorsabb felmelegítését. A mérés során a tömegveszteség időfüggvényét rögzítettük, és a nedvességtartalom meghatározása a görbe stabilizálódásának szakaszában, mintegy 50 perc elteltével történt, amikor a tömegváltozás mértéke már elhanyagolható volt. A vizsgálatok során különös figyelmet fordítottunk a minták tömegének egységességére, annak érdekében, hogy a tömegveszteségből számított nedvességtartalom összehasonlítható és reprodukálható legyen.

A menetkiszakadási nyomaték meghatározása minden esetben azonos mérési eljárással és berendezéssel történt, biztosítva az eredmények összehasonlíthatóságát az eltérő kondicionálási állapotok között. A kapott adatok alapján értékeltük a nedvességi állapot és a fordulatszám hatását, valamint a csavarkötések mechanikai viselkedését.

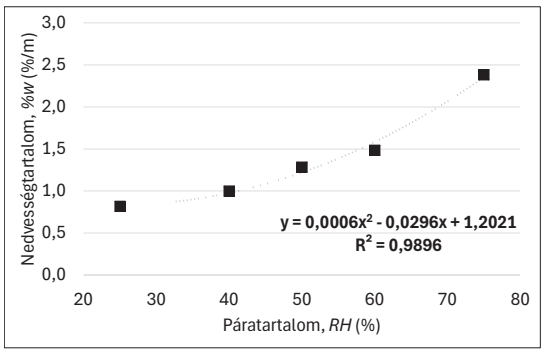
3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A kísérletsorozat során kapott mérési eredmények lehetővé tették a relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám hatásának részletes vizsgálatát a menetkiszakadási nyomaték alakulására. A kiértékelés során a kapott átlagértékeket és szórásokat elemeztük, különös tekintettel a trendek meghatározására és a vizsgált paraméterek közötti összefüggések feltárására.

A következőkben a relatív páratartalom által meghatározott nedvességi állapot változását, majd a csavarbehajtási fordulatszám hatását külön-külön, azt követően pedig egymással összefüggésben értékeljük a menet kialakulására és a kötés teherbírására gyakorolt hatásuk alapján.

3.1. Nedvességtartalom mérések eredményei

A nedvességtartalom-mérések eredményei az 1. ábra alapján igazolták, hogy a PA66 alapanyagú minták nedvességfelvétele szoros összefüggést mutat a kondicionálás során alkalmazott relatív páratartalommal (RH). A vizsgált tartományban (25-75% RH) a minták nedvességtartalma közel monoton növekedést mutatott. Az egyes kondicionálási állapotokhoz jól elkülöníthető nedvességi szintek tartoznak. Alacsony relatív páratartalom (25%) mellett a nedvességtartalom alacsony szinten stabilizálódott, míg magasabb páratartalom esetén (75%) a nedvességtartalom többszörösére növekedett.



1. ábra. TGA-mérések eredményei a relatív páratartalom függvényében

Megfigyelhető, hogy a nedvességtartalom növekedése nem lineáris a relatív páratartalom függvényében: alacsonyabb tartományban (25-40% RH)

a görbe növekedési üteme kisebb, míg magasabb (>60%) páratartalomnál jelentősen megnövekszik.

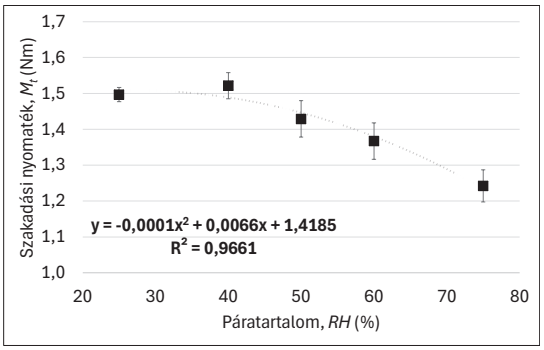
A jelenséget a PA66 anyag nedvességfelvételének nemlineáris jellege idézi elő. Alacsonyabb relatív páratartalom esetén a vízmolekulák elsősorban a polimer láncok poláris csoportjaihoz kötődnek (pl. hidrogénkötések révén), és a szabad kötőhelyek száma korlátozott, ami a nedvességtartalom lassabb növekedését eredményezi. Magasabb relatív páratartalomnál a kötőhelyek telítődése után a víz egyre nagyobb arányban az amorf tartományokban oldódik, illetve klaszterképződés is kialakulhat, amely a nedvességtartalom gyorsabb növekedését eredményezi. Emellett a növekvő nedvességtartalom következtében fokozódik a polimer láncok mobilitása, ami elősegíti a további vízfelvételt. Ennek következtében a magasabb páratartalom-tartományban a nedvességtartalom növekedése meredekebb görbével jellemezhető [9].

A poliamid anyagok higroszkópos viselkedése során a vízmolekulák diffúzióval jutnak be az amorf tartományokba, és kölcsönhatásba lépnek a polimer láncok poláris csoportjaival. A relatív páratartalom növekedésével nő a környezet vízaktivitása, amely elősegíti a nagyobb egyensúlyi nedvességtartalom kialakulását az anyagban. Ez a folyamat szoros összefüggésben áll a polimer-víz kölcsönhatásokkal és a diffúziós egyensúly kialakulásával [10].

A meghatározott nedvességtartalom-értékek megfelelő alapot szolgáltattak a további vizsgálatokhoz, különösen a menetkiszakadási nyomaték kiértékeléséhez. A kialakuló nedvességi állapotok lehetővé tették annak vizsgálatát, hogy a polimer nedvességfelvétele milyen mértékben befolyásolja a polimer-fém csavarkötések mechanikai viselkedését, ezáltal megalapozva a következő alfejezetben bemutatott eredmények értelmezését [11].

3.2. Menetszakadási nyomaték mérések eredményei

A menetkiszakadási nyomaték mérések eredményei a 2. ábra alapján egyértelmű összefüggést mutattak a PA66 alapanyag nedvességi állapota és a csavarkötések mechanikai viselkedése között. A vizsgált tartományban a menetkiszakadási nyomaték a relatív páratartalom növekedésével szignifikáns csökkenést mutatott.



2. ábra. Menetszakadási nyomaték mérések átlagértékei a relatív páratartalom függvényében

Alacsony nedvességi állapot mellett a csavarkötések nagyobb merevséget és magasabb terhelhetőséget mutattak, míg a nedvességtartalom növekedésével a csökkenő anyagszilárdság és növekvő láncmobilitás következtében a menet teherbírása mérhetően romlott.

A 25% és 75% relatív páratartalom közötti tartományban a menetkiszakadási nyomaték átlagértéke megközelítőleg 15-30% között csökkent.

A mérési eredmények szórása magasabb nedvességtartalmú állapotok esetén növekedést mutatott, ami a polimer fokozódó viszkoelasztikus viselkedésére, valamint a menetkialakulás folyamatának nagyobb érzékenységére utal. Ez a jelenség ipari szempontból különösen jelentős, mivel azonos meghúzási feltételek mellett is a kötésminőség nagyobb ingadozását eredményezheti [12].

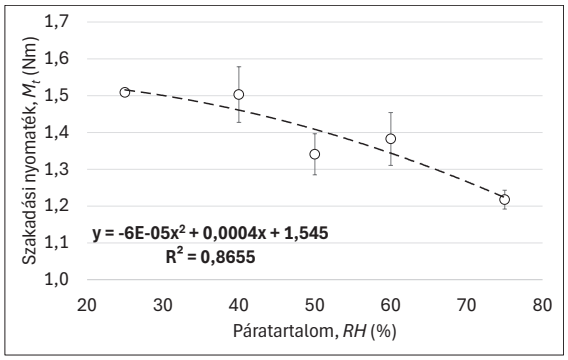
A mérési eredmények igazolták, hogy a polimer nedvességi állapota jelentősen befolyásolja a polimer-fém csavarkötések kialakulását és reprodukálhatóságát. Az eredmények alapján a kizárólag nyomatékalapú szabályozás változó környezeti feltételek mellett nem minden esetben biztosít stabil kötésminőséget [10] [11].

3.3. Fordulatszámok beállításának hatásai

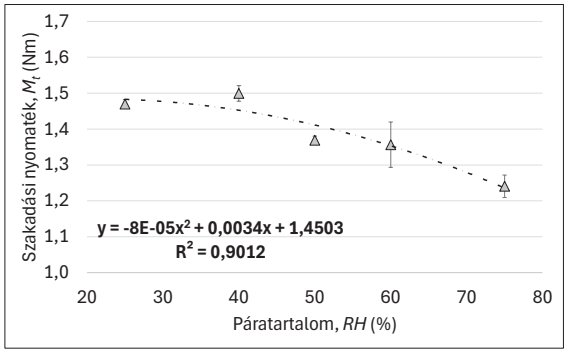
A menetkiszakadási nyomaték alakulását vizsgálva a különböző csavarbehajtási fordulatszámok mellett megállapítható, hogy a fordulatszám hatása a vizsgált tartományban kimutatható, azonban mértéke a relatív páratartalom hatásához képest mérsékeltebb.

A vizsgált fordulatszám-tartományban (558-930 1/min) a menetkiszakadási nyomaték általában 5-10% között csökkent a fordulatszám növekedésével. A különböző fordulatszámok hatása minden kondicionálási állapot mellett hasonló trendet mutatott, azonban a különbségek kisebbek voltak, mint a relatív páratartalom esetében. Ez megerősíti, hogy a fordulatszám másodlagos, finomhangoló paraméterként befolyásolja a kötés teherbírását.

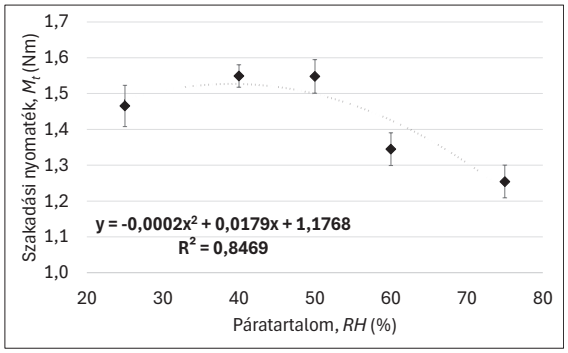
A 3. ábra, 4. ábra, 5. ábra és 6. ábra eredményei alapján az alacsonyabb fordulatszámok mellett a menetkiszakadási nyomaték jellemzően magasabb értékeket vett fel, míg a fordulatszám növekedésével a nyomaték enyhe csökkenése volt megfigyelhető. A tendencia a különböző kondicionálási állapotok esetében hasonló lefutást mutatott, ugyanakkor a változás mértéke a nedvességi állapottól is függött.



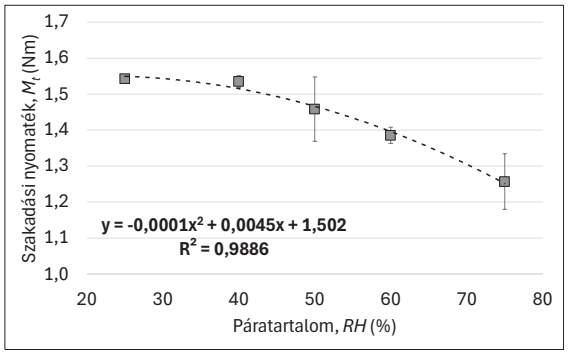
3. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (558 1/min)



4. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (681 1/min)



5. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (805 1/min)



6. ábra. Menetszakadási nyomaték relatív páratartalom függvényében (930 1/min)

A jelenség hátterében a menetformázás során érvényesülő deformációs és súrlódási viszonyok állnak. Alacsonyabb fordulatszám esetén a deformációs folyamat hosszabb idő alatt megy végbe, amely elősegíti a polimer anyag nagyobb mértékű lokális alakváltozását és kedvezőbb érintkezési viszonyok kialakulását. Ezzel szemben magasabb fordulatszámnál a rövidebb alakítási idő és a megváltozó súrlódási feltételek kisebb mértékű menetkialakulást és alacsonyabb kiszakadási nyomatékot eredményezhetnek [2] [10].

A mérési eredmények szórása a fordulatszám növekedésével enyhe növekedést mutatott, ami arra utal, hogy nagyobb sebesség mellett a menetkialakítás folyamata érzékenyebbé válik a lokális anyagtulajdonságokra és a súrlódási viszonyokra. Ez a hatás különösen magasabb nedvességi állapotok esetén jelentkezett markánsabban.

A csavarbehajtási fordulatszám a menetkiszakadási nyomatékot befolyásoló másodlagos, de nem elhanyagolható technológiai paraméter. Hatása elsősorban a menetformázás dinamikáján keresztül érvényesül, és különösen a nedvességi állapottal együtt értelmezve jelentős a csavarkötések stabilitásának szempontjából [3] [5].

3.4. A vizsgált paraméterek együttes hatása

A kísérleti eredmények együttes értékelése során megállapítható, hogy a menetkiszakadási nyomaték alakulását a relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám külön-külön és együttesen is befolyásolják. A vizsgált tartományban a relatív páratartalom hatása dominánsnak bizonyult, míg a fordulatszám elsősorban másodlagos, módosító jelleggel befolyásolta a kötés teherbírását.

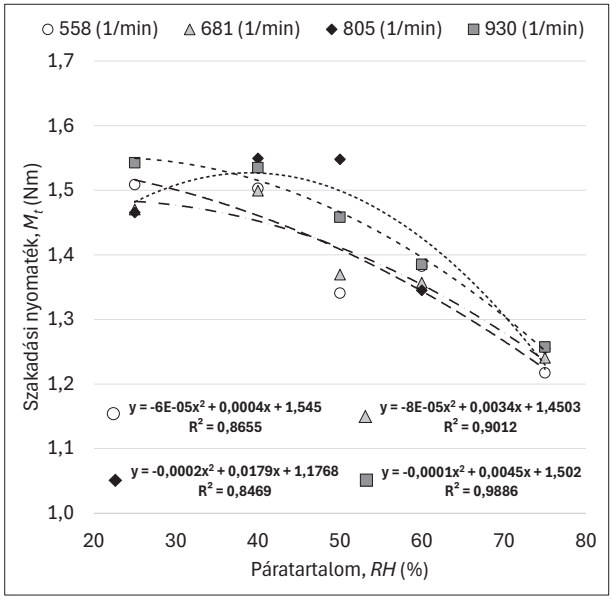
Alacsonyabb nedvességi állapot mellett a fordulatszám hatása kevésbé volt kifejezett, a menetkiszakadási nyomaték értékek viszonylag stabilan alakultak a vizsgált fordulatszám-tartományban. Ezzel szemben magasabb relatív páratartalom esetén a fordulatszám hatása markánsabbá vált, és a menetkiszakadási nyomaték a fordulatszám növekedésével nagyobb mértékű csökkenést mutatott.

Ez a viselkedés a polimer viszkoelasztikus tulajdonságainak nedvességfüggő változásával magyarázható. Magasabb nedvességtartalom mellett a megnövekedett láncmobilitás és csökkent merevség miatt a menetformázás folyamata érzékenyebbé válik a csavarbehajtás dinamikus paramétereire. Ennek következtében a nagyobb fordulatszám a menet kialakulásának kevésbé kedvező feltételeit eredményezi, ami alacsonyabb menetkiszakadási nyomatékként jelentkezik. Hasonló következtetésekre jutottak a szakirodalomban is: Bunn és Garner kimutatták, hogy a PA66 nedvességfelvétele a hidrogénkötések átrendeződésén keresztül csökkenti az anyag merevségét és növeli a láncmobilitást, míg Akay polimer rendszerek esetében igazolta, hogy a nedvességtartalom növekedése jelentős mechanikai

lágyulást eredményez. A menetformázó csavarok működésére vonatkozóan a szakirodalom rámutat, hogy a deformációs és súrlódási viszonyok kulcsszerepet játszanak a menet kialakulásában, ami összhangban van a jelen vizsgálatban tapasztalt fordulatszámfüggő viselkedéssel [13] [14].

A kapott eredmények alapján a csavarbehajtási fordulatszám hatása csak a nedvességi állapottal együtt értelmezhető megfelelően. A két paraméter kölcsönhatása meghatározó a csavarkötések mechanikai viselkedése szempontjából, ami kiemeli a környezeti feltételek figyelembevételének fontosságát a technológiai beállítások során [15].

A 7. ábrán látható eredmények alapján megállapítható, hogy a csavarkötések viselkedését a vizsgált paraméterek együttesen határozzák meg, és a csavarbehajtási fordulatszám hatása csak a nedvességi állapottal együtt értelmezhető megfelelően. A nedvességtartalom növekedésével a fordulatszám hatása kifejezettebbé válik, ami a polimer viszkoelasztikus viselkedésének erősödésével függ össze.



7. ábra. Menetszakadási nyomaték a relatív páratartalom függvényében különböző fordulatszámok esetén

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során vizsgáltuk a csavarbehajtási fordulatszám és a relatív páratartalom hatását fröccsöntött PA66 alapanyagú mintákban kialakított csavarkötések menetkiszakadási nyomatékára. A kísérleti eredmények egyértelműen igazolták, hogy a polimer nedvességi állapota meghatározó szerepet játszik a kötés mechanikai viselkedésében. A relatív páratartalom növekedésével a menetkiszakadási nyomaték csökkenése volt megfigyelhető, ami a polimer mechanikai tulajdonságainak nedvességfüggő változására vezethető vissza [16].

A csavarbehajtási fordulatszám hatása a vizsgált tartományban kimutatható, azonban mértéke a nedvességi állapot hatásához képest kisebb. A fordulatszám növekedésével a menetkiszakadási nyomaték enyhe csökkenése figyelhető meg, amely a menetformázás során kialakuló deformációs és súrlódási viszonyok változásával magyarázható.

A relatív páratartalom által okozott változások nagyságrendje a fordulatszám hatását többszörösen meghaladta, ami aláhúzza a környezeti feltételek domináns szerepét a csavarkötések viselkedésében.

Ipari szempontból az eredmények rámutatnak arra, hogy a csavarkötések stabil minősége nem biztosítható kizárólag nyomaték alapú technológiai beállításokkal. A környezeti feltételek, különösen a relatív páratartalom figyelembevétele elengedhetetlen a megbízható és reprodukálható kötéskialakítás érdekében. A vizsgálatok eredményei hozzájárulnak a műanyag csavarkötések technológiai optimalizálásához, a megfelelő szerelési körülmények és az anyagok tárolása meghatározásához, ugyanis a kötés megbízhatóságát elsősorban a környezeti kondicionálás határozta meg, és csak másodsorban a szerelési sebesség.

5. SUMMARY

This study investigated the effect of screw driving speed and relative humidity on the thread stripping torque of screw joints formed in injection-moulded PA66 specimens. The experimental results clearly demonstrate that the moisture condition of the polymer plays a dominant role in determining the mechanical behaviour of the joint. An increase in relative humidity resulted in a decrease in thread stripping torque, which can be attributed to the moisture-dependent changes in the mechanical properties of PA66 [16].

The influence of screw driving speed was also found to be measurable within the investigated range; however, its effect was less pronounced compared to that of the moisture condition. Increasing the driving speed led to a slight reduction in thread stripping torque, which can be explained by the altered deformation and frictional conditions during the thread-forming process.

The magnitude of the changes caused by relative humidity significantly exceeded the effect of screwdriving speed, highlighting the dominant role of environmental conditions in the behavior of threaded joints.

The results indicate that the behaviour of screw joints is governed by the combined effect of the investigated parameters, and the influence of driving speed can only be properly interpreted in conjunction with the moisture condition. At higher moisture levels, the effect of driving speed becomes more significant, which is related to the increased viscoelasticity and reduced stiffness of the polymer material.

From an industrial perspective, the findings highlight that reliable joint quality cannot be ensured solely by torque-based process control. Environmental conditions, particularly relative humidity, must be considered to achieve consistent and reproducible joint performance.

The results of the study contribute to the technological optimization of plastic threaded joints and support the determination of appropriate assembly conditions and material storage requirements, as the reliability of the joint was found to be governed primarily by environmental conditioning and only secondarily by the assembly speed.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék Műanyagfeldolgozó kutatócsoportjának a vizsgálatok elvégzéséhez biztosított szakmai és laboratóriumi háttérért, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karának nyújtott szakmai támogatásért.

Jelen „A relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám hatása a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött P66 polimerben” c. cikk a 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00021 projekt keretében jött létre. A 2025-2.1.1-EKÖP-2025-00021 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2025-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

7. IRODALOM

[1] A. Galińska, “Mechanical joining of fibre reinforced polymer composites to metals - A review”, Polymers, vol. 12, no. 10, 2020. doi: 10.3390/polym12102252

[2] P. Pencom, “Thread forming screws for plastics”, Technical Bulletin, 2021.

[3] J. C. Gupta, “Thread forming screw design guide for thermoplastics”, Plastics Fastening G., 2020.

[4] Y. Zhao and L. Zhang, “Joining polymer parts with self-tapping screws: an improvement of the screw thread geometry”, International Journal of Material Forming, 2021. doi: 10.1007/s12289-020-01593-6

[5] W. E. Cumbicus, “ Analysis of self-tapping screw joints in fibre glass reinforced PEI polymer used in the automotive industry”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023. doi: 10.1007/s00170-023-11422-0

[6] R. P. Kambour, J. E. Mark and L. H. Sperling, “ Mechanical Behavior of Polymers”, 2nd ed., Cambridge University Press, 2018., pp. 312–330., ISBN-13: 978-0521871471

[7] Kolver, “Fastening into Plastics,” Kolver Blog, Nov. 14, 2024. [Online]. Available: https://kolver.com/us/blog-detail/fastening-into-plastics [Accessed: Jun. 1, 2026].

[8] [C. Eldridge, “Engineering guide to screws for plastics”, Vital Parts Engineering Guide, 2025.

[9] P. Wetzel, A. K. Sambale, K. Uhlig, M. Stommel and B. Schneider, “Hygromechanical behavior of polyamide 6.6: experiments and modeling”, Polymers, vol. 15, no. 16, 2023., doi: 10.3390/polym15163387

[10] Y. Wu, J. Tan, X. Li, and U. Olofsson, “Effect of humidity on the tribological properties of PA66 materials,” Tribology Letters, vol. 72, no. 3, p. 85, 2024,doi: 10.1007/s11249-024-01882-0.S.

[11] S. Satouri, R. Chekkour, G. Chatzigeorgiou, F. Meraghni, G. Robert, “Numerical-experimental approach to identify the effect of relative humidity on the material parameters of a rate-dependent damage model for polyamide 66”, Mechanics of Materials, vol. 184, p. 104682, 2023., doi: 10.1016/j.mechmat.2023.104735

[12] L. Kehrer, J. Keursten, V. Hirschberg and T. Böhlke, “Dynamic mechanical analysis of PA 6 under hydrothermal influences and viscoelastic material modeling,” Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2023, doi: 10.1177/08927057231155864

[13] C. W. Bunn and E. V. Garner, “The crystal structures of two polyamides (‘nylons’),” Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 189, no. 1016, pp. 39–68, 1947, doi: 10.1098/rspa.1947.0028.

[14] M. Akay, “Moisture Absorption and its Influence on the Tensile Properties of Glass-Fibre Reinforced Polyamide 6,6”, Polymers and Polymer Composites, 1994, doi: 10.1177/147823919400200601

[15] Spyros S., Tobias L., Sam A., Neha C., “ Investigation of bolt torque and environmental conditioning on the mechanical performance of bolted composite laminates”, Composite Structures, 2026., doi: 10.1016/j.compstruct.2026.120080

[16] Szalai M. L., “A nedvességkondicionálás hatása a polimer-fém csavarkötések mechanikai jellemzőire“, TDK Konferencia, Neumann János Egyetem, Kecskemét, Magyarország, 2025.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.2

A 21. SZÁZAD IPARI OPERÁTORÁNAK DEFINÍCIÓJA

THE DEFINITION OF THE 21ST-CENTURY INDUSTRIAL OPERATOR

Dr. Szilárd Jaskó[*], Dr. Tamás Ruppert[**]

ABSZTRAKT

A digitalizáció, az automatizálás és a mesterséges intelligencia térnyerése alapvetően átalakítja az ipari operátor szerepét. Az operátorok ma már nem kizárólag előre meghatározott fizikai műveletek végrehajtói, hanem a termelési rendszer állapotát megfigyelő, értelmező és meghatározott felelősségi körben befolyásoló emberi szereplő. Tanulmányunk célja az operátor definíciójának újraértelmezése a 21. századi megváltozott ipari környezetben. Ennek érdekében különböző operátori szerepkörök és szakirodalmi meghatározások összehasonlításával azonosítjuk a definíció közös funkcionális elemeit, majd ezeket az Operátor 4.0 és az emberközpontú gyártás követelményeivel egészítjük ki. A javasolt definíció az ipari operátort szociotechnikai termelési rendszerbe ágyazott emberi szereplőként értelmezi, aki gépekkel, digitális rendszerekkel, automatizált technológiákkal, mesterségesintelligencia-alapú eszközökkel, valamint műszaki és szervezeti támogató szereplőkkel együttműködve hajtja végre és felügyeli a termelési tevékenységeket. A meghatározás hangsúlyozza a világos döntési, beavatkozási és eszkalációs határok jelentőségét, valamint az operátorok hozzájárulását a hatékony, biztonságos, minőségi, fenntartható, reziliens és emberközpontú működéshez.

ABSTRACT

Digitalization, automation, and the growing use of artificial intelligence are fundamentally transforming the role of industrial operators. Operators are no longer merely responsible for carrying out predefined physical tasks; they increasingly observe, interpret, and influence the state of production systems within clearly defined areas of responsibility. This study aims to reinterpret the concept of the operator in the context of twenty-first-century industry. To this end, representative operator roles and definitions from the literature are compared to identify the common functional elements of the concept, which are then extended with the requirements of Operator 4.0 and human-centric manufacturing. The proposed definition conceptualizes the industrial operator as a human actor embedded in a socio-technical production system who executes and supervises manufacturing activities in collaboration with machines, digital systems, automated technologies, AI-supported tools, and technical and organizational support functions. The definition emphasizes the importance of clearly specified decision-making, intervention, and escalation boundaries, as well as the operator's contribution to efficient, safe, high-quality, sustainable, resilient, and human-centric industrial operations.

1. BEVEZETÉS

A magyar feldolgozóipar – beleértve többek között a jármű-, élelmiszer-, vegy- és gyógyszeripart – 2024-ben a nemzetgazdasági bruttó hozzáadott érték 18,5%-át állította elő, és mintegy 873 ezer főt foglalkoztatott [1, 2]. A szektor jelentős mértékben humánerőforrás-igényes, miközben a hazai munkaerőpiac továbbra is feszes: 2024-ben a 15–64 éves népesség foglalkoztatási rátája negyedévenként 74,8–75,3% között, míg a munkanélküliségi ráta 4,3–4,6% között alakult [3, 4]. A vállalatok egyre nehezebben találnak képzett szakmunkásokat és mérnököket, miközben az egy keresőre jutó reálkereset 2004 és 2024 között közel 92%-kal emelkedett [5]. A bérnyomás és a munkaerőhiány együtt hosszú távon veszélyeztetik a hazai gyártóipar versenyképességét.

A szakirodalom szerint a teljes automatizáció nem minden termelési környezetben valósítható meg vagy gazdaságilag indokolt. Különösen a nagy termékválasztékkal, kis sorozatmérettel, változó munkafolyamatokkal és összetett szerelési feladatokkal jellemezhető rendszerekben korlátozott lehet az automatizálás műszaki és gazdasági megvalósíthatósága, ezért gyakran a részleges automatizáció és az ember–gép együttműködés jelenti a célszerű megoldást [6,7]. Ennek megfelelően az elmúlt években egyre nagyobb figyelem irányul a dolgozókat támogató technológiákra, valamint az olyan emberközpontú szervezeti megoldásokra, amelyek elősegítik a munkavállalók jóllétét, képességeinek fejlődését, autonómiáját és elkötelezettségét, ezáltal ösztönzőbb és a kreativitást támogató munkakörnyezetet teremtenek [8–10]. Ennek a megközelítésnek köszönhetően a gyártás átalakul, megváltozik a munka jellege és újfajta ember-gép interakciók jönnek létre, amely irányt a Gartner előrejelzései is alátámasztották [11,12]. Az Ipar 4.0 eszköztárában szereplő megoldások erősen technológia orientáltak, azaz technokrata szemléletűek és az emberi tényezővel ritkán foglalkoznak [13], ezzel szemben az

*egyetemi docens, Pannon Egyetem, Alkalmazott Informatikai Tanszék. Titkár, Gépipari Tudományos Egyesület, Operátor szakosztály
** egyetemi docens, Pannon Egyetem, Rendszermérnöki Intézeti Tanszék. Elnök, Gépipari Tudományos Egyesület, Operátor szakosztály

Ipar 5.0 koncepció három fő pillérre az emberközpontúság [14], a fenntarthatóság és a rugalmasság/ellenállóképesség (reziliencia). Az Ipar 5.0 a társadalom igényeit helyezi középpontba, célja, hogy az emberek és a modern technológiák egy rugalmas, alkalmazkodó gyártási környezetben, egymás erősségeit kihasználva működjenek együtt [15]. Az emberközpontúság lényege, hogy a technológiai megoldások és szervezeti gyakorlatok tervezésénél, fejlesztésénél, megvalósításánál és bevezetésénél az emberi szükségletekre, jellemzőkre, motivációra és tapasztalatokra helyezzék a hangsúlyt.

Az Európai Unió által kiadott kapcsolódó anyagában az emberközpontúság egy többdimenziós keretrendszer, amely az emberi szükségleteket, jellemzőket, motivációt és tapasztalatokat helyezi a technológiai megoldások és szervezeti gyakorlatok tervezésének, fejlesztésének és megvalósításának középpontjába, amelyek nemcsak a funkcionális követelményeket teljesítik, hanem javítják az emberek jólétét, képességeit, készségeit és munkakörülményeit is [16].

A tanulmány célja az operátor fogalmának újraértelmezése a 21. századi ipari környezetben. A cikk először röviden bemutatja az Operátor 4.0 és az ember-központú rendszerek megközelítéseinek jelentőségét, majd különböző operátori szerepek összehasonlításával azonosítja a fogalom közös funkcionális elemeit. Ezek alapján javaslatot tesz a 21. századi ipari operátor definíciójára, továbbá meghatározza a szerep technológiai, döntési és felelősségi határait. A tanulmány hozzájárulása három elemben foglalható össze: az operátori szerep közös funkcionális magjának azonosítása; a 21. századi ipari operátor új definíciójának megfogalmazása; valamint az operátor, az intelligens technológia és a kapcsolódó szakértői szerepek közötti felelősségi határok kijelölése.

2. OPERÁTOR 4.0 ÉS EMBERKÖPONTÚ RENDSZEREK

Romero és munkatársai bevezették az Operátor 4.0 koncepciót [17], melynek célja, hogy az emberek és a gépek között bizalomra és interakcióra épülő kapcsolatokat hozzon létre és az intelligens gyárak ne csak a gépek erősségeit és képességeit használják ki, hanem az operátorokat is új készségekkel és eszközökkel ruházzák fel. Ennek köszönhetően a gyár teljes mértékben kihasználhatja az Ipar 4.0 technológiák által teremtett lehetőségeket. A koncepcióban definiált és az azóta létrejött számos specializált megoldások (mint pl. a Logisztikai Operátor 4.0 [18], Kognitív Operátor 4.0 [19]) alapjai az emberközpontú gyártási megoldásoknak és hasznos eszközkészletet adnak a különböző iparágaknak a dolgozók támogatásának elősegítésére, legyen szó ergonómiaról vagy döntéstámogatásról.

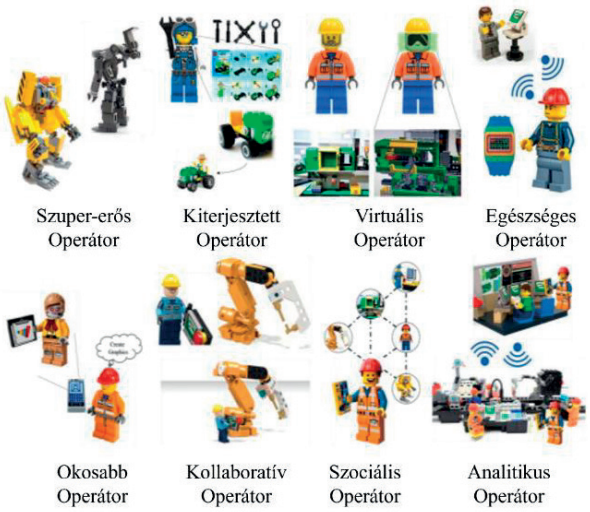
Ahogy a szervezetek egyre inkább digitalizálódnak és automatizálódnak, az emberközpontú megközelítésnek figyelembe kell vennie az emberi tényezőket mind a technológia fejlesztésében, mind a szervezeti szintű alkalmazásában. Technológiai szinten az emberközpontúság célja az egyének és a gépek közötti interakciók optimalizálása. Ez magában foglalja a folyamatok, rendszerek és munkakörnyezetek közös tervezését, amelynek célja a munkavállalók elkötelezettségének, biztonságának, jólétének és termelékenységének javítása, miközben a technológiai integráció révén erősíti az ember szerepét [20].

A cél a technológiák etikus fejlesztésének és bevezetésének biztosítása, az egyének autonómiájának és ellenőrzésének megőrzése, az emberi értékek tiszteletben tartása mellett. Szervezeti szinten az emberközpontú megközelítés különös hangsúlyt fektet a munkavállalók jólétére és elégedettségére, figyelembe véve specifikus igényeiket, készségeiket és perspektíváikat [16]. Ez a megközelítés nagyra értékeli a munkavállalók hozzájárulását és szakértelmét, ezáltal elősegítve az együttműködés és az inkluzívitás kultúráját. Emellett aktívan ösztönzi a munkavállalók készségfejlesztését és folyamatos tanulását, biztosítva, hogy rendelkezzenek a folyamatosan fejlődő technológiához való alkalmazkodáshoz szükséges képességekkel. Ezenkívül biztosítja a munka és a magánélet egészséges egyensúlyát. Az egyének előtérbe helyezésével az emberközpontú megközelítés javítja a munkavállalók motivációját, hatékonyságát és a szervezet általános sikerességét [21]. Ezenkívül biztosítja, hogy a vállalat rendelkezzen azokkal a képességekkel, amelyekkel alkalmazkodni tud a gyorsan fejlődő technológiához.

Az operátori szerep technológiai fejlődésének főbb szakaszait az 1. táblázat foglalja össze. Az Operátor 4.0 alap koncepciója nyolc operátor támogatási típust mutat be részletesen az emberi munkavállalóhoz társított Ipar 4.0 technológia alapján, melyet az 1. ábra szemléltet [17]. A támogatás jellege lehet fizikai, kognitív, illetve a két területet együttesen érintő. A fizikai támogatást az exoskeletonok és a kollaboratív robotok képviselik: előbbiek csökkenthetik a fizikai megterhelést, javíthatják a munkabiztonságot és lehetővé tehetik az idősebb, tapasztalt munkavállalók hosszabb ideig történő foglalkoztatását, míg a kollaboratív robotok az ismétlődő, nehéz vagy ergonómiailag kedvezőtlen műveletek átvállalásával tehermentesíthetik az operátort. A kognitív támogatás körébe tartozik a kiterjesztett és a virtuális valóság alkalmazása, amelyek a munkautasítások szemléletesebb átadását, a képzést, a döntéshozatalt és a folyamatok tervezését segíthetik. Az intelligens személyi asszisztensek természetesebb kommunikációt biztosíthatnak a gépekkel és informatikai rendszerekkel, a vállalati közösségi hálózatok pedig támogatják a tudásmegosztást, az együttműködést és a problémamegoldást. járulhatnak hozzá a jóllét, a biztonság és a teljesítmény javításához.

1. táblázat Operátorok evolúciója [22]

	Operátor 1.0	Operátor 2.0	Operátor 3.0	Operátor 4.0	Operátor 5.0
Munka típusa	Kézzel elvégezhető munka	Támogatott munka	Együttműködés	Támogatott munka	Ellenálló, emberközpontú
Jellemző eszközök, módszerek	Mechanikus és kézi működtetésű szerszámgépek	Számítógépes eszközök, vállalati információs rendszerek	Együttműködés robotokkal, gépekkel és számítógépes eszközökkel	Ember-kiber-fizikai rendszerek	Intelligens rendszerek, MI támogatás, kognitív támogatás
Fő cél	Fizikai munka elvégzése	Az ember gépekkel való segítése, Informatikai támogatás	Ember-gép együttműködés, közös feladatvégzés	Az ember fizikai, szenzoros és kognitív képességeinek kiterjesztése	Az operátor mentális, fizikai, kognitív állapotára figyelés, illetve rendszer reziliencia



1. ábra: Operátor 4.0 koncepció főbb típusai [17]

3. OPERÁTOR DEFINÍCIÓJA

Tapasztalataink szerint az operátor szó köznyelvi és részben ipari értelmezése az elmúlt évtizedekben leszűkült. Az operátori munkakört számos ipari környezetben a szervezeti hierarchia alacsonyabb szintjén elhelyezkedő, csekély hozzáadott értékű és korlátozott szaktudást igénylő pozícióval azonosítják. Ez az értelmezés azonban nem fedi le például a folyamatirányító, SCADA-, robotikai vagy automatizálási rendszereket felügyelő operátorok összetett feladatait és felelősségét. A fejezet célja ezért az operátor fogalmának áttekintése és egy, a 21. századi ipari környezet sajátosságait figyelembe vevő definíció kialakítása. Ennek a fogalomnak az újra értelmezése azért fontos, mivel egyrészt jelenleg nem érhető el egységes definíció, másrészt az automatizálás és a digitalizáció előretörésével a klasszikus „bio-robot” (azaz, monoton, könnyen betanulható és gyakorlatilag tudást nem igénylő fizikai mozdulatok) jellegű munkák fokozatosan háttérbe szorulnak. Ezeket egyre inkább gépek és algoritmusok veszik át. Ezzel párhuzamosan a hosszú távon is fennmaradó munkakörök közös jellemzője, hogy magasabb szintű kompetenciát, döntéshozatalt és problémamegoldást igényelnek.

Az „operátor” fogalma a 19. század végén jelent meg, először a távközlésben és a gépkezelésben. Az iparosodás és a technológiai fejlődés azonban gyorsan kiterjesztette ezt a szerepkört számos területre: nehézgépkezelők, ipari gép- és üzemi operátorok, raktári és logisztikai operátorok, valamint az informatikai és hálózati rendszerek felügyeletét ellátó szakemberek mind ebbe a körbe tartoznak. Közös vonásuk, hogy feladatuk mindig valamely rendszer, berendezés vagy folyamat működtetése, felügyelete és hatékony működésének biztosítása. A 20. században az operátor szerepe jellemzően fizikai és ismétlődő tevékenységekre épült. A mai modern iparban a gépkezelő, folyamatirányító, robotikai, logisztikai és irányítótermi operátorok már nem pusztán végrehajtók. Feladataik között megjelent a digitális rendszerek használata, az eltérések felismerése és az első szintű hibakezelés, valamint a termelési folyamatok optimalizálásában való aktív részvétel [23]. A növekvő felelősségi körökkel együtt jár, hogy az operátor meghatározott hatáskörben hozott döntései jelentős hatással lehetnek a termelés minőségére, biztonságára és fenntarthatóságára.

Mindez új eszközöket is igényel [22], így például döntéstámogató rendszerek, valós idejű adatelemzés, virtuális/kiterjesztett valóság (VR/AR) és viselhető technológiák segítik az operátorokat, hogy komplex környezetben is hatékonyan és biztonságosan dolgozhassanak.

3.1. A definíció kialakításának logikája

A javasolt definíció kialakításakor négy egymásra épülő szempontot vettünk figyelembe. Elsőként az eltérő alkalmazási területeken működő operátorok közös funkcióit azonosítottuk. A szempontokat a szakirodalomban megjelenő operátordefiníciók, valamint a 2. táblázatban összefoglalt reprezentatív operátori szerepek funkcióinak összevetésével határoztuk meg. Ezt követően a vizsgálatot az ipari termelésben közvetlenül részt vevő operátorokra szűkítettük. A definícióba beépítettük az Ipar 5.0 emberközpontúsági, fenntarthatósági és reziliencia/ellenállóképesség elvárásait, végül pedig meghatároztuk az operátor helyét a digitalizált és automatizált termelési rendszer döntési és szabályozási folyamataiban.

Az eltérő operátori munkakörök összehasonlítása alapján az operátor fogalmának közös magját nem egy meghatározott gép, technológia vagy iparág adja. A visszatérő elem az, hogy az operátor kapcsolatban áll egy működő rendszerrel vagy folyamattal: megfigyeli és értelmezi annak állapotát, végrehajtja vagy felügyeli a szükséges műveleteket, felismeri az eltéréseket, és meghatározott felelősségi körén belül beavatkozik a rendszer működésébe, vagy az illetékes szakértői szintre továbbítja a problémát.

3.2. Operátori szerepkörök összehasonlítása

Az operátor megnevezés nem egyetlen foglalkozást, hanem egymással rokon szerepek csoportját jelöli. Az egyes operátortípusok eltérhetnek az alkalmazási terület, a kezelt rendszer, a technológiai környezet és a felelősség kiterjedése alapján, miközben közös jellemzőjük valamely rendszer vagy folyamat működtetése, megfigyelése, felügyelete vagy szabályozása. A 2. táblázat reprezentatív példákon keresztül mutatja be az operátori szerepek közös és eltérő jellemzőit.

3.3. Operátori szerepkörök összehasonlítása

Az összehasonlítás alapján elkülöníthető az operátori szerep általános funkcionális magja, valamint annak ipari környezetben megjelenő sajátos formája. Ennek megfelelően először az általános operátorfogalmat, majd annak a 21. századi ipari környezetre szűkített változatát határozzuk meg.

Az operátor olyan emberi szereplő, aki egy meghatározott rendszer vagy folyamat működésében közvetlenül részt vesz: annak állapotát megfigyeli és értelmezi, a szükséges műveleteket végrehajtja vagy felügyeli, valamint meghatározott felelősségi körén belül reagál a működés során fellépő eltérésekre.

Az általános operátorfogalmon belül az ipari operátort a termelési rendszerhez vagy az azt közvetlenül támogató folyamatokhoz való kapcsolata különbözteti meg. Tevékenysége nem feltétlenül egyetlen gép fizikai kezelésére irányul: gyártási folyamatok, automatizált cellák, logisztikai rendszerek, robotok, digitális termelésirányítási megoldások vagy irányító termi rendszerek működtetését és felügyeletét is magában foglalhatja.

3.4. A 21. századi operátor definíciója

A 21. századi ipari operátor olyan, szocio-technikai termelési rendszerbe ágyazott emberi szereplő, aki gépekkel, digitális rendszerekkel, automatizált technológiákkal, mesterséges intelligenciával támogatott eszközökkel, valamint műszaki és szervezeti támogató szereplőkkel együttműködve hajtja végre és felügyeli a termelési tevékenységeket, továbbá megfigyeli és értelmezi a rendszer állapotát. Meghatározott felelősségi körén belül beavatkozik a rendszer működésébe, vagy szükség esetén az illetékes szakértői szintre továbbítja a problémát. Tevékenységével hozzájárul a termelés hatékonyságához, biztonságához és minőségéhez, valamint a fenntartható, reziliens és emberközpontú működéshez.

A meghatározás alkalmazható például az ipari gépkezelőre, aki egy berendezés állapotát figyeli és annak működésébe helyi szinten avatkozik be; az irányító termi operátorra, aki több folyamatjel együttes értelmezése alapján felügyeli a rendszert; valamint a robotikai operátorra, aki automatizált berendezések és digitális interfészek együttműködését ellenőrzi. A konkrét feladatok eltérnek, de mindhárom szerepben megjelenik a rendszerállapot megfigyelése, a meghatározott hatáskörű beavatkozás és az eszkaláció.

A meghatározásban az operátor kifejezetten emberi szereplő. Az automatizált vezérlők, algoritmusok és MI-alapú rendszerek érzékelhetnek, előre jelezhetnek vagy döntési javaslatokat adhatnak, de ebben az értelmezésben nem tekinthetők operátornak. Az operátor ugyanakkor nem korlátlan döntéshozó, és nem helyettesíti a technikusokat, mérnököket vagy vezetőket. Önállóan olyan, előre meghatározott és igazolt kompetenciájába tartozó helyi beavatkozásokat végezhet, amelyek felelősségi és kockázati határai egyértelműek; az ezeket meghaladó helyzeteket az illetékes szakértői szintre kell továbbítania.

A javasolt definíció alapján a 21. századi operátor nem egyszerű gépkezelő vagy végrehajtó, hanem a termelési rendszer felelős emberi szereplője. Értékét nemcsak a fizikai műveletek elvégzése, hanem a helyzetértelmezés, a tapasztalati tudás, a problémák felismerése, a megfelelő beavatkozás és az ember–technológia együttműködésben betöltött szerepe adja.

A javasolt meghatározás fogalmi szintézis eredménye, amelyet reprezentatív operátori szerepek összehasonlítása alapján alakítottunk ki. A definíció iparágakon és automatizáltsági szinteken átívelő empirikus, illetve szakértői validációja további kutatást igényel.

2. táblázat Operátori szerepek és alkalmazási területeik összehasonlítása

Operátor típusa	Elsődleges terület	Kulcsfeladat	Működési szint
Ipari gépkezelő operátor	Ipari gyártás	Gépek működtetése a termelésben	Feladatszint
Üzemi operátor	Közművek / Termesztés	Teljes ipari folyamatot felügyeli	Rendszerszint
Raktári operátor	Logisztika / Raktározás	Anyagok és áruk mozgatása, tárolása (pl. targoncával)	Feladat- vagy folyamatszint
Lean gyártási operátor	Lean gyártás	Feladatok végrehajtása, veszteségcsökkentés, többfunkciós szerepek	Folyamatszint
Távközlési operátor	Digitális kommunikáció	Adatátviteli és kommunikációs rendszerek működtetése és felügyelete.	Rendszer/Hálózati szint
Számítógép- / Hálózatfelügyeleti operátor	Informatika & Hálózat	Számítógépes rendszerek és hálózatok felügyelete	Rendszerszint
Irányítóközponti operátor	Folyamatirányítás	Automatizált rendszerek (pl. SCADA) kezelése	Központosított/rendszerszint
Robotikai és automatizálási operátor	Ipari automatizálás	Robotok felügyelete, programozása	Feladat-/Rendszerszint
Folyamatoperátor	Vegyipar/Energia	Folyamatos ipari folyamatok felügyelete és szabályozása	Folyamatszint

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány célja az operátor fogalmának újraértelmezése volt a digitalizált, automatizált és egyre inkább emberközpontú ipari környezetben. A különböző operátori szerepkörök összehasonlítása alapján megállapítható, hogy az operátori tevékenység közös funkcionális magját nem egy meghatározott gép, technológia vagy iparág adja, hanem a működő rendszerhez vagy folyamathoz való közvetlen kapcsolódás. Az operátor megfigyeli és értelmezi a rendszer állapotát, végrehajtja vagy felügyeli a szükséges műveleteket, felismeri az eltéréseket, valamint meghatározott felelősségi körén belül beavatkozik, vagy az illetékes szakértői szintre továbbítja a problémát.

A javasolt definíció a 21. századi ipari operátort szocio-technikai termelési rendszerbe ágyazott emberi szereplőként értelmezi, aki gépekkel, digitális rendszerekkel, automatizált technológiákkal, MI-alapú eszközökkel, valamint műszaki és szervezeti támogató szereplőkkel együttműködve vesz részt a termelési tevékenységek végrehajtásában és felügyeletében. A meghatározás hangsúlyozza, hogy az operátor nem egyszerű végrehajtó, ugyanakkor nem is korlátlan döntéshozó vagy a technikusi, mérnöki és vezetői szerepek helyettesítője. Tevékenységét világosan kijelölt döntési, beavatkozási és eszkalációs határok között végzi, és hozzájárul a hatékony, biztonságos, minőségi, fenntartható, reziliens és emberközpontú működéshez. A definíció alapot biztosíthat a munkaköri leírások, kompetenciamodellek, operátortámogató technológiák és ember–technológia felelősségi struktúrák következetesebb kialakításához. A javasolt meghatározás további, különböző iparágakra és automatizáltsági szintekre kiterjedő szakértői és empirikus validációt igényel.

SUMMARY

The aim of this study was to reinterpret the concept of the operator in a digitalized, automated, and increasingly human-centric industrial environment. The comparison of different operator roles shows that the common functional core of operator work is not defined by a specific machine, technology, or industrial sector, but by the operator's direct relationship with an operational system or process. The operator observes and interprets the state of the system, executes or supervises the required activities, recognizes deviations, and either intervenes within a defined area of responsibility or escalates the problem to the appropriate expert level.

The proposed definition conceptualizes the twenty-first-century industrial operator as a human actor embedded in a socio-technical production system who participates in the execution and supervision of production activities in collaboration with machines, digital systems, automated technologies, AI-based tools, and technical and organizational support functions. The definition emphasizes that the operator is neither a simple task executor nor an unrestricted decision-maker or a substitute for technicians, engineers, and managers. Instead, the operator acts within clearly defined decision-making, intervention, and escalation boundaries and contributes to efficient, safe, high-quality, sustainable, resilient, and human-centric operations. The proposed definition may provide a basis for the more consistent design of job descriptions, competence models, operator-support technologies, and human–technology responsibility structures. Further expert and empirical validation across different industries and levels of automation is required.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

This work has been funded by the NKKP STARTING 152670 project with the support provided by the Ministry of Culture and Innovation of Hungary from the National Research, Development, and Innovation Fund, financed under the NKKP Starting 25 funding scheme.

Project no. 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00312 has been implemented with the support provided by the Ministry of Innovation and Technology of Hungary from the National Research, Development and Innovation Fund, financed under the PIACI KFI funding scheme.

6. IRODALOM

[1] KÖZPONTI STATISZTIKAI HIVATAL: A bruttó hozzáadott érték és megoszlása nemzetgazdasági áganként, STADAT 21.1.1.6., 2024.

[2] KÖZPONTI STATISZTIKAI HIVATAL: A GDP termelésében foglalkoztatottak száma – ESA2010, STADAT 21.1.1.50., 2024.

[3] KÖZPONTI STATISZTIKAI HIVATAL: A 15–64 évesek foglalkoztatási rátájának alakulása, STADAT 20.2.1.8., Budapest, KSH, 2026.

[4] KÖZPONTI STATISZTIKAI HIVATAL: A munkanélküliségi ráta alakulása, STADAT 20.2.1.10., Budapest, KSH, 2026.

[5] KÖZPONTI STATISZTIKAI HIVATAL: *Reáljövedelem – reálbérindex*, STADAT 21.1.1.35., Budapest, KSH, 2026.

[6] Dimény, I., & Koltai, T. (2022). Minimising workers' workload in partially automated assembly lines with human-robot collaboration. *IFAC-PapersOnLine*, *55*(10), 1734-1739.

[7] Bottner, N., Schlickenrieder, K., & Ollinger, L. (2025). Bridging the automation gap in assembly: a comprehensive model for potential assessment and implementation. *Procedia CIRP*, *134*, 235-240.

[8] Mark, B. G., Rauch, E., & Matt, D. T. (2021). Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions. Journal of Manufacturing Systems, 59, 228-250.

[9] Lu, Y., Zheng, H., Chand, S., Xia, W., Liu, Z., Xu, X., ... & Bao, J. (2022). Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. *Journal of manufacturing systems*, *62*, 612-627.

[10] Breque, M., De Nul, L., & Petridis, A. (2021). *Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry* (No. KI-BD-20-021-EN-N). Directorate General for Research and Innovation (DG RTD) of the European Commission.

[11] Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2024 - https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2023-10-16-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2024

[12] Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2025 https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-10-21-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2025

[13] Kaasinen, E., Schmalfuß, F., Özturk, C., Aromaa, S., Boubekeur, M., Heilala, J., ... & Walter, T. (2020). Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. *Computers & Industrial Engineering*, *139*, 105678.

[14] Lu, Y., Zheng, H., Chand, S., Xia, W., Liu, Z., Xu, X., ... & Bao, J. (2022). Outlook on human-centric manufacturing towards Industry 5.0. *Journal of manufacturing systems*, *62*, 612-627.

[15] Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, *11*(16), 4371.

[16] BREQUE, M., DE NUL, L., PETRIDIS, A.: Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry, European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021. ISBN 978-92-76-25308-2, https://doi.org/10.2777/308407

[17] Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast-Berglund, Å., & Gorecky, D. (2016, October). Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In *proceedings of the international conference on computers and industrial engineering (CIE46), Tianjin, China* (pp. 29-31).

[18] Cimini, C., Lagorio, A., Romero, D., Cavalieri, S., & Stahre, J. (2020). Smart logistics and the logistics operator 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, *53*(2), 10615-10620.

[19] Thorvald, P., Fast Berglund, Å., & Romero, D. (2021). The cognitive operator 4.0. In *18th International Conference on Manufacturing Research, ICMR 2021, Incorporating the 35th National Conference on Manufacturing Research, 7–10 September 2021, University of Derby, Derby, UK* (Vol. 15, pp. 3-8). IOS Press.

[20] Wang, L., Gao, R. X., Krüger, J., & Váncza, J. (2025). Human-centric assembly in smart factories. *CIRP annals*, *74*(2), 789-815.

[21] Yanytska, L. (2025). The rise of human-centric manufacturing in the industry 5.0 era. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *139*(9), 5067-5077.

[22] Ruppert, T., Jaskó, S., Holczinger, T., & Abonyi, J. (2018). Enabling technologies for operator 4.0: A survey. *Applied sciences*, *8*(9), 1650.

[23] Peruzzini, M., Grandi, F., & Pellicciari, M. (2020). Exploring the potential of Operator 4.0 interface and monitoring. *Computers & Industrial Engineering*, *139*, 105600.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.3

A HEGESZTÉS, RAGASZTÁS ÉS MECHANIKUS KÖTÉSEK HATÁSA A HULLÁMTERJEDÉSRE GÉPJÁRMŰ KAROSSZÉRIÁKBAN

THE EFFECT OF WELDING, ADHESIVE BONDING, AND MECHANICAL FASTENING TECHNOLOGIES ON WAVE PROPAGATION IN AUTOMOTIVE BODIES

Árvai Tamás[*], *Dr. Jálics Károly*[**]

ABSTRACT

The propagation of vibration waves in vehicle bodies, originating from mechanical defects, is fundementally influenced by the joints used in the vehicle during manufacturing. Classical diagnostic methods focus on direct powertrain measurements, which often fail to detect broad-spectrum structural faults due to the complex, inhomogeneous paths that the waves must travel through. This research explores an approach in which the Time Delay of Arrival (TDoA) method is used to localize unknown fault sources on the chassis, with a goal of an approximate accuracy of 50 × 50 cm. To accurately calibrate the TDoA models, a Transfer Path Analysis (TPA) was conducted on downscaled, simple laboratory specimens.

1. INTRODUCTION

Classical vibration diagnostic methods have long been used in mechanical equipment to identify the location and cause of mechanical faults. These methods primarily focus on known vibration sources, such as direct measurements of rotating powertrain components (engines, transmissions), and heavily rely on prior suspicion of a part failure. However, a modern vehicle is a highly complex structure, made up of thousands of individual components. During operation, several active vibration excitation mechanisms (engine excitation, rolling noise, aerodynamic effects) are present simultaneously, masking critical fault signals.

Acoustic and mechanical waves do not propagate cleanly through a homogeneous medium within a vehicle. The path between the source of the fault and the sensor trying to detect it is inhomogeneous; the waves must travel through components of various materials and geometries and joints of differing physical properties. A hidden or broad-spectrum mechanical fault (such as a developing crack, or a loose fastener) often lacks a discrete, easily distinguishable frequency. This makes using classical Fast Fourier Transform (FFT) based analysis virtually impossible for detecting these faults.

The objective of our research is to develop a diagnostic method based on Time Delay of Arrival (TDoA) capable of localizing unknown fault sources from broad-spectrum impact vibrations on the chassis [1]. The goal is to achieve localization accuracy of 50 × 50 cm on the vehicle and its main elements. However, for wave propagation algorithms to function accurately enough for this, it is essential to understand how different types of joints transfer, dampen and distort these mechanical waves.

2. WAVE PROPAGATION AND JOINTS

When an excitation (vibration) enters the body of the vehicle, it must inevitably pass through the various joints connecting the sheet metal parts and other components of the vehicle. These joints act as “transfer gates” that determine the energy and frequency composition of the transmitted wave. Considering the principles of continuum mechanics, local alterations in stress and strain fields at a structural node can drastically change the phase velocity and damping of passing elastic waves (e.g. bending and Lamb waves) [2, 3].

The most common joint types used in the automotive industry are the following:

- Resistance spot welding (RSW): this is the most common joint type, used for about 80% of the joints within a car body; a single vehicle can contain thousands of spot welds. This technology creates localized fusion points between plates, providing a rigid metallic connection and therefore excellent vibration transfer, while energy dissipation remains low [2, 3].
- Mechanical fastening (Bolts and Rivets): these are preferred when welding is not feasible (for example, multimaterial structures, aluminium-steel connections). Vibration transfer here is predominantly determined by the friction between the surfaces and the preload force of the bolts.

* *PhD student, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet*
** *associate professor,head of institute Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet*

- Adhesive technologies: these provide massive visco-elastic damping. This significant energy dissipation severely attenuates high-frequency waves, greatly complicating diagnostic wave propagation analysis [2].

3. LITERATURE REVIEW

The propagation of elastic waves in plate structures is significantly influenced by the type of joint connecting the structural components. Since joints introduce discontinuities in stiffness and material properties, they modify wave transmission, attenuation, and scattering, directly affecting vibration-based structural health monitoring (SHM) and non-destructive testing (NDT) [4][10].

Bolted joints exhibit strongly nonlinear behaviour because wave propagation depends on bolt preload, contact pressure, and friction between the mating surfaces. A properly tightened bolt provides high contact stiffness and efficient wave transmission, whereas preload loss leads to micro-slip, increased damping, and reduced wave amplitude. These characteristics make guided waves particularly suitable for detecting bolt loosening and monitoring joint integrity [8]. Furthermore, Lamb wave studies have shown that changes in contact conditions significantly influence wave transmission through bolted [1].

Riveted joints provide a permanent connection with stable long-term stiffness because they are not affected by preload relaxation. However, localized deformation around the rivets, residual stresses, and manufacturing tolerances create multiple wave transmission paths, resulting in increased scattering and more complex vibration responses. Fatigue damage around rivet holes further modifies local stiffness and wave propagation characteristics, making guided waves effective for damage detection in riveted structures [11].

Spot-welded joints generally offer the highest stiffness and the most efficient transmission of elastic waves because the connected plates are metallurgically fused together. Consequently, intact spot welds produce cleaner wavefronts with relatively low attenuation, making them well suited for Time Difference of Arrival (TDoA) and guided-wave-based damage localization. However, fatigue cracks developing in the Heat Affected Zone (HAZ) reduce joint stiffness, increase wave scattering, and degrade signal quality [7].

Overall, previous studies indicate that welded joints provide the most efficient wave transmission, riveted joints introduce moderate scattering due to localized stiffness variations, and bolted joints exhibit the highest damping because of frictional energy dissipation. Understanding these differences is essential for accurately modelling wave propagation and improving the reliability of vibration-based structural health monitoring systems.

4. EXPERIMENT SETUP AND METHODOLOGY

Full vehicle diagnostic measurements produce noisy data. During a diagnostic wave propagation event, the mechanical waves bounce off hundreds of structural nodes, causing reverberation and severe interference. Under these conditions, it is impossible to isolate the effect of a singular joint type on the TDoA algorithm.

To solve this, we simplified our model for calibration. Using Transfer Path Analysis (TPA) applied to a set of controlled, simplified laboratory specimens, we can measure the pure inertance (Frequency Response Function – FRF) of isolated automotive joints, furthermore, the wave propagation in the specimen in the time domain.

5. SPECIMEN DESIGN

Two steel plates () were used during our experiment, measuring 600 × 400 x 1 mm and 400 × 400 x 1 mm, respectively (figure 1.). The steel plates were made of S235JR structural steel. The plates were each assembled with a 20 mm overlap and secured along a line of joints at the same distribution (except the adhesive joint, which was done along the whole overlap).

The joint types used in our experiments are as follows:

- M6 bolt and nut connection
- 6mm blind rivets
- Spot welds

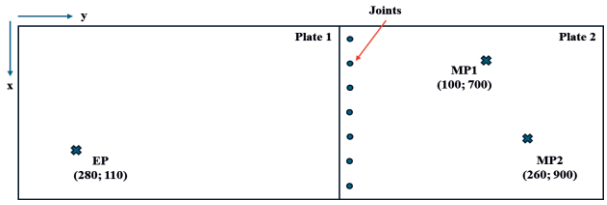


Figure 1. Schematic of the experimental setup, with measurement points (MP1 & MP2) and the excitation point (EP)

For the time domain tests for the wave propagation, a simple steel plate was used to get reference data of a blank steel plate without any joints.

6. THE EXPERIMENT

The experiment was done with the following equipment:

- Shaker: TIRAvib small electrodynamic shaker with a maximum excitation force of 9 N, with the included power amplifier
- Miniature impact hammer: 20 g weight
- Data acquisition (DAQ): Brüel & Kjaer Photon+, 4 channel DAQ system
- PCB 288D01 impedance head
- 2 Brüel & Kjaer 4397A accelerometers

The accelerometers were fixed to the steel plate with beeswax, which has very good vibration transferring properties, and it makes it easy to attach and remove the sensors.

The measurement setup for the FRF recording is the following:

- frequency range: 0-3200 Hz
- sampling frequency: 7800 Hz
- number of FFT lines: 6400 (0,5 Hz resolution)
- number of averages: 20 (linear)
- excitation signal: white noise (50% burst, 50% off the sampling time)
- window: rectangular
- recorded: averaged time signals, autopower and crosspower, H1 frequency response functions (FRF/inertance) and coherences

The measurement setup for the time domain recording is the following:

- sampling frequency: 100.000 Hz
- number of averages: 3 (linear)
- excitation signal: hammer impact
- window: rectangular
- recorded: averaged time signals

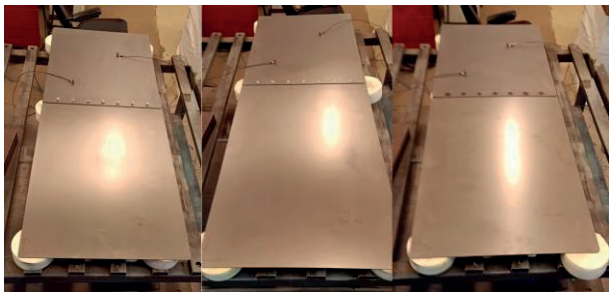


Figure 2. Bolted (left), Riveted (middle) and Welded (right) plates

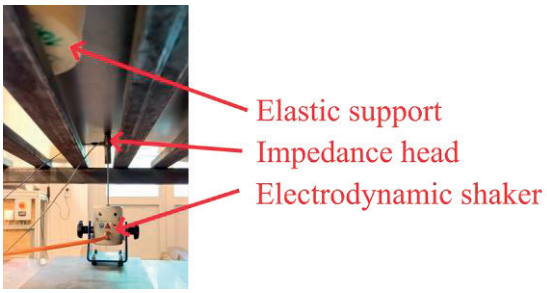


Figure 3. The experiment setup

For the experiment, the plates were placed on six elastic foam supports, which provided compliant boundary conditions and reduced vibration transmission between the plates and the supporting structure.

The plates had an impedance head glued to the downward facing side of the plate for measuring force and acceleration in the same sensor. For the time domain test the impedance head was detached from the plate, and a hammer impact was applied on the same place. The theory behind that is well described in the literature [3], [10].

7. RESULTS AND INTERPRETATION

The test results are discussed in both the frequency and time domains. First, the frequency response functions are examined (Figure 4). When the results are interpreted, significant differences can be observed in the vibration transfer of the different joints at both measurement points. The vibration transfer curves obtained for the bolted and riveted joints are found to be much more similar (blue and green curves). In both cases, lower-amplitude peaks are observed at the resonant frequencies, indicating increased damping (energy dissipation).

In contrast, the vibration transfer curve of the spot-welded plates (red curve) indicates a much stiffer joint, with many more sharp peaks (lower damping, higher quality factor) appearing across the measured frequency range. Here, damping is the lowest, and energy flows through the joint more freely with less distortion.

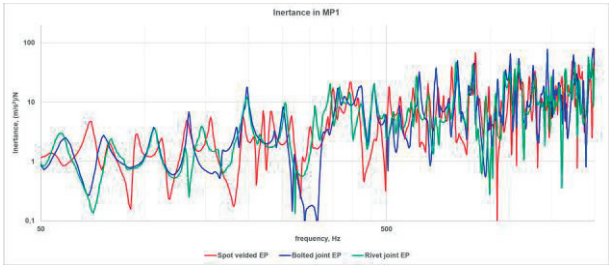


Figure 4. Results at measuring point 1 (MP1)

A time domain result is shown in figure 5. The diagram shows the acceleration time signal in MP1 on the bolted specimen. After the impact the acceleration signal decays approx. in 0.5 s to zero. The time signals on all other specimens look similar, but this representation does not allow further investigation. It is necessary to zoom the initial range of the curves. The zoomed curves of three different joint configurations and a blank steel plate subjected to the same impact excitation are shown in figure 6.

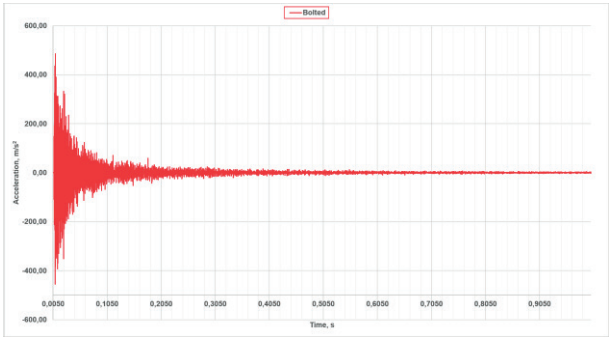


Figure 5. Results at measuring point 1 (MP1) of the bolted specimen

The blue curve represents the excitation force, while the remaining curves correspond to the measured acceleration responses of a continuous steel plate w/o joints (red), a bolted steel specimen (green), a riveted steel specimen (light blue), and a spot-welded steel specimen (orange).

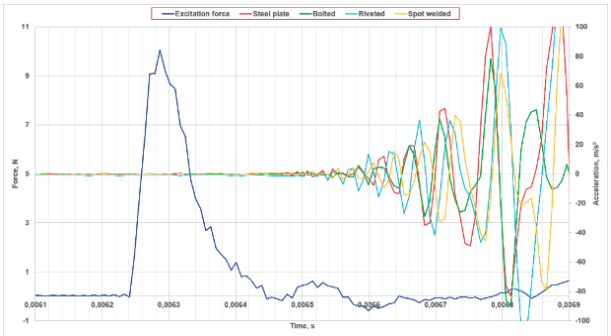


Figure 6. The excitation force signal and the time signals at Measuring Point 1 (MP1)

The excitation force peaks at ~10 N (t = 0.00628 s) as a short-duration impulse. Acceleration responses lag slightly due to elastic wave propagation. A rapid increase in vibration amplitude is observed following the arrival of the main wave packet, after an initial period of low-amplitude oscillations.

Continuous Steel Plate (Red, Reference): Shows minimal wave modification, rapid amplitude growth, a sharp wavefront, and low energy loss due to uninhibited transmission.

Spot-Welded (Orange): Closely mirrors the continuous plate with high stiffness, efficient transmission, low damping, and a clear wavefront ideal for TDoA algorithms.

Riveted (Light Blue): Generates high amplitudes but a more irregular waveform, driven by localized joint deformation, manufacturing tolerances, and scattering across multiple load paths.

Bolted (Green): Exhibits the lowest initial amplitudes, gradual response build-up, and pronounced oscillations. Interface friction and micro-slip introduce significant damping and attenuation.

The joining method directly dictates wave propagation and dynamic performance. The continuous plate and spot weld maximize energy transmission and clarity, whereas riveted joints add structural complexity and bolted connections provide maximum damping via frictional dissipation.

8. SUMMARY

The investigated joint types exhibit distinct vibration transmission characteristics, which affect wave propagation and TDoA-based localization.

In bolted joints, vibration transfer depends mainly on preload, friction, and surface conditions. Preload relaxation reduces clamping force and increases nonlinear damping due to friction and micro-slip.

Riveted joints provide permanent stability without preload loss. However, localized stresses and multiple load paths result in a complex vibration response, with energy dissipated through deformation, contact interactions, and hysteresis.

Spot-welded joints provide high stiffness and low wave attenuation, resulting in clear wavefronts suitable for TDoA diagnostics. However, fatigue cracks in the HAZ or micro-slip may degrade signal quality.

Initial findings indicate that spot welds do not significantly affect wave propagation or TDoA applicability. Future research will therefore focus on reducing arrival-time uncertainty in sensor signals.

9. REFERENCES

[1] Alleyne, D. N., & Cawley, P. (1994) The interaction of Lamb waves with defects. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 39(3), 381–397, https://doi.org/10.1109/58.143172

[2] Tuncer, G., Mansouri, D., & Şendur, P. (2021). The effect of spotwelds and structural adhesives on static and dynamic characteristics of vehicle body design. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 235(12), 3207–3219. https://doi.org/10.1177/09544070211004468.

[3] Park, J.-H., & Lee, S.-B. (2003). Effect of fatigue damage on the dynamic response frequency of spot-welded joints. International Journal of Fatigue, 25(4), 311–316. https://doi.org/10.1016/S0142-1123(02)00140-8

[4] Graff, K. F. (1975). Wave Motion in Elastic Solids. Dover Publications, ISBN-10: 0-8142-0232-2

[5] Heylen W., Lammens S., Sas P. (1998). Modal Analysis Theory and Testing. Katholieke Universiteit Leuven.

[6] Jálics K., Kriston J.B. (2024). Investigation of the time delay of arrival (TDoA) method for diagnostic purposes on motor vehicles. GÉP, 2024/3-4. https://doi.org/10.70750/GEP.2024.3-4.12

[7] Mallet, L., Lee, B. C., Staszewski, W. J., & Scarpa, F. (2004). Structural health monitoring using scanning laser vibrometry: II. Lamb waves for damage detection. Smart Materials and Structures, 13(2), 261–269. https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/2/003

[8] Pecorari, C. (2004). Nonlinear interaction of ultrasonic waves with bolted joints. Journal of the Acoustical Society of America, 116(6), 3402–3411, https://doi.org/10.1121/1.1837214

[9] Puchalski A. (2015). A technique for the vibration signal analysis in vehicle diagnostics. Mechanical Systems and Signal Processing, 56-57, 173-180.

[10] Rose, J. L. (2014). Ultrasonic Guided Waves in Solid Media. Cambridge University Press, https://doi.org/10.1017/CBO9781107273610

[11] Su, Z., & Ye, L. (2009). Identification of Damage Using Lamb Waves: From Fundamentals to Applications. Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-84882-784-4

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.4

PET-G ALAPANYAGÚ FDM-ELJÁRÁSSAL NYOMTATOTT ALKATRÉSZEK KITÖLTÉSI GEOMETRIÁINAK MECHANIKAI VIZSGÁLATA

MECHANICAL INVESTIGATION OF INFILL GEOMETRIES IN FDM PRINTED PET-G COMPONENTS

Béres Máté, Dr. Bihari Zoltán***

ABSTRACT

The mechanical properties of FDM-manufactured components are influenced by several printing parameters, including infill geometry. This study investigates 24 different infill geometries in PET-G specimens. Impact and tensile tests were performed on 240 specimens, with approximately constant infill mass.

The Lateral Honeycomb geometry exhibited the highest average impact energy (18.6 J), while Gyroid provided the highest average tensile force (1622 N). Impact tests showed considerably higher relative standard deviations than tensile tests. Thus, high impact energy was not necessarily associated with good repeatability, whereas Gyroid combined high tensile force with low variability.

The results demonstrate that infill geometry affects both the mechanical load-bearing capacity and the variability of measurement results, which should be considered when selecting a geometry for a specific application.

Keywords: *FDM, PET-G, infill geometry, tensile testing, impact testing*

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártás napjainkra az ipar számos területén alkalmazott gyártástechnológiává vált. Az FDM (Fused Deposition Modeling) eljárás egyik legfontosabb előnye, hogy összetett geometriájú alkatrészek állíthatók elő hagyományos gyártóeszközök nélkül [3]. A technológiával készült alkatrészek mechanikai tulajdonságait számos gyártási paraméter befolyásolja, többek között a nyomtatási hőmérséklet, a rétegvastagság, a falvastagság és a kitöltési geometria [5, 6]. A szakirodalomban számos kutatás foglalkozik a különböző kitöltési mintázatok mechanikai tulajdonságainak vizsgálatával. Ugyanakkor korlátozott számban állnak rendelkezésre olyan összehasonlító vizsgálatok, amelyek nagyszámú kitöltési geometriát azonos gyártási feltételek mellett értékelnek [5, 9].

A kitöltési geometria megválasztása az alkatrész mechanikai viselkedése mellett az anyagfelhasználást és a gyártási időt is befolyásolja. Ezért a megfelelő geometria kiválasztása fontos tervezési szempont, különösen a mechanikai igénybevételnek kitett funkcionális alkatrészek esetében.

Jelen kutatás célja 24 különböző kitöltési geometria mechanikai viselkedésének vizsgálata PET-G alapanyagú [4], FDM-eljárással gyártott próbatesteken. A kitöltések tömegét közel azonos értéken tartottuk, így lehetőség nyílt a különböző geometriák mechanikai tulajdonságainak összehasonlítására. A kutatás kiterjedt a mérési eredmények szórásának elemzésére is, különös tekintettel az ütő- és szakítóvizsgálatok eredményeinek változékonyságára.

2. VIZSGÁLATI MÓDSZER

A próbatestek Creality Ender-3 V2 típusú FDM nyomtatóval, PET-G alapanyagból készültek. A nyomtatás során alkalmazott paramétereket a kitöltési geometria és az ahhoz tartozó kitöltési százalék kivételével állandó értéken tartottuk.

A próbatestek 240 °C-os fúvóka- és 70 °C-os tárgyasztal-hőmérséklettel készültek. A rétegvastagság 0,2 mm, a falak száma 2, az alsó és felső rétegek vastagsága egyaránt 0,4 mm volt.

A vizsgált kitöltési geometriákat öt csoportba soroltuk: **kétdimenziós, háromdimenziós, méhsejt jellegű, TPMS-alapú** és **spirális** mintázatú geometriák. A kétdimenziós kitöltések síkbeli vonal- és görbeszerkezetekből épülnek fel. A háromdimenziós mintázatok térbeli, több irányban összekapcsolódó szerkezetet alkotnak. A méhsejt jellegű kitöltéseket cellás felépítés jellemzi. A TPMS-geometriák (triply periodic minimal surfaces) folytonos, periodikusan ismétlődő térbeli felületekből állnak. A spirális csoportba a spirális vagy ahhoz hasonló, folytonos görbevezetésű mintázatok kerültek.

A vizsgálat során 24 különböző kitöltési geometriát alkalmaztunk. A vizsgált geometriák megnevezését és csoportosítását az 1. táblázat tartalmazza.

** IV évf. BSc gépészmérnök hallgató, Miskolci Egyetem*
*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet*

1. táblázat. A kitöltési geometriák csoportosítása

Sorszám	Kitöltés megnevezése	Geometriai csoport
1.	Lines	Kétdimenziós
2.	Aligned Lines	Kétdimenziós
3.	Locked Zag	Kétdimenziós
4.	Cross Zag	Kétdimenziós
5.	Zig Zag	Kétdimenziós
6.	Line	Kétdimenziós
7.	Grid	Kétdimenziós
8.	Triangles	Kétdimenziós
9.	Tri-Hexagon	Kétdimenziós
10.	Cubic	Háromdimenziós
11.	Adaptive Cubic	Háromdimenziós
12.	Quarter Cubic	Háromdimenziós
13.	Honeycomb	Méhsejt jellegű
14.	3D Honeycomb	Méhsejt jellegű
15.	Lateral Honeycomb	Méhsejt jellegű
16.	Lateral Lattice	Méhsejt jellegű
17.	Cross Hatch	Háromdimenziós
18.	TPMS-D	TPMS
19.	TPMS-FK	TPMS
20.	Gyroid	TPMS
21.	Concentric	Kétdimenziós
22.	Hilbert Curve	Kétdimenziós
23.	Archimedean Chords	Spirális
24.	Octagram Spiral	Spirális

Mind a 24 kitöltési geometriához öt-öt ütő- és szakítópróbatestet készítettünk [8] szerint. A mérések száma mindkét esetben 120, összesen tehát 240 volt.

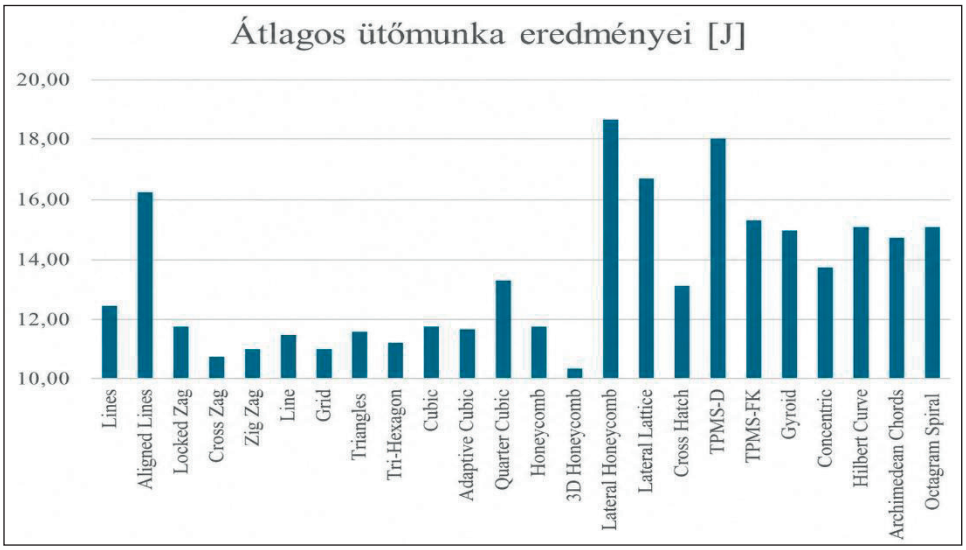
Az ütővizsgálatokhoz az ISO 179, a szakítóvizsgálatokhoz az ISO 527 szabvány figyelembevételével kialakított próbatesteket alkalmaztuk [1, 2].

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

3.1. Ütővizsgálatok

Az ütővizsgálatok eredményei alapján az egyes kitöltési geometriák között jelentős különbségek mutatkoztak az átlagos ütőmunka tekintetében. A legnagyobb átlagos értéket a **Lateral Honeycomb** kitöltés érte el (18,6 J), amelyet a **TPMS-D** (18,0 J), majd a **Lateral Lattice** (16,6 J) követett.

A 24 vizsgált geometria átlagos ütőmunka-értékei az 1. ábrán láthatók. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kitöltési geometria jelentősen befolyásolta a próbatestek ütővizsgálat során mutatott viselkedését.



1. ábra. Az egyes kitöltések átlagos ütőmunka értékei

A legnagyobb és a legkisebb átlagos ütőmunka közötti különbség jól szemlélteti, hogy a kitöltés geometriája meghatározó szerepet játszhat a próbatestek ütőterheléssel szembeni viselkedésében.

Az ábrán látható értékek alapján ugyanakkor nem állapítható meg egyértelmű összefüggés a geometriák síkbeli vagy térbeli kialakítása és az elért ütőmunka között. Egyes síkbeli mintázatok is viszonylag magas értéket mutattak, míg a térbeli geometriák között is jelentős eltérések figyelhetők meg. Ez arra utal, hogy az ütőmunka alakulását nem önmagában a geometriai csoport, hanem az adott kitöltési mintázat sajátosságai is befolyásolják.

3.2. Szakítóvizsgálatok

A szakítóvizsgálatok során a legnagyobb átlagos szakítóerőt a **Gyroid** kitöltés érte el (1622 N), amelyet a **Cubic** (1592 N) és az **Adaptive Cubic** (1580 N) követett. A 24 vizsgált kitöltési geometria átlagos szakítóerő-értékeit a 2. ábra mutatja be.

Az eredmények alapján az egyes kitöltési geometriák között jelentős különbségek figyelhetők meg.



2. ábra. A vizsgált kitöltési geometriák átlagos szakítóerő-értékei

A vizsgálati eredmények arra utalnak, hogy a kitöltési geometria számottevő hatással van a próbatestek húzóterheléssel szembeni viselkedésére. A különböző térbeli és síkbeli mintázatok eredményei közötti eltérések alapján azonban önmagában a geometriai csoportosítás nem elegendő a szakítóerő alakulásának magyarázatára; az egyes mintázatok sajátos szerkezeti jellemzőit is figyelembe kell venni.

3.3. A mérési eredmények szórásának vizsgálata

A mérési eredmények szórásának vizsgálata azért fontos, mert az átlagérték önmagában nem mutatja meg, hogy az ismételt mérések mennyire térnek el egymástól, így nem jellemzi teljes körűen az eredmények megbízhatóságát.

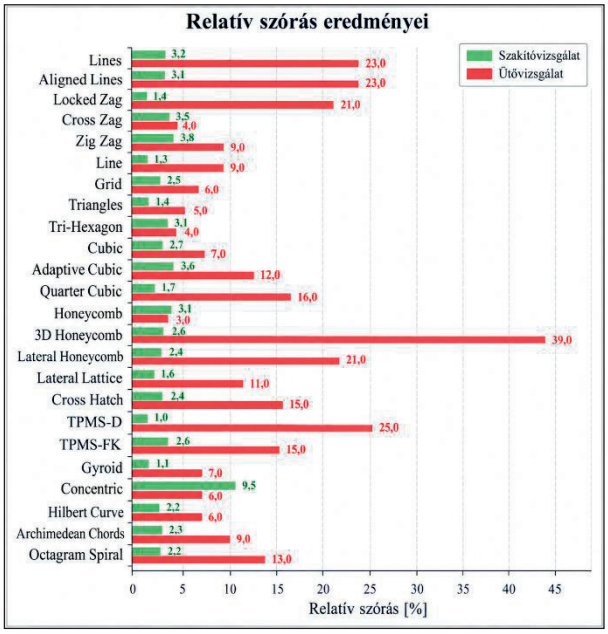
Ütővizsgálatok szórása. Az ütővizsgálatok során az egyes kitöltési geometriákhoz tartozó öt mérés relatív szórása jelentős eltéréseket mutatott. Különösen figyelemre méltó, hogy a nagy átlagos ütőmunkát elérő geometriák közül a **Lateral Honeycomb** és a **TPMS-D** relatív szórása kifejezetten magas volt. A diagram alapján előbbi értéke megközelítőleg 21%, utóbbié 25%. A Lateral Lattice esetében ennél kisebb, de szintén számottevő szórás [7] figyelhető meg.

A legnagyobb relatív szórást a **3D Honeycomb** mutatta, közel 39%-os értékkel. Ez azt jelzi, hogy az ehhez a geometriához tartozó ismételt mérések eredményei között jelentős eltérések voltak. Ezzel szemben több kitöltés, például a **Honeycomb**, a **Cross Zag**, a **Triangles** és a **Tri-Hexagon** esetében a relatív szórás alacsony maradt (3. ábra).

A nagy relatív szórás a mérési eredmények jelentős bizonytalanságára utal. Dinamikus igénybevétel esetén ezért a nagy átlagos ütőmunka önmagában nem elegendő a kitöltési geometria megbízható jellemzéséhez. A szórás figyelembevétele is kiemelten fontos, mivel a nagy eltérések megnehezítik a várható mechanikai viselkedés precíz előrejelzését.

Szakítóvizsgálatok szórása. A szakítóvizsgálatok során lényegesen kisebb relatív szórásértékek adódtak, mint az ütővizsgálatok esetében. A geometriák többségénél a relatív szórás [7] jellemzően 4% alatt maradt, ami a reprodukálhatóság szempontjából elfogadható. A legkisebb szórást a **TPMS-D** kitöltés mutatta (0,93%), míg a legnagyobb érték a **Concentric** geometriához tartozott (9,46%). Ez utóbbi a többi mintázathoz képest jelentősen nagyobb mérési bizonytalanságot jelez (3. ábra).

A szakítóvizsgálatok esetében tehát a kisebb relatív szórású geometriák eredményei megbízhatóbban reprodukálhatók, míg a nagyobb szórású mintázatoknál az átlagérték bizonytalansága is nagyobb. Fontos azonban, hogy a kisebb szórás a mérési eredmények egyenletességét jelzi, nem pedig önmagában a nagyobb szakítószilárdságot.



3. ábra. Az ütővizsgálatok és a szakítóvizsgálatok szórása

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok alapján a kitöltési geometria jelentősen befolyásolta a nyomtatott próbatestek mechanikai viselkedését. A szakítóvizsgálatok során a **Gyroid** kitöltés érte el a legnagyobb átlagos szakítóerőt (1622 N), miközben a relatív szórása mindössze 1,06% volt. Ez a nagy teherbírás és a mérési eredmények megbízhatóságának kedvező kombinációját jelenti, így a vizsgált geometriák közül húzóterhelés esetén ez tekinthető a legkedvezőbb választásnak.

Az ütővizsgálatok során a **Lateral Honeycomb** mutatta a legnagyobb átlagos ütőmunkát (18,6 J), azonban a 21%-os relatív szórás jelentős bizonytalanságot jelez. A **TPMS-D** szintén nagy ütőmunkát ért el (18,0 J), de a 25%-os relatív szórása még nagyobb. Ezeknél a geometriáknál tehát a nagy energiaelnyelő képességhez számottevő mérési bizonytalanság társul.

A vizsgálatok alapján nem jelölhető ki egyetlen, minden terhelési mód esetén egyértelműen legkedvezőbb kitöltési geometria. Szakítóterhelésre a **Gyroid** nagy teherbírása és kis szórása miatt kedvező választás, míg ütőterhelés esetén a **Lateral Honeycomb** nagy átlagos ütőmunkája mellett a jelentős szórást is figyelembe kell venni. A megfelelő kitöltés kiválasztása ezért az adott igénybevételtől és a terhelhetőség, illetve a mérési eredmények megbízhatósága közötti elvárt kompromisszumtól függ.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk köszönetünket kifejezni a Terplán Zénó Szakkollégiumnak a kutatás megvalósításához szükséges támogatásáért, valamint a Miskolci SZC Andrássy Gyula Gépipari Technikumnak, hogy a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges vizsgáló-berendezéseket rendelkezésre bocsátották.

6. IRODALOM

[1] MSZ EN ISO 179-1*: Műanyagok. Charpy-féle ütési jellemzők meghatározása*, 2023.

[2] MSZ EN ISO 527-1: *Műanyagok. Szakítószilárdság meghatározása,* 2019.

[3] I. GIBSON, D. W. ROSEN ÉS B. STUCKER: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, New York: Springer, 2010.

[4] SUNLU GROUP, *PETG Product Information. Technical Data Sheet,* 2024.

[5] N. SA'UDE ÉS N. A. N. AB LATIB: *A Study On the Mechanical Properties of PLA, ABS and PETG Filament Printed by Various Type of Infill Design Using 3D Printing Machine,* Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 162–167, 2023.

[6] W. SHEHBAZ ÉS Q. PENG: *Multi-Objective Optimization of FDM Infill Patterns Using Design of Experiments Considering Load-Path Alignment,* Eng, *(ISSN: 2673-4117) vol*. 7, no. 4, p. 175, 2026.

[7] A. FIELD: *Discovering Statistics Using SPSS*, 3 szerk., London: SAGE Publications, 2009.

[8] D. C. MONTGOMERY: *Design and Analysis of Experiments*, 8. kiadás, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2013.

[9] I. MASKERY et al.: *Insights into the Mechanical Properties of Several Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structures Made by Polymer Additive Manufacturing*, Polymer, vol. 152, pp. 62–71, 2018.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.5

PROFILHORONY VIZSGÁLÓ BERENDEZÉS TERVEZÉSE

DESING OF PROFILE GROOVE TESTING DEVICE

Besenyei István[*], *Dr. Bihari Zoltán*[**]

ABSZTRAKT

Machine-building aluminium profiles are extruded products with complex cross-sections. Their cross-sectional geometries vary considerably depending on the design of the extrusion die. Two of their main features, the central bore and the T-slot, are designed to accommodate other machine elements, thereby enabling the profile to be assembled and mounted. The load-bearing capacity of the slot ribs can be determined based on manufacturers' catalogues or by means of finite element analysis. However, it is advisable to develop a test fixture for the experimental investigation of actual profiles, allowing the obtained results to be compared with the available data..

1. BEVEZETÉS

Korábbi publikációkban ismertettük a gépépítő alumínium profilok felhasználási körét, a keresztmetszetük felépítését, illetve bemutattunk néhány végeselem vizsgálatot ezen alumínium profilok háromdimenziós modelljein. Sok esetben a háromdimenziós modelleken végzett szimulációk hosszadalmas számítási feladatnak bizonyultak, amelyek vagy nem hoztak megbízható eredményt, vagy a feladat bonyolultságától függően a program nem tudta lefuttatni az adott vizsgálatot.

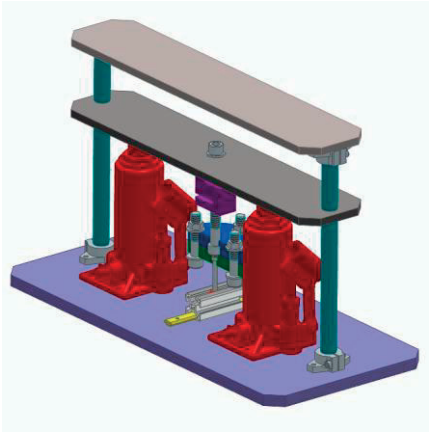
Természetesen a VEM (Véges Elem Modellezés) rengeteg információval szolgál azokban az esetekben, amikor bizonyos vizsgálatok elvégzése a valós próbatesteken csak nehezen kivitelezhető lenne, azonban a valós anyagokon végzett kísérletek validálhatják a szimulációt. Ezért is egészítettük ki az alumínium profilok centrál furatának vizsgálatát a valós próbatesteken elvégzett mérésekkel.

A centrál furat mellett az alumínium profilok másik lényeges része a horonyorom, aminek terhelés hatására bekövetkező deformációját korábban az Ansys programban végeselem vizsgálatnak vetettük alá. A Bosch és az Item gyártók profiljainak profilhorony terhelhetőségét összehasonlítottuk azokkal a terhelési adatokkal, amiket a gyártók feltüntetnek a termékkatalógusaikban. Ehhez a részhez kapcsolódóan készült egy olyan berendezés, amely segítségével négyzet keresztmetszetű profilokat lehet vizsgálni. Az imént említett készülék háromdimenziós modellje és működési elve egy korábbi publikációban már szerepelt. Azóta az elkészült berendezésen sikeresen elvégeztünk néhány vizsgálatot, amelyek biztató eredményeket mutattak.

2. A BERENDEZÉS FELÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSE

Az 1. ábrán a korábban háromdimenziós formában összeállított készülék koncepciója látható.

Egy korábbi tanulmányban [1] már röviden ismertettük, hogy a két hidraulikus elven működő emelő függőleges mozgatásával a rajtuk elhelyezett lemezt elmozdítják, ami az erőmérő egységen, csavarokon és horonyanyán keresztül a vizsgált profil hornyát terheli. Az éppen aktuális alumínium profil alsó hornya az alaplaphoz csatlakoztatott profilhoronyba illeszkedik, ami megakadályozza a profil függőleges elmozdulást, kvázi rögzíti az alaphoz.

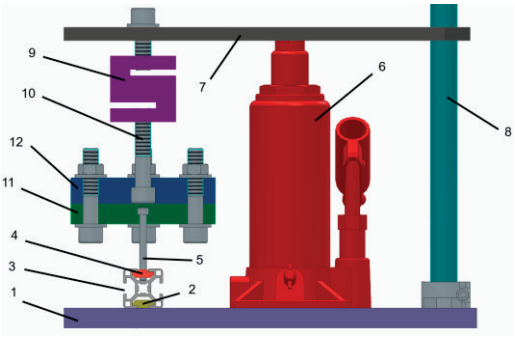


1. ábra. Horonyorom vizsgálatra kialakított készülék első változata

A készülék felépítése a 2. ábra szerint:

1. Alaplap
2. Profilhorony
3. Alumínium profil
4. T-horonyanya
5. Belső kulcsnyílású csavar_1
6. Hidraulikus elven működő emelő
7. Lemezlap
8. Rúd
9. Erőmérő bélyeg
10. Belső kulcsnyílású csavar_2
11. Tárcsa_1
12. Tárcsa_2

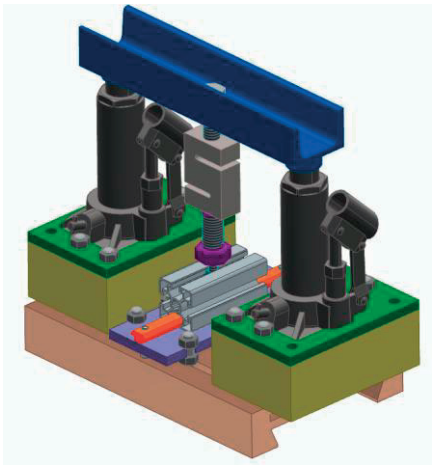
* *PhD hallgató, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet*
** *egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet*



2. ábra. A készülék felépítése

3. A BERENDEZÉS MEGVALÓSÍTÁSA

A 3. ábrán a berendezés pontosított, gyártható modellje látható.



3. ábra. A megvalósított berendezés háromdimenziós modellje

Amint az jól látható, a korábbi háromdimenziós modellhez képest kisebb-nagyobb változtatásokat kellett elvégezni az összeállításban, hogy a rendelkezésre álló, illetve beszerezhető alapanyagok felhasználásával is megvalósítható legyen (3. ábra).



4. ábra. Hornyolt alaplap

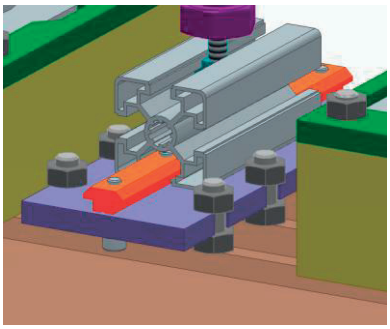
A készülék alapjának egy, a Gép- és Terméktervezési Intézet műhelyében meglévő marógép hornyolt szánját választottuk (4. ábra). Olyan alaplapot kerestünk, amely kellő merevséggel rendelkezik, illetve a „T” hornyok segítségével könnyen csatlakoztatható hozzá a szerkezet felépítménye. A hornyoknak köszönhetően azok irányában szabadon mozgathatók a bennük elhelyezett hatlapfejű csavarok, amelyek fején a szemben lévő lapokat méretre kellett munkálni, a horonyban történő megfelelő illeszkedés érdekében.

A szánon egy 10 mm vastag S235JR anyagú acéllemez helyezkedik el (5. ábra).



5. ábra. A megmunkált acéllemez

A lemez oldalán található félkör alakú kivágásokon keresztül oldalirányból az alaplap T-hornyaiba csúsztatható lelapolt fejű csavarok szárai illeszkednek, amelyek egy-egy hatlapú anyával szorítják a lemezt az alaplaphoz. A középen található furatokon keresztül egy adott hosszúságú hosszított horonyanya rögzíthető a lemezhez, szintén csavarok segítségével. Ez a horonyanya viszonylag könnyen cserélhető, amely lehetővé teszi a különböző gyártók különböző horonygeometriával forgalmazott profiljainak a vizsgálatát. Így a 3030, a 4040, a 4545, az 5050 és a 6060 profilokon is lehet méréseket végezni (6. ábra).

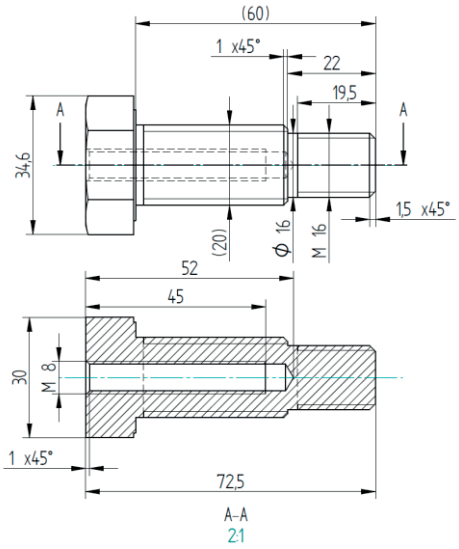


6. ábra. Alumíniumprofil rögzítése a készülékben

A hosszított horonyanyák lehetővé teszik, hogy a vizsgált profilok könnyen a helyükre csúsztathatók legyenek, és a vizsgálat során függőleges irányban ne mozduljanak el. A horonyanyák nagy hosszuknak köszönhetően jelentős felületen érintkeznek a profilok hornyával, így biztosítják azok stabil rögzítését.

A különböző profilok felső hornyának terhelhetőségét kívánjuk vizsgálni ezzel a berendezéssel. Ezért a profil felső hornyában elhelyezhető a vizsgálatnak megfelelő T-horonyanya vagy kalapácsfejű csavar. A csavarok szár része egy, a 7. ábra szerinti egyedi megmunkálással készült M20x60-as hatlapfejű csavar fejrészében kialakított menetes furatba illeszthető. Ez az M20-as csavar utólag leesztergált vége csatlakoztatható az erőmérő egységhez, amivel a későbbiekben adott időközönként a pillanatnyi húzóerő értékeket lehet rögzíteni táblázatos formában. Ebből az adatbázisból a

későbbiek során diagramok is készíthetők. A 7. ábrán a megmunkálandó csavar alkatrészrajza látható.



7. ábra. M20x60-as csavar alkatrészrajza

Ha nem kalapácsfejű csavart szeretnénk terhelni, hanem egy horonyanyát, akkor az M20-as csavar fejrészébe kialakított menetes furatba egy adott hosszúságú menetes szár egyik vége illeszthető, a másik vége pedig a profilhoronyban elhelyezett horonyanyához csatlakozik.



8. ábra. Hegesztett U-profil

Az erőmérő egység (2. ábra, 9. tétel) M16-os csavarral rögzíthető egy U-acélhoz (8. ábra), amelyhez a két szélen látható gyűrű alakú megvezető elemek hegesztett kötéssel csatlakoznak. Erre az acél profilra középen egy furat készül, amelyre az M16-os csavar, valamint az erőmérő egység [4] rögzíthető. A két hidraulikus emelő mozgatásával fölfelé emelhető az U-acél profil.

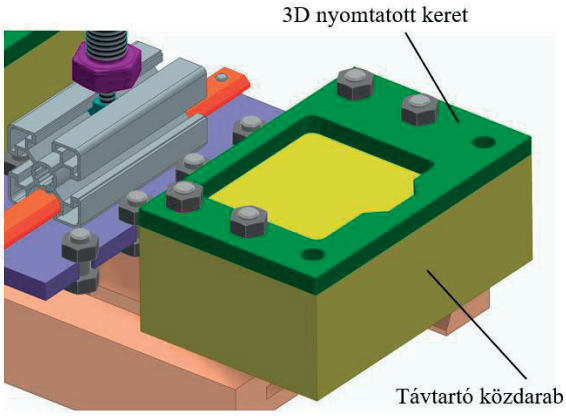


9. ábra. 3 tonnás autóemelők

Mivel ez az egység a kialakított menetes kötéseken, valamint az erőmérő cellán keresztül kényszerkapcsolatban van a profil hornyával, így közvetett úton, de valójában a horonyormot terheljük.

A rendelkezésre álló egyenként 3 tonnás teherbírású hidraulikus emelők bizonyos geometriai méretei, nevezetesen a magasságuk nem ideális a szerkezet szempontjából. Egy szűk tartományban a kezdeti magasság az emelőfejben kialakított menetes kapcsolattal szabályozható ugyan, de a kívánt méret létrehozása, valamint a nyomóterhelés közben kialakuló káros kihajlás veszélyének elkerülése érdekében az emelők alá egy-egy közdarab került.

Ezek a távtartó darabok a rajtuk található furatokon keresztül, átmenő csavarok alkalmazásával a T-hornyú alaphoz rögzíthetők (10. ábra). Ezt kiegészíti egy-egy 3D nyomtatással készült keret, amelynek funkciója a hidraulikus emelők megfelelő pozícióban tartása, az oldalirányú elmozdulás megakadályozása.



10. ábra. Közdarab (sárga) és nyomtatott keret (zöld) az emelők alatt

4. PRÓBAVIZSGÁLAT

A teljes készülék megépítését követően próbaméréseket végeztünk.

A vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy a 4545-ös Bosch profilba helyezett, M8-as menetes furattal rendelkező 10-es horonyanya húzóterhelés hatására milyen módon károsodik. Arra kerestem a választ, hogy a horonyanya vagy a profil szenved-e előbb képlékeny alakváltozást, illetve melyik elem szakad el hamarabb.

Lehetséges esetek:

1. A vizsgált profil hornya a terhelés hatására kidomborodik, kipúposodik.
2. A profilban elhelyezett horonyanya menetes furatából húzás hatására a menetes rész kiszakad.
3. A horonyanyához csatlakoztatott menetes szár külső részén lévő menet elnyíródik húzás hatására.
4. Az M20-as hatlapfejű csavarban kialakított menetes furatból a csatlakoztatott hossz mentén kiszakad a menetes rész.

5. EREDMÉNYEK

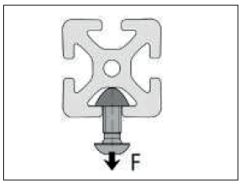
A vizsgálatot elvégezve a 2. esethez hasonló jelenséget tapasztaltunk (11. ábra). Az M8-as menetes szár azon része, amely a horonyanyába illeszkedett, kb. 6 mm hosszan képlékenyen alakváltozott, illetve a horonyanya menetes furata is károsodott.



11. ábra. A sérült menetes szár

A vizsgálatot 5 alkalommal megismételve minden alkalommal hasonló eredményt kaptunk, miközben az alumínium profil horonyormán látható, maradandó elváltozást nem tapasztaltunk.

Az Item gyártó katalógusában s>2 biztonsági tényezővel tüntetik fel a profilhornyok terhelésének adatait (12. ábra).



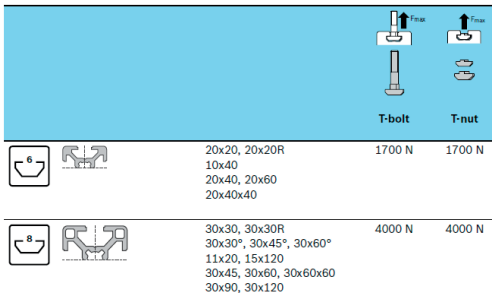
Nutform		
normal	500 N	1.750 N
leicht		500 N
E		

Angabe der zulässigen Zugkraft F auf die Nutflanken. Diese Nennlasten beinhalten bereits Sicherheitsfaktoren (S > 2) gegen plastische Deformation.

12. ábra. Item profilok hornyának terhelhetőségi adatai [2]

A Bosch gyártó esetében az összekötő elemekre vonatkozó terhelő adatok találhatóak meg a katalógusban a legnagyobb menetre vonatkozóan (13. ábra).

A Bosch katalógusában az összekötő elemekre található adat a képlékeny alakváltozást még meg nem haladó terhelőerő értékére. A 8-as és 10-es horony megengedhető értékei e szerint a T-horonyanyát tekintve 4000N és 6000N. Mivel jelentős deformáció nem történt, inkább csak a csatlakoztatott gépelem menetes része szenvedett képlékeny deformációt, így arra lehet következtetni, hogy az alumínium profilokkal történő építés során a gyenge láncszemnek az összekötő elemeket tekinthetjük.



13. ábra. Bosch profilok hornyának terhelhetőségi adatai a csatlakoztatható összekötő elemekre vonatkozóan [3]

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A fejlesztés eredményeként egy olyan vizsgálóberendezést készítettünk, amely alkalmas a gépépítő alumíniumprofilok hosszanti hornyainak teherbírás-vizsgálatára. A készülék nemcsak a Bosch négyzet keresztmetszetű profiljaival használható, hanem más gyártók profiljainak vizsgálatára is lehetőséget biztosít, amennyiben azokhoz megfelelő horonyanya alkalmazható. A berendezés továbbfejlesztésének következő lépése az erőmérő egység által szolgáltatott mérési adatok rögzítésének megvalósítása.



14. ábra. A megépített készülék összeszerelt állapotban

7. IRODALOM

[1] Besenyei István, Dr. Bihari Zoltán: Simulation studies in advanced engineering, JOURNAL OF PHYSICSCONFERENCE SERIES (1742-6588 1742-6596): 3142 Paper 012003. 10 p. (2025)

[2] Item: Basic elements; 2007

[3] Rexroth Bosch Group. Aluminium Structural Framing System. Version 9.0.

[4] Besenyei István, Dr. Bihari Zoltán: Determination of the coefficient of friction between aluminium profiles and other materials, DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES (1785-6892 2064-7522): 16 1 pp 49-60 (2026)

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.6

A GENERATÍV TERVEZÉS ALKALMAZÁSI TERÜLETEINEK ÉS A TERMÉKJELLEMZŐKRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK ELEMZÉSE

ANALYSIS OF THE APPLICATION AREAS OF GENERATIVE DESIGN AND ITS IMPACT ON PRODUCT CHARACTERISTICS

Borsodi Eszter[*]*, Dr. Takács Ágnes Judit*[**]

ABSTRACT

Based on case studies from the literature, the study examines the application areas and objectives of generative design, as well as the resulting changes in product characteristics compared to traditional design. It demonstrates that generative design can be used not only for mass and structural optimization but also to meet other requirements, such as better functional performance or customization. The analysis indicates that generative design can influence a range of interconnected technical, material, geometric, manufacturing, economic, and sustainability characteristics. These findings lay the foundation for a multidimensional comparison of traditional and generative design alternatives in the future.

1. BEVEZETÉS

A terméktervezés során a mérnöknek egyszerre számos követelményt kell figyelembe vennie (pl.: tömeg, szilárdság, anyagfelhasználás, fenntarthatóság), amelyek hatással vannak egymásra, így valamilyen szintű kompromisszumra van szükség.

A hagyományos tervezés egy lineáris folyamat, amely során a tervezők emberi kreativitásra és tapasztalatokra alapozva hozzák létre, majd iteratív módon finomítják a CAD-modelleket. Ezzel szemben a generatív tervezés egy algoritmikus megközelítés: a szoftver különböző kritériumok (korlátozások, terhelések), célkitűzések és gyártási megfontolások alapján alkot meg egy megoldás halmazt, amelynek minden modellje optimális alternatívának tekinthető [1].

A generatív tervezéssel létrehozott termékek bizonyos tulajdonságai eltérnek a hagyományos tervezéssel létrehozott alternatívák tulajdonságaitól. A generatív tervezés rövid definiálása után a cikk célja szakirodalmi esettanulmányok vizsgálatára támaszkodva annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy mely területeken és milyen okból alkalmazzák a generatív tervezést, és hogy mely termékjellemzők változnak a generatív tervezés következtében a tradícionálisan megtervezett modellhez képest. Az így beazonosított termékjellemzők a későbbiekben alapként szolgálhatnak a hagyományos és a generatív módon tervezett termékek többdimenziós összehasonlító vizsgálatához.

2. GENERATÍV TERVEZÉS DEFINÍCIÓJA

A generatív tervezési folyamat lépései az 1. ábrán láthatók, mely az Autodesk Fusion 360 generatív tervezési keretrendszere alapján készült [2].

Az első lépés a kiindulási geometria meghatározása, amely a megtartandó területek és az újratervezendő terek kijelölésével történik. Szükség van tehát egy alapgeometria megtervezésére, ami történhet közvetlenül a programban a generatív tanulmány lefuttatása előtt, vagy egy korábban hagyományos módon megtervezett 3D modell importálásával.

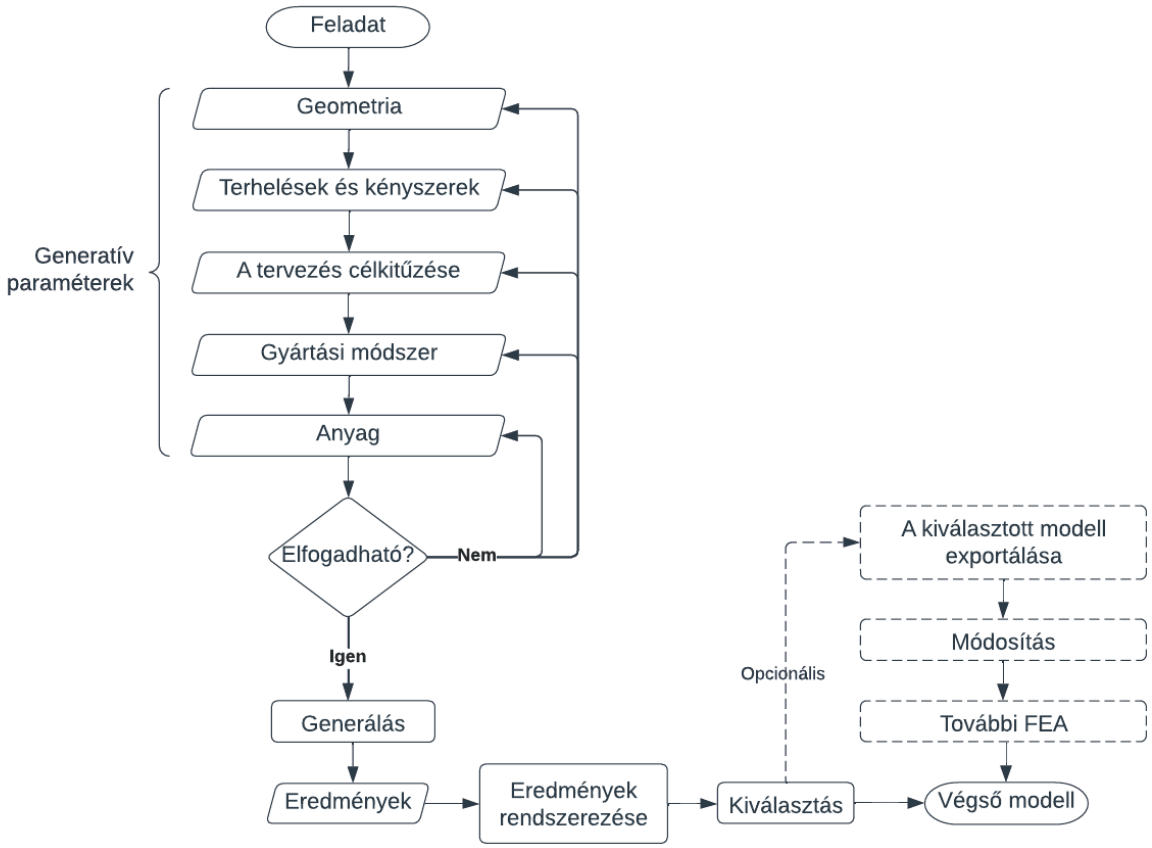
Gépészeti tervezésnél az objektum geometriai meghatározásán túl a bemeneti generatív paraméterek magukba foglalhatják a terhelések és kényszerek helyét, illetve nagyságát, az anyagtulajdonságokat, a gyártástechnológiát, valamint a tervezési célt. A tervezés célja a szilárdság maximalizálása vagy a tömeg minimalizálása.

A szoftver a generálás előtt ellenőrzi a megadott adatokat. Ha az ellenőrzés sikeres, megkezdődhet a generálási folyamat, amely a bemeneti paramétereknek megfelelő 3D modellek sorozatát hozza létre. A generálás a felhőben zajlik, majd az eredmények megérkeznek a tervező számítógépére.

Lehetőség van a kiválasztott modellek exportálására és hagyományos CAD-eszközökkel történő módosítására, ám ilyenkor a szerkesztést követően további végeselem-analízis (FEA) elvégzése ajánlott.

A generatív tervezés gyakran eredményez organikus megjelenésű formákat [3]. Ez megerősíti a generatív tervezés azon képességét, hogy szerkezetileg hatékony alakot hoz létre az anyag kritikus, teherhordó pontok mentén történő újraelosztásával (hasonlóan az evolúció során kialakult természetes struktúrákhoz).

* *PhD hallgató, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet*
** *Egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Gép- és Terméktervezési Intézet*



1. ábra. A generatív tervezés folyamata [2]

3. A GENERATÍV TERVEZÉS ALKALMAZÁSI TERÜLETEI ÉS CÉLJAI

A generatív tervezést számos műszaki területen alkalmazzák. Az alkalmazása célja leggyakrabban a tömegcsökkentés a mechanikai követelmények (szilárdság, deformáció, biztonsági tényező) biztosítása, vagy akár javítása mellett. Az ilyen típusú szerkezeti és tömegoptimalizálás különösen a járműiparban (repülőgépek [4], drónok [5] [6], és gépjárművek tartó- és konzolelemei, ill. futóműalkatrészei [7]), a robotikában (robotkarok [8]), és az építészetben [9] [10] elérendő célkitűzés.

A tömeg csökkenésének következtében csökken az anyagfelhasználás a gyártás során, viszont a bonyolult szerkezeti felépítés költségesebbé teheti a gyártást, mivel a generatív módon tervezett alkatrészeket jellemzően nem sorozatgyártással, hanem egyedileg, vagy kisszériában, additív gyártási technológiákkal állítják elő [4-6].

Járműipari alkalmazások esetében a tömeg csökkenés több szempontból is kedvező lehet, mivel a kisebb tömeg hozzájárulhat a dinamikai teljesítmény javításához, azonos megengedett össztömeg mellett növelheti a rendelkezésre álló hasznos teher nagyságát, valamint mérsékelheti a jármű mozgatásához szükséges energia- vagy üzemanyagfogyasztást [11] [12]. Továbbá az energia- vagy üzemanyagfogyasztás csökkenése nemcsak az üzemeltetési költségeket csökkenti, hanem a fenntarthatóságot is támogatja [11] [12].

A generatív tervezést nem kizárólag az előbb említett optimalizálásra használják, hanem az adott termék funkciójához kapcsolódó teljesítmény optimalizálásának eszköze is lehet hőcserélők [13] és hűtőcsatornák [14] tervezésénél. A komplex belső geometriák létrehozásának lehetősége ugyanis a hőátadási teljesítmény növelését vagy a hűtési idő csökkenését okozhatja [13] [14].

Továbbá a szakirodalomban arra is látható példa, amikor a generatív tervezést ütközési/biztonsági teljesítmény optimalizálására használják [15].

Ahogy az korábban említésre került, a generatív tervezés gyakran összefonódik az additív gyártással. Ez magában hordozza azt is, hogy a kettő együtt speciális követelményeket kielégítő termékek létrehozására alkalmas. Ezért alkalmazzák orvostechnikai területen implantátumok, protézisek készítésére, ahol a generatív tervezés a (bio)mechanikai és funkcionális követelmények mellett az egyedi, pácienshez illő geometriai követelményeket egyidejűleg teljesíti [16] [17].

4. A GENERATÍV TERVEZÉS HATÁSA A TERMÉKJELLEMZŐKRE

Jól látható, hogy a generatív tervezés nem csupán egy termékjellemző optimalizálását jelenti, hanem az alkatrész több, egymással összefüggő paraméterét változtathatja meg.

A vizsgált szakirodalmi művek alapján a generatív tervezés leginkább a termék tömegének, mechanikai tulajdonságainak, gyártási anyagfelhasználásának, energiafelhasználásának, geometriai kialakításának, funkcionális teljesítményének, és személyre szabhatóságának módosulásával jár együtt.

Megállapítható továbbá a szakirodalmi elemzés alapján, hogy a generatív módon kialakított termékek hagyományos megfelelőikkel való összehasonlítása nem korlátozható egyetlen műszaki paraméterre, például a tömegre vagy a mechanikai teljesítményre. Különböző műszaki, anyaggal kapcsolatos, gyártási, üzleti és érték, illetve fenntarthatósági jellemzők együttes vizsgálata szükséges annak érdekében, hogy a konvencionális módon megtervezett alternatívákat a generatívan megtervezettekkel összehasonlíthassuk, ami egy multidimenzionális termékértékelési megközelítés alkalmazását teszi szükségessé.

Az alábbi, nagyobb kategóriák szerint csoportosított termékjellemzők változnak meg a generatív tervezés során:

Műszaki teljesítmény
- funkcionális teljesítmény (pl.: hőátadási teljesítmény, hűtési idő, ütközési teljesítmény)
- deformáció
- von Mises-feszültség
- biztonsági tényező
- ergonómia

Tömeg és anyag
- tömeg
- gyártási anyagfelhasználás
- gyártási hulladék mennyisége

Geometriai tulajdonságok
- geometriai komplexitás
- belső szerkezet

Gyárthatóság
- gyártási komplexitás
- tervezési idő
- gyártási idő

Üzleti és érték szempontok
- gyártási technológia előállítási költsége
- üzemeltetési költség (elsősorban energia/üzemanyag felhasználáshoz köthetően)
- anyagköltség
- személyre szabhatóság mértéke

Fenntarthatóság
- anyagfelhasználás
- energiafelhasználás

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmány szakirodalomkutatásra támaszkodva mutatta be, hogy mely területeken és milyen célból alkalmazzák a generatív tervezést, és hogy milyen változásokat okoz a generatív tervezés a hagyományosan megtervezett kiindulási alaphoz képest.

Ebből jól látható, hogy a generatív és a tradícionális tervezési megoldások közötti különbség több, egymással összefüggésben lévő termékjellemzőben jelenik meg. Ennek következtében összehasonlításuk többdimenziós értékelési megközelítést igényel, melynél figyelembe lehet venni egyes dimenziók eltérő fontosságát.

A Circular Product Design Score (röviden: CPDS, magyarul: Körforgásos Terméktervezési Pontszám) egy új többdimenziós termékértékelési keretrendszer, amely a körforgásos gazdaság szempontjait integrálja a mérnöki tervezés döntéshozatali folyamatába. A kutatás tovább folytatásában megtörténhet annak a megválaszolása, hogy az ebben a tanulmányban beazonosított megváltozó termékjellemzők mely CPDS értékelési dimenzióban jelennek meg. Ezt követően kiválasztott esettanulmányok CPDS-ral való értékelésével megalkotható a hagyományos és a generatív tervezés összehasonlító elemzése.

6. SUMMARY

Based on literature research, this paper presented the application areas and purposes of generative design. It also demonstrated the impact of generative design on product characteristics.

In conclusion, the difference between generative and conventional design solutions appears in several interrelated product characteristics. Consequently, their comparison requires a multidimensional evaluation approach, which can take into account the different importance of individual dimensions.

The Circular Product Design Score (CPDS) is a novel, multidimensional product assessment framework that integrates circular economy principles into the engineering design decision-making process. Future research could determine which CPDS assessment dimensions reflect the identified changing product characteristics. Subsequently, by evaluating selected case studies using the CPDS, a comparative analysis of conventional versus generative design can be conducted.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A TUDOMÁNYOS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTÉRIUM EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.

EKÖP
Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program

8. IRODALOM

[1] BHAGAT, R., SATPUTE, V., SIRSAT, A., SHEJWAL, A.: *Comparative Study of Conventional and Generative Design Process*, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol. 11, No. 5, 2023, pp. 6024-6032, https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.52834

[2] BORSODI, E., TAKÁCS, Á.: *Generative Design: an overview and its relationship to Artificial Intelligence*, Design of Machines and Structures, Vol. 12, No. 2, 2022, pp. 50–55, https://doi.org/10.32972/dms.2022.013

[3] PRICE, M., ZHANG, W., FRIEL, I., ROBINSON, T. T., MCCONNELL, R., NOLAN, D., KILPATRICK, P., BARBHUIYA, S., & KYLE, S.: *Generative design for additive manufacturing using a biological development analogy*, Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 9, No. 2, 2022, pp. 463–479. https://doi.org/10.1093/jcde/qwac016

[4] PILAGATTI, A. N., ATZENI, E., SALMI, A.: *Exploiting the generative design potential to select the best conceptual design of an aerospace component to be produced by additive manufacturing,* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 126, 2023, pp. 5597–5612. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11259-7

[5] SEREGI, B. L., FICZERE, P.: *Weight Reduction of a Drone Using Generative Design*, Hungarian Journal of Industry and Chemistry, Vol. 49, No. 2, 2022, pp. 19–22. https://doi.org/10.33927/hjic-2021-16

[6] ANDRIES, V., ZAHARIA, S.-M.: *Generative Design, Simulation, and 3D Printing of the Quadcopter Drone Frame*, Applied Sciences, Vol. 15, No. 17, 2025, Article 9647. https://doi.org/10.3390/app15179647

[7] BHAT, A., GUPTA, V., AULAKH, S. S., ELSEN, R. S.: *Generative design and analysis of a double-wishbone suspension assembly: a methodology for developing constraint oriented solutions for optimum material distribution*, Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 21, No. 3, 2023, pp. 927–942. https://doi.org/10.1108/JEDT-06-2021-0293

[8] GOWTHAM, V. K., SIDHARTH, B. S., SCHILBERG, D., DOSS, A. S. A.: *Optimization of a Robotic Arm Using Generative Design*, in: Recent Advances in Materials Technologies, 2022, pp. 347–369. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3895-5_28

[9] CHEW, Z. X., WONG, J. Y., TANG, Y. H., YIP, C. C., MAUL, T.: *Generative Design in the Built Environment*, Automation in Construction, Vol. 166, 2024, Article 105638. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105638

[10] GRADIŠAR, L., KLINC, R., TURK, Ž., DOLENC, M.: *Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies*, Buildings, Vol. 12, No. 12, 2022, Article 2194. https://doi.org/10.3390/buildings12122194

[11] CANDELA, A., SANDRINI, G., GADOLA, M., CHINDAMO, D., MAGRI, P.: *Lightweighting in the automotive industry as a measure for energy efficiency: Review of the main materials and methods*, Heliyon, Vol. 10, No. 8, 2024, Article e29728. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29728

[12] TOLOUEI, R., TITHERIDGE, H.: *Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 14, No. 6, 2009, pp. 385–399. https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.005

[13] Li, N., Hugo J. M., Serret, D., Zhang, Y., Gomes, S.: *A two-step parametric generative method for heat exchangers design in additive manufacturing*, Procedia CIRP, Vol. 109, 2022, pp. 508–512 https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.286.

[14] WILSON, N., GUPTA, M., PATEL, M., MAZUR, M., NGUYEN, V., GULIZIA, S., COLE, I.: *Generative design of conformal cooling channels for hybrid-manufactured injection moulding tools*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 133, 2024, pp. 861–888. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13754-x

[15] ZHANG, L., LI, Z., HUANG, J.: *Product performance prediction and optimisation based on generative design: a case study of the collision of automotive front bumper beam*, International Journal of Crashworthiness, Vol. 30, No. 4, 2024, pp. 351–361. https://doi.org/10.1080/13588265.2024.2406837

[16] CHENG, M., NAYAK, A., LEUNG, Y. Y.: *A semi-automated design workflow for patient-specific implants in orthognathic surgery using generative design*, International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Vol. 54, No. 12, 2025, pp. 1195-1200. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2025.03.011

[17] TEL, A., KORNFELLNER, E., MOSCATO, F., VINAYAHALINGAM, S., XI, T., ARBOIT, L., ROBIONY, M.: Optimizing efficiency in the creation of patient-specific plates through field-driven generative design in maxillofacial surgery, Scientific Reports, Vol. 13, 2023, Article 12082. https://doi.org/10.1038/s41598-023-39327-8

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.7

FORGÓ ÉS EGYENESVONALÚ HALADÓ MOZGÁST VÉGZŐ TALAJMŰVELŐ SZERSZÁMOK REZGÉSEI: A JELKARAKTERISZTIKA KÜLÖNBSÉGEI ÉS JELFELDOLGOZÁSI KÖVETKEZMÉNYEI

ROTARY VS. LINEAR TILLAGE TOOL VIBRATIONS: DIFFERENCES IN SIGNAL CHARACTER AND IMPLICATIONS FOR SIGNAL PROCESSING

Tamim Deeb[*], *Dr. László Kátai*[**]

ABSTRACT

Tillage tools move through the soil either by rotation, as in a rotary tiller, or by straight-line traction, as in a cultivator tine. This paper compares the vibrations of the two from the signal processing point of view. Blade entries at fixed rotor angles make the rotary tool's signal periodic in angle, while irregular soil failure makes the linear tool's signal quasi-periodic and largely stochastic. In four recent experimental studies, the motion type rarely guided the choice of processing. A simulation case study then shows that angle-domain methods reveal the blade-pass order and a worn blade of a rotary tiller, whereas the modelled tine wear is best detected by distance-domain features evaluated statistically over windows. The paper closes with recommendations for measurement and processing.

ABSZTRAKT

A talajművelő szerszámok vagy forgó mozgással, mint a talajmaró, vagy egyenes vonalú vontatással, mint a kultivátorkapa, haladnak a talajban. A cikk a kétféle szerszám rezgéseit jelfeldolgozási szempontból hasonlítja össze. A forgó szerszám jele a rögzített rotorszöghelyzetekben bekövetkező késbelépések miatt a szög szerint periodikus, az egyenes vonalú mozgású szerszám jele viszont a talaj szabálytalan törése miatt kváziperiodikus és nagyrészt sztochasztikus. Négy friss kísérleti tanulmány összehasonlítása azt mutatja, hogy a jelfeldolgozási módszer megválasztásakor a mozgás típusát ritkán veszik figyelembe. Egy szimulációs esettanulmány szerint a szögtartománybeli módszerekkel a talajmaró késbelépési rendje és egy kopott kés is kimutatható, a modellezett kapakopás viszont a megtett út szerinti tartományban, szakaszonként statisztikusan kiértékelt jellemzőkkel ismerhető fel a legjobban. A cikk gyakorlati ajánlásokat is megfogalmaz.

1. INTRODUCTION

Soil tillage is one of the most energy-intensive field operations [1], and the condition of the tools affects energy consumption and work quality [2]. Vibration measurement is an attractive way to monitor the tools, since accelerometers can be mounted on the tool or its frame during normal field operation [3, 4].

Tillage tools move through the soil in two different ways. A rotary tiller is driven from the tractor power take-off (PTO), and its blades cut the soil as the rotor turns. A cultivator tine, chisel or subsoiler is drawn through the soil in a straight line. In this paper they are called rotary and linear tillage tools. Both vibrate, but their signals differ in character and call for different processing.

Vibration analysis has its roots in rotating machinery, where a shaft produces a signal that repeats every revolution [5]. The Fourier spectrum, order tracking and time-synchronous averaging exploit this periodicity [6–8]. A rotary tiller inherits it, because each blade enters the soil at a fixed rotor angle [9]. A linear tool has no such reference: its excitation comes from the soil failing irregularly in front of it, so the signal is largely random [10, 11], and its frequency follows the forward speed.

Vibration studies on both tool types exist [3, 4, 11], but their processing is rarely matched to the motion: the periodicity of rotary signals and references such as the rotor angle or the travelled distance may be left unused. A recent review recommends angle-domain processing for agricultural gearboxes and PTO shafts [12], but does not address soil-engaging tools. In our literature search we did not find a systematic comparison of rotary and linear tillage tool vibrations from the signal processing point of view.

To fill this gap, Section 2 contrasts the physical origins of the two signal types, Section 3 compares four recent experimental studies, Section 4 applies identical methods to simulated signals of a rotary tiller with a worn blade and a worn cultivator tine, and Section 5 gives practical recommendations.

* *PhD student, Institute of Technology, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences (MATE), Páter K. u. 1., H-2100 Gödöllő, Hungary, e-mail: Deeb.Tamim@phd.uni-mate.hu*
** *Full professor, Institute of Technology, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences (MATE), Páter K. u. 1., H-2100 Gödöllő, Hungary, e-mail: Katai.Laszlo@uni-mate.hu*

2. ROTARY VS. LINEAR TILLAGE TOOL VIBRATIONS: PHYSICAL ORIGINS AND SIGNAL CHARACTERISTICS

2.1. Rotary tillage tools

The blades of a rotary tiller are staggered on the rotor so that they enter the soil one after another at evenly spaced rotor angles [9]. With rotor speed n (r/min) and Z blade entries per revolution, the blade-pass frequency is

$$f_b = Z \cdot n/60. \quad (1)$$

Each entry produces a cutting-force pulse whose size depends on the bite length, which is set by the ratio of blade tip speed to forward speed [9]; the gearbox adds gear mesh components. Soil heterogeneity changes the size of each pulse but not its timing, which is fixed by the rotor angle. The signal is therefore periodic, more precisely cyclostationary, in angle, like that of a rotating machine [8, 13]. When the PTO speed fluctuates, the harmonics of f_b smear in the spectrum but can be restored by resampling to equal angle increments [6]. A worn blade breaks the symmetry between blades and produces a once-per-revolution modulation, which angle-synchronous averaging can isolate [7].

2.2. Linear tillage tools

A drawn tine pushes a soil block ahead of it until the soil fails along a shear surface; the block breaks away, the force drops, and the cycle repeats [10, 14, 15]. With a typical block length l_f, the soil failure frequency is

$$f_f(t) = v(t)/l_f, \quad (2)$$

where $v(t)$ is the forward speed. Unlike the blade spacing on a rotor, l_f is not a design dimension: it depends on the tool geometry [15], the tine size and the soil moisture [10, 14], and it varies from block to block, so the resulting loads are random [11]. The forward speed also fluctuates with wheel slip. The force excites the tool itself; reported natural frequencies are 5.5–9.4 Hz for a spring-supported sweep [16] and 15–22 Hz for cultivator shanks and tine supports [4, 11]. Stones add isolated impacts. The signal is quasi-periodic at best and largely stochastic.

2.3. Consequences for signal processing

For the rotary tool the natural reference is the rotor angle, derived from the PTO speed. In the angle domain the signal consists of sharp orders, and since every revolution repeats, synchronous averaging suppresses the random soil contribution and reveals blade-to-blade differences.

For the linear tool the natural reference is the travelled distance, available from a radar or GNSS speed sensor. Resampling to distance removes the speed dependence in Eq. (2), but cannot make the signal periodic, because l_f is random. With a coefficient of variation c of the block length, the spectral peak keeps a relative width of the order of

$$\Delta f_f / f_f \sim c \quad (3)$$

even after resampling. As the tine never returns to the same position, synchronous averaging is not applicable; instead, spectra and features are estimated over windows of travelled distance, and changes in tool condition appear as shifts in their distributions. Table 1 summarises the comparison.

Table 1. Rotary and linear tillage tool vibrations compared

Attribute	Rotary tool (rotary tiller)	Linear tool (cultivator tine)
Main excitation	Blade entries at fixed rotor angles	Soil failure cycle, soil variation, stones
Characteristic frequency	$f_b = Z \cdot n/60$ and harmonics	$f_f = v/l_f$, broad, speed-dependent
Signal character	Periodic, cyclostationary	Quasi-periodic to stochastic
Reference signal	Rotor angle (PTO speed)	Distance (radar or GNSS speed)
Suitable processing	Order tracking, angle-synchronous averaging	Distance resampling, windowed spectra and features

3. COMPARISON OF FOUR RECENT CASE STUDIES

Four recent open-access studies with measured data were compared, two on rotary tillers (R1, R2) and two on cultivator tines (L1, L2) (Table 2).

Table 2. Four recent case studies compared

Attribute	R1 [3]	R2 [17]	L1 [4]	L2 [11]
Tool	Rotary tiller, rotor 252 r/min	Walk-behind micro-tiller, cutter roll 2 and 3 r/s	Field cultivator shank	Research cultivator, 12 tines
Sensor	Triaxial accelerometers on tiller gearbox, lower links, axles, cab	Accelerometers on engine, cutter-roll bearing, handle	Accelerometer on shank, GPS-synchronised	Strain gauges on tine supports
Reference signal	None reported	None reported	GPS (georeferencing only)	None reported
Processing	RMS, FFT, PSD, time-frequency	RMS, spectrum, SPH-based model	Vibration with soil moisture, Random Forest, XGBoost	Histograms, autocorrelation, spectrum
Main result	Resonance near 350 Hz with harmonics	Peaks at 3.6 and 7.2 Hz assumed to come from rotor	Soil compaction predicted, $R^2 = 0.87$	Random, weakly autocorrelated loads

Rotary studies. R1 measured a tractor and rotary tiller combination at three forward speeds, with triaxial accelerometers at the tiller gearbox, the lower links, the axles and the cab [3]. RMS values, FFT, power spectral density and time-frequency maps showed a tiller resonance near 350 Hz with harmonics at 700 and 1050 Hz, and vibration rising with speed. No rotor-angle reference or order analysis was reported, although the nominal rotor speed was given. R2 measured a walk-behind micro-tiller at the engine, cutter-roll bearing and handle, and compared RMS values with a model driven by soil forces from smoothed particle hydrodynamics, which matched within 4.3–6.4 % at 3 r/s [17]. At a cutter-roll speed of 2 r/s the bearing showed peaks at 3.6 and 7.2 Hz, which the authors assumed to be related to the rotor. They are not integer multiples of the shaft frequency, and without angle-domain analysis their origin remained unconfirmed.

Linear studies. L1 mounted a GPS-synchronised accelerometer on a cultivator shank and reported the shank's natural frequency (about 21.5 Hz) in the laboratory [4]. Vibration data combined with soil moisture predicted the penetrometer cone index with $R^2 = 0.87$ using Random Forest and XGBoost. GPS served to match vibration to soil samples, not as a processing domain, and no spectral analysis of the field signals was reported. L2 measured the loads on twelve tine supports with strain gauges and treated them explicitly as random vibration [11]. Histograms and autocorrelation showed weakly correlated random signals, and the spectra were compared with the support's natural frequency of 15.15 Hz. The spectra of all twelve supports were nearly identical (correlation ≥ 0.979), suggesting that the excitation is set by the soil and operating conditions rather than by the individual tine.

Synthesis. (i) The linear studies treat the tine signal statistically, in agreement with Section 2.2. (ii) Neither rotary study exploited the periodicity of the rotary tool: blade-pass orders were not separated from resonances, and in R2 the link between peaks and rotor speed was assumed rather than demonstrated. (iii) None of the studies used its natural reference, the rotor angle or the travelled distance, as a processing domain. The motion type is thus rarely used to guide the choice of processing; Section 4 shows with simulated signals what can be lost as a result.

4. SIMULATION CASE STUDY

4.1. Signal models

Acceleration signals of both tool types were synthesised and processed with the same methods. The parameters are plausible assumptions, so the results illustrate Section 2 rather than describe a specific machine.

The rotary tiller is driven from a 540 r/min PTO through a 15/37 bevel gear pair ($n = 218.9$ r/min). With six flanges of four blades, $Z = 24$ and, by Eq. (1), $f_b = 87.6$ Hz. Each blade entry produces an impact and a cutting-force pulse whose amplitude scatters randomly (coefficient of variation 0.25) to represent soil heterogeneity. The forces excite two structural modes, and gear mesh, stones and noise are added. The PTO speed fluctuates by −7/+8 %, and a once-per-revolution tachometer is assumed. In the worn case, blade 1 produces 40 % less force.

The cultivator tine is rigid and works at forward speeds of 2.0, 1.5 and 2.5 m/s with 4 % random speed fluctuation. The force builds up while a soil block is loaded and drops when it fails. The block length is random, with mean $l_f = 75$ mm and $c = 0.25$, so by Eq. (2) f_f ranges from about 19 to 36 Hz. The force excites two tine modes (60 and 420 Hz), and soil strength variation, stones and noise are added. Wear was modelled generically by 20 % longer blocks and 15 % higher force. The travelled distance is the integral of the true (error-free) forward speed.

4.2. Results

The spectrum of the rotary tool consists of sharp lines at f_b, its harmonics and the gear mesh, whereas that of the linear tool shows only broad humps at the tine modes, and its envelope spectrum is spread over the range of f_f (Figure 1).

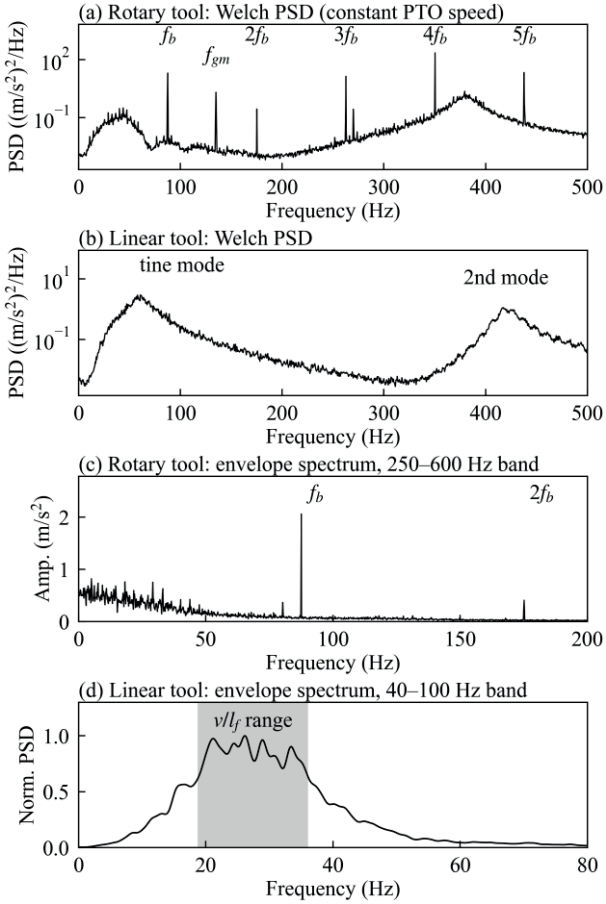


Figure 1. Power spectral density of (a) the rotary and (b) the linear tool; envelope spectra of (c) the rotary and (d) the linear tool (shaded: range of the soil failure frequency)

With fluctuating PTO speed the blade-pass line smears and its peak-to-floor ratio falls from 48.6 to 28.3 dB; angular resampling restores a sharp order 24 at 47.7 dB (Figure 2a, b). Angle-synchronous averaging over 217 revolutions shows the worn blade 3.9 dB below the others, against +0.2 dB for the healthy rotor (Figure 2c, d). In single revolutions the random soil forces mask the fault: the worn blade is the weakest in only 40 % of them.

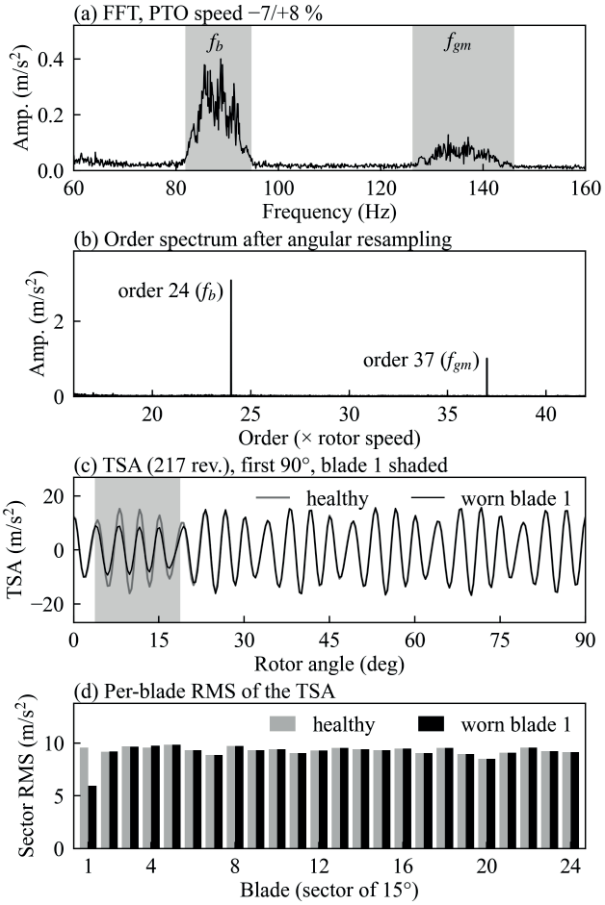


Figure 2. Rotary tool with PTO speed fluctuation: (a) spectrum; (b) order spectrum after angular resampling; (c) angle-synchronous average, healthy and with blade 1 worn; (d) RMS of the average per blade sector

For the linear tool, the soil failure band follows the forward speed (Figure 3a). The time-domain envelope spectrum has a relative width (half-power width over peak frequency) of 0.87. After resampling the envelope to distance, the peak lies at 13.5 1/m, within 1.5 % of $1/l_f$, and the relative width falls to 0.34, but the peak stays broad, of the order of c (Eq. 3; Figure 3b, c). The envelope autocorrelation falls from 0.25 at one block length to nearly zero at ten, while for the rotary tool it remains 0.59 after ten blade spacings, so a distance-synchronous average has nothing to synchronise to.

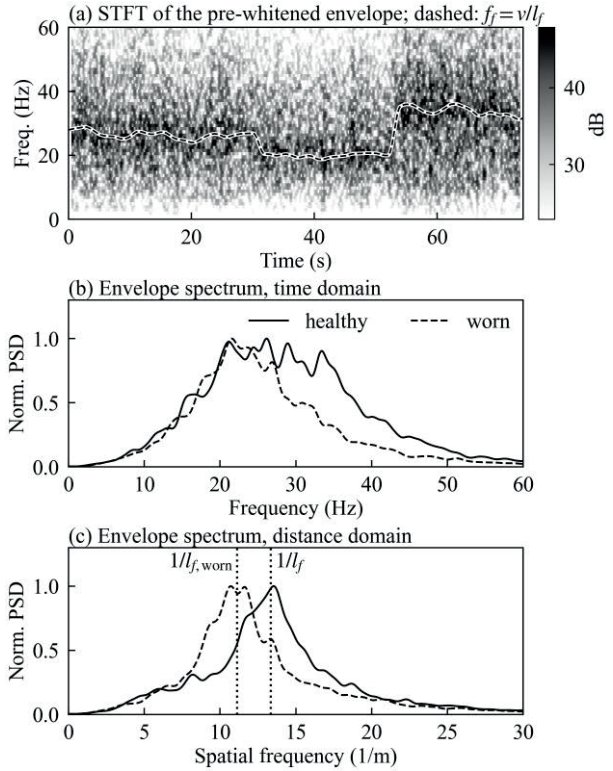


Figure 3. Linear tool: (a) time-frequency map of the envelope, soil failure frequency dashed; envelope spectrum (b) in time and (c) in distance, healthy (solid) and worn (dashed)

The tine condition was therefore assessed over 3 m windows (37 healthy and 35 worn, all stone-free). Of eleven features compared by Cohen's d (worn minus healthy mean over pooled SD), the distance-domain ones separated healthy and worn tines best (dominant spatial frequency $d = -1.85$, spatial centroid −1.41; Figure 4). Their time-domain counterparts reached only −0.81 and −0.85 because they follow the speed, and RMS and band energies stayed below 0.5. Stones were isolated transients: an envelope detector found 28 of 29, and the 300–600 Hz kurtosis flagged every window with a stone and none without.

5. SUMMARY

A rotary tiller produces vibration that is periodic in rotor angle, whereas a drawn tine produces quasi-periodic vibration that follows the forward speed and never repeats at a fixed position. The four studies reviewed rarely made use of this difference. In the simulation, angular resampling restored the blade-pass order of the rotary tool from 28 dB to 48 dB above the floor, and angle-synchronous averaging revealed a worn blade 3.9 dB below the others. For the linear tool, distance resampling narrowed the soil failure peak only to the width set by the random block length, synchronous averaging was not applicable, and the modelled tine wear was best detected by distance-domain features evaluated over windows (Cohen's |d| up to 1.85).

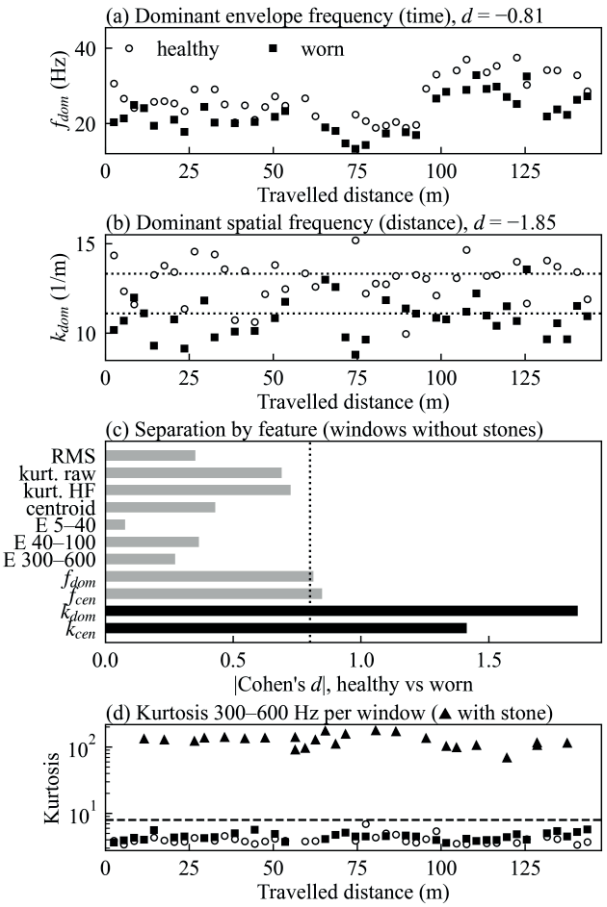


Figure 4. Windowed features of the linear tool: dominant frequency (a) in time and (b) in distance; (c) separation by feature (E: band energy, HF: 300–600 Hz, dom: dominant, cen: centroid; dotted: |d| = 0.8); (d) kurtosis per window (triangles: stone; dashed: threshold 8)

The results lead to the following recommendations:

- Record a reference signal with the vibration: the rotor angle or PTO speed for rotary tools, the forward speed from a radar or GNSS sensor for linear tools.
- For rotary tools, resample to the angle domain and use angle-synchronous averaging to compare individual blades.
- For linear tools, resample the envelope to distance and evaluate spectra and features over distance windows; do not expect sharp lines or apply synchronous averaging.
- Judge a change in tool condition from the shift of a feature distribution over many windows, not from a single record.
- Choose the sensor position with the analysis in mind: a shank-mounted sensor also records the shank's own resonance [4], while signals on a bearing housing are strongly influenced by the tractor [18].

As the study used simulated signals with assumed parameters and ideal references, the conclusions should next be verified by field measurements on both tool types. The simulation code is available from the authors on request.

6. REFERENCES

[1] LAL R.: *Carbon emission from farm operations*, Environment International, Vol. 30, No. 7, 2004, pp. 981–990, https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.005

[2] NATSIS A., PAPADAKIS G., PITSILIS J.: *The Influence of Soil Type, Soil Water and Share Sharpness of a Mouldboard Plough on Energy Consumption, Rate of Work and Tillage Quality*, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 72, No. 2, 1999, pp. 171–176, https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0360

[3] GAO Y., YANG Y., FU S., FENG K., HAN X., HU Y., ZHU Q., WEI X.: *Analysis of Vibration Characteristics of Tractor–Rotary Cultivator Combination Based on Time Domain and Frequency Domain*, Agriculture, Vol. 14, No. 7, 2024, 1139, https://doi.org/10.3390/agriculture14071139

[4] JANBAZIALAMDARI S., FLIPPO D., RIDDER E., BROKESH E.: *Soil Compaction Prediction in Precision Agriculture Using Cultivator Shank Vibration and Soil Moisture Data*, Agriculture, Vol. 15, No. 17, 2025, 1896, https://doi.org/10.3390/agriculture15171896

[5] RANDALL R. B.: *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, Wiley ISBN 978-0-470-74785-8, Chichester, 2011, https://doi.org/10.1002/9780470977668

[6] FYFE K. R., MUNCK E. D. S.: *Analysis of computed order tracking*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, No. 2, 1997, pp. 187–205, https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0056

[7] McFADDEN P. D.: *A revised model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 1, No. 1, 1987, pp. 83–95, https://doi.org/10.1016/0888-3270(87)90085-9

[8] ANTONI J., BONNARDOT F., RAAD A., EL BADAOUI M.: *Cyclostationary modelling of rotating machine vibration signals*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, No. 6, 2004, pp. 1285–1314, https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00088-8

[9] ZHENG S., LU T., LIU J., TIAN Y., HAN M., TAI M., GAO S., LIU T., WANG D., ZHAO Z.: *Discrete Element-Based Design of a High-Speed Rotary Tiller for Saline-Alkali Land and Verification of Optimal Tillage Parameters*, Agriculture, Vol. 15, No. 3, 2025, 269, https://doi.org/10.3390/agriculture15030269

[10] RAJARAM G.: *Collapse failure in dry clay soils caused by tine implements*, Journal of Terramechanics, Vol. 27, No. 2, 1990, pp. 69–78, https://doi.org/10.1016/0022-4898(90)90001-3

[11] CÂRDEI P., CONSTANTIN N., MURARU V., PERSU C., SFÎRU R., VLĂDUȚ N.-V., UNGUREANU N., MATACHE M., MURARU-IONEL C., CRISTEA O.-D., LAZA E.-A.: *The Random Vibrations of the Active Body of the Cultivators*, Agriculture, Vol. 13, No. 8, 2023, 1565, https://doi.org/10.3390/agriculture13081565

[12] JI K., ZHOU Z., LI Y.: *Vibration-Based Fault Diagnosis of Agricultural Machinery: A Review of Field Excitation, Signal Processing, Intelligent Models and Engineering Deployment*, Machines, Vol. 14, No. 7, 2026, 795, https://doi.org/10.3390/machines14070795

[13] ANTONI J.: *Cyclostationarity by examples*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 23, No. 4, 2009, pp. 987–1036, https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.10.010

[14] RAJARAM G., GEE-CLOUGH D.: *Force-distance behaviour of tine implements*, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 41, No. 2, 1988, pp. 81–98, https://doi.org/10.1016/0021-8634(88)90191-6

[15] GODWIN R. J.: *A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces*, Soil and Tillage Research, Vol. 97, No. 2, 2007, pp. 331–340, https://doi.org/10.1016/j.still.2006.06.010

[16] TAMÁS K.: *Modelling the interaction of soil with a passively-vibrating sweep using the discrete element method*, Biosystems Engineering, Vol. 245, 2024, pp. 199–222, https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.06.006

[17] LIU X., HAO W., CHEN Y., HAO Q., ZHANG X., SUN Z.: *Development of Vertical Vibration Model for Micro-Tiller by Smoothed Particle Hydrodynamics Method*, AgriEngineering, Vol. 6, No. 3, 2024, pp. 2481–2493, https://doi.org/10.3390/agriengineering6030145

[18] CECCHINI M., PICCIONI F., FERRI S., COLTRINARI G., BIANCHINI L., COLANTONI A.: *Preliminary Investigation on Systems for the Preventive Diagnosis of Faults on Agricultural Operating Machines*, Sensors, Vol. 21, No. 4, 2021, 1547, https://doi.org/10.3390/s21041547

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.8

A SZIMULÁCIÓ SZEREPE ÉS TAPASZTALATAI A HEGESZTÉSI TECHNOLÓGIA KIALAKÍTÁSA SORÁN

THE ROLE OF SIMULATION AND ASSOCIATED EXPERIENCES IN DEVELOPMENT OF WELDING TECHNOLOGY

Dömötör Dávid, Nagy Dávid*, Tóth Dániel**, Horváth Dániel**, Dr. Háry András****

ABSTRACT

This study presents a comprehensive analysis of the laser welding process for high-purity copper, focusing on a simulation environment based on the finite element method (FEM). The combined application of physical validation and simulated welding enables the reduction of manufacturing defects, optimization of parameters, and significant reduction of development time and costs. The paper shows the experiences and learnings of welding technology simulation of an industrial component.

1. BEVEZETÉS

A rohamosan tért nyerő elektromos autóipar és az energetikai szektor által használt eszközök gyártásának elengedhetetlen alapanyaga a nagytisztaságú réz és annak különböző ötvözetei. Kiváló elektromos és hővezető képességei miatt széles körben alkalmazzák, azonban éppen ezen tulajdonságok teszik nehezen hegeszthetővé a hagyományos ömlesztőhegesztési (TIG, MIG, MAG) eljárásokkal.

A modern ipari gyártástechnológiák gyökeres változásokon mennek keresztül, ahol a felgyorsuló digitalizáció, illetve az Ipar 4.0 irányelvei új követelményeket állítanak a hatékonyság, minőség és költségoptimalizálás terén. Ebben a keretrendszerében kiemelt hangsúly kerül a digitális ikrek (digital twin) használatára, amely segítségével egy fizikai eszköz vagy gyártási folyamat teljes mértékben leképezhető és vizsgálható a virtuális térben. A hagyományos, fizikai próbálkozásokon alapuló termékfejlesztést napjainkban egyre inkább a szimuláció-vezérelt gyártástervezés váltja fel, egészíti ki [1].

Mivel a nagytisztaságú réz (Cu) hegesztése jelentős termofizikai kihívásokat jelent, a hegesztési szimulációk alkalmazása révén már a tervezőasztalon feltárhatók az olyan gyártástervezési hibák, mint a túlzott hőbevitelből származó vetemedés vagy a maradó feszültségek okozta alkatrészfáradás. A virtuális kísérletek és szimulációs módszerek drasztikusan képesek csökkenteni a prototípusgyártás anyagköltségeit és a termékfejlesztés átfutási idejét.

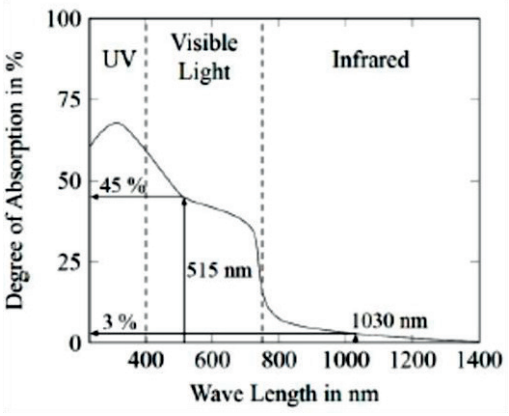
2. A VIZSGÁLT HEGESZTÉSI TECHNOLÓGIA

2.1. A réz lézeres hegesztése, kihívások

A réz kiváló elektromos és hővezető képességgel rendelkezik szobahőmérsékleten, a hővezetési tényezője eléri a 401 W/(m·K) értéket. Ez a drasztikus hődisszipációs képesség azt eredményezi, hogy a hegesztés során az anyagba táplált hőenergia rendkívül gyorsan elvezetődik a fókuszált zónából.

A lézeres hegesztésnél az abszorpció erősen hullámhosszfüggő, a tiszta réz a közeli infravörös hullámhosszon (1030-1070 nm) rendkívül alacsony, megközelítőleg 3-5%-os abszorpciós képességgel rendelkezik szobahőmérsékleten (1. ábra) [2]. Bár ez az érték folyékony fázisban drasztikusan megnő (gyakran 50% fölé), a kezdeti olvadékmedence stabil kialakítása komoly akadályokba ütközik. Kék (450 nm) és zöld (515 nm) hullámhosszú lézerforrások alkalmazásával az abszorpciós tényező szobahőmérsékleten a 40-45%-ot közelíti, olvadáspont közelében viszont ezeknél az eljárásoknál nem növekedik tovább.

A lézersugaras kulcslyuk (keyhole) hegesztés, kiegészítve a modern sugároszcillációs (wobble) technológiával, ígéretes megoldást kínál ezekre a problémákra. Azonban az optimális paraméterek megtalálása fizikai próbálkozásokkal költséges és időigényes.



1. ábra Hullámhossz, abszorpciós tényező összefüggése, szobahőmérsékleten [2]

** ZalaZONE Ipari Park Zrt. duális mérnök hallgató*
*** TC-Zone Mérnöki Kft., vezető mérnök*
**** ZalaZONE Ipari Park Zrt. vezérigazgató*

2.2. A lézeres hegesztés technológiája

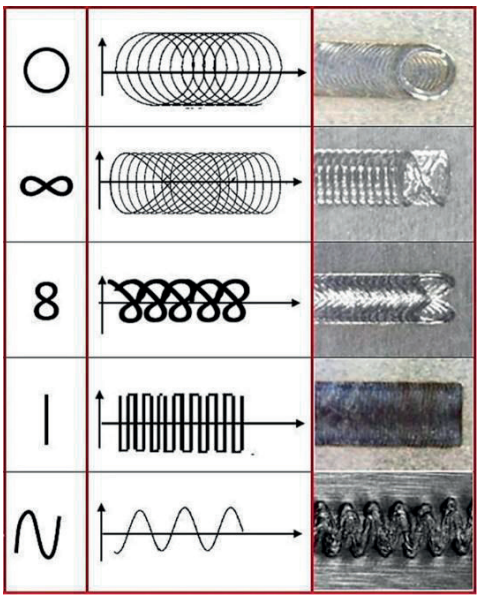
A lézersugaras hegesztésnél a hőt koncentrált lézernyaláb szolgáltatja; a fókuszban a teljesítménysűrűség a több millió W/cm²-t is elérheti, így keskeny, mély varrat hozható létre, kis hőhatásövezettel és csekély hőtorzulással.

Hővezetéses üzemmódban az energiasűrűség a felület megolvasztásához elég, a párolgási küszöböt azonban nem éri el. Kis teljesítményű vagy defókuszált nyalábbal történő hegesztésnél a varratmélység tized-milliméterektől kb. 1 mm-ig terjed, ezért ezt az eljárást vékony falú munkadarabokhoz (elektronika, akkumulátorgyártás) használják [3].

Kulcslyukas (keyhole) üzemmódban az intenzitás meghaladja a párolgási küszöböt: a fém lokálisan elpárolog, a gőznyomás kinyomja az olvadékot, és vékony, mély kulcslyuk jön létre. A sugár ennek falán többszörösen visszaverődve nyelődik el, amely tovább fokozza az abszorpciót, így már több milliméter vastag elemek is hegeszthetők [3].

A fémek hegesztése során fellépő reflexió, hővezetési problémák leküzdésére számos innováció, sugárkezelési technika született. Ilyen technológia az iparban alkalmazott, dinamikus sugároszcilláció (Wobble) [4].

A hagyományos lézerhegesztésnél a fénysugár egy fix pontra irányul, vagy egy egyenes mentén mozog. Ezzel szemben a Wobble technológia során a lézersugarat optikai módon, nagy sebességgel előre meghatározott mintában (kör, nyolcas, végtelen) mozgatják, miközben az a varrat hosszát lepásztázza.



2. ábra Sugár-oszcillációs hegesztés [5]

A sugároszcillációval kiküszöbölhető az illesztési pontatlanság is, mivel a lézersugár nem egy vékony pontban éri a munkadarabokat. Továbbá, a hőbevitel eloszlása is sokkal egyenletesebb, csökkenthető a vetemedés, repedések kockázata. A sugár folyamatos mozgása által keveri az olvadékfürdőt is, ez segít abban, hogy a bezáródott gázbuborékok a felszínre törjenek a varrat megdermedése előtt [4].

3. IPARI PÉLDA ÉS SZIMULÁCIÓS MODELL

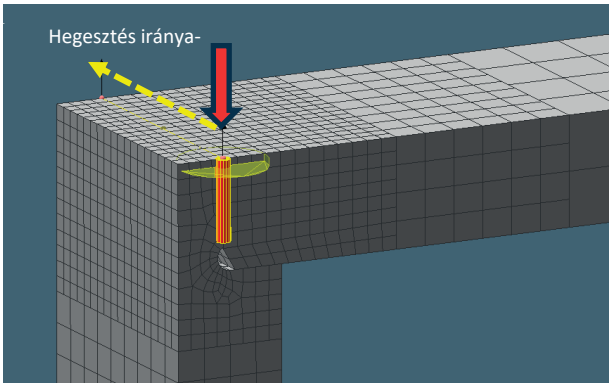
3.1. Kötésvizsgálat

A szimulációs modell felépítését megelőzően elengedhetetlen a valós fizikai paraméterek meghatározása és a fizikai tesztelések elvégzése. Bármilyen szimulációs modell csak annyira pontos, amennyire a bemeneti adatai és a validációs mérései.

A kapcsolódó kutatás során a vizsgált kötések nagytisztaságú réz lemezek között jöttek létre, szállézer-hegesztőgép alkalmazásával.

A hegesztés alapvető paraméterei az alábbiak voltak:

- Hegesztés alapanyaga: 3 mm vastag, 7 mm széles, 150 mm hosszú, nagytisztaságú réz lemez.
- Hegesztési varrat hossza: 7 mm.
- Lézersugaras kulcslyukhegesztés teljesítménye: 1,5-2 kW.
- Lézersugaras felület melegítési teljesítménye: 1,5-2,5 kW.
- Hegesztési sebesség: 2 m/min.
- Sugároszcilláció: kör alakú, 0,45 mm átmérő, frekvenciája 200-300 1/s.

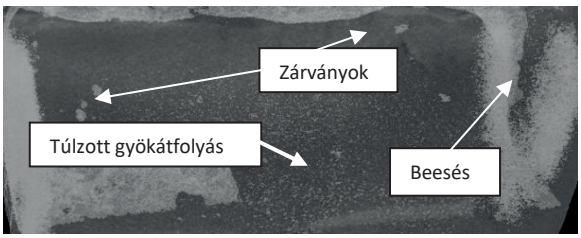


3. ábra A létrehozandó hegesztési kötés modellje

A hegesztés elvégzése után a létrejött kötést vizsgálni kell. A varratmélység, beolvadási zónák, hőhatási övezetek meghatározására a következő eljárásokat alkalmaztuk:

- Roncsolásmentes CT (számítógépes tomográfia) vizsgálat: a teljes hegesztési hossz alatt a beolvadás jellegének és a hegesztési hibák meghatározására (4.ábra).
- Roncsolásos metallográfiai csiszolatvizsgálat: a szimulációhoz szükséges hőhatási zónák méreteinek ellenőrzésére (5.ábra).

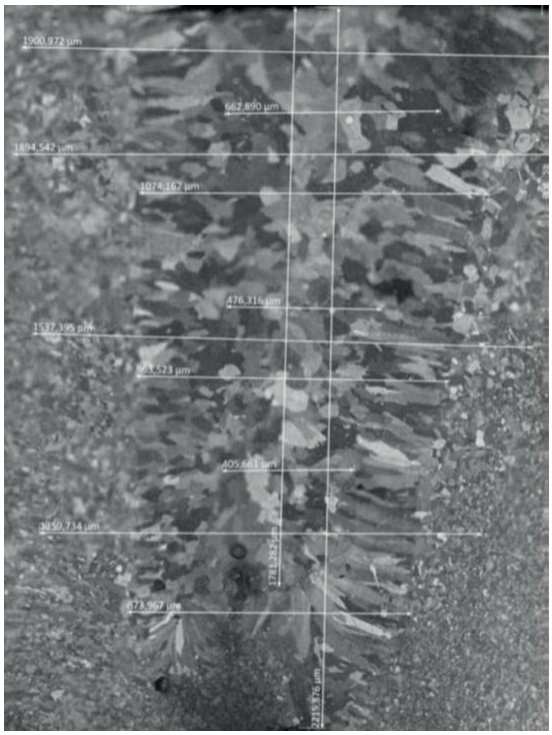
Mért adatok: beolvadás mélysége: 2,2 mm, a hegfürdő felső átmérője: 1,27 mm.



4. ábra Hegesztési hibák CT felvétele

A réz lézeres hegesztési minőségére vonatkozó előírások, szabványok (pl. ISO 13919-2) három minőségi szintet határoznak meg:

- B (Szigorú): Legmagasabb követelmény, nagy igénybevételnek kitett alkatrészeknél kritikus.
- C (Közepes): Közepes minőségi osztály.
- D (Enyhe): A kötések csak kisebb igénybevételnek felelnek meg.

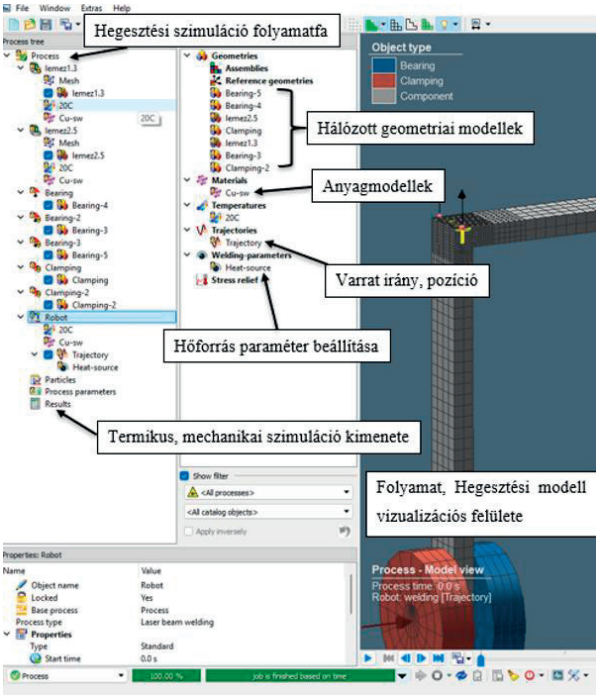


5. ábra A hegesztés keresztmetszeti csiszolatának mikroszkópos vizsgálata

A kötések vizsgálata során megfigyelhető hiba a varrat végéhez érve a beesés. Az idevonatkozó szabvány alapján a beesés megengedett mélysége B kategóriában a lemez vastagsághoz képest 0,1-szeres eltérés, amely a jelen esetben 0,3 mm. C kategóriában ez már 0,6 mm, D kategóriában pedig 0,9 mm. A D kategórián túlmenő besüppedés szakaszosan megengedhető, de csak az üzleti felek megegyezése alapján [6].

3.2. Szimulációs lehetőségek, hőforrásmodell

A szimulációs elemzés célja a valós fizikai folyamat minél pontosabb megismétlése virtuális környezetben. A szimulációk elkészítéséhez Simufact Welding szoftvert használtunk. A hegesztési szimulációs metodika alapján a következő bemeneti paraméterek pontos definiálása szükséges: Hálózott geometria, Anyagtulajdonságok, Határfeltételek, Ekvivalens hőforrás [7].



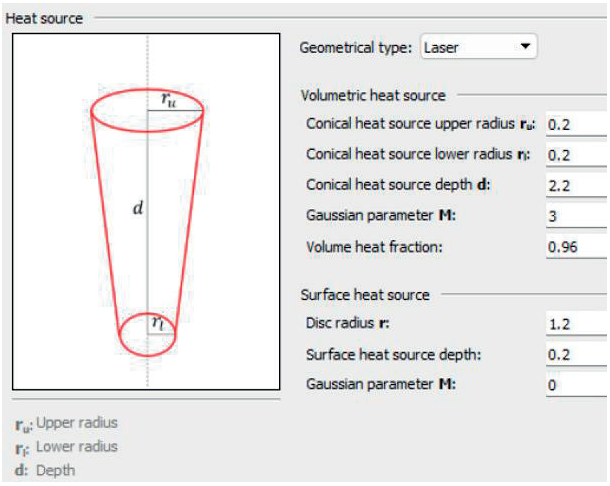
6. ábra: Simufact Welding grafikus felülete, szimulációs folyamat bemenetei

A szimuláció során használt lézer hőforrásmodell (volumetrikus kúpos) fő méretei:

- ru (felső kör sugara) = 0,2 mm - a lézer optikai mozgatásának megfelelő körátmérő fele,
- rl (alsó kör sugara) = 0,2 mm,
- d (hőforrás mélysége) = 2,2 mm - a csiszolati mintán mért beolvadási mélység,
- M (Gauss paraméter) = 3 - egyenletes, a hőforráson belüli hőeloszlást jellemzi,
- a további paraméterek a felszíni hőforrás alakját írják le, megválasztásuk a szoftver segédletében foglaltak alapján történt.

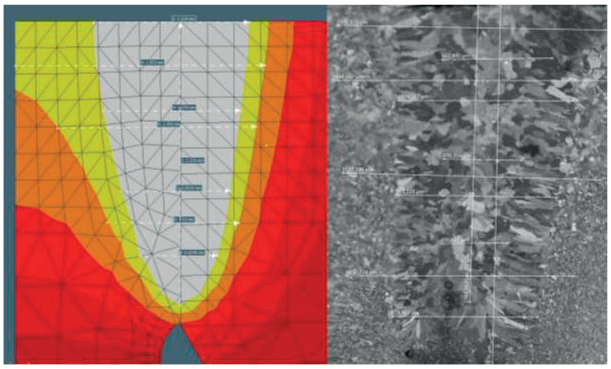
A szimuláció során alkalmazott hegesztési paraméterek a valós hegesztés felvett paraméterei alapján:

- hegesztési sebesség = 1,9 m/min,
- kombinált hegesztési teljesítmény = 3750 W,
- a hegesztés hatékonysága = 55%.

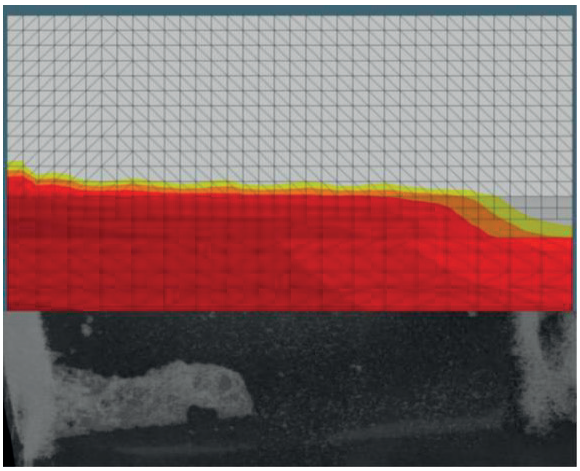


7. ábra Lézeres hőforrás méretei

Első lépésként a bizonytalan, 40 - 60 %-os tartományban szimulációs teszteket futtattunk a kötés felénél, minden hatékonysági tényező mellett megmérve a hegfürdő méreteit. A csiszolati képen mért méretekhez a legjobban megegyező eredményeket 55%-os hatékonyság mellett értük el.



8. ábra: Hőhatási övezet összehasonlítása 55%-os hatékonyság mellett, varrat felénél elmetszve



9. ábra Beolvadás az alkatrészek csatlakozásánál: szimuláció és CT felvétel összehasonlítása

A beolvadási zóna méretei a valóságban / szimulációban:

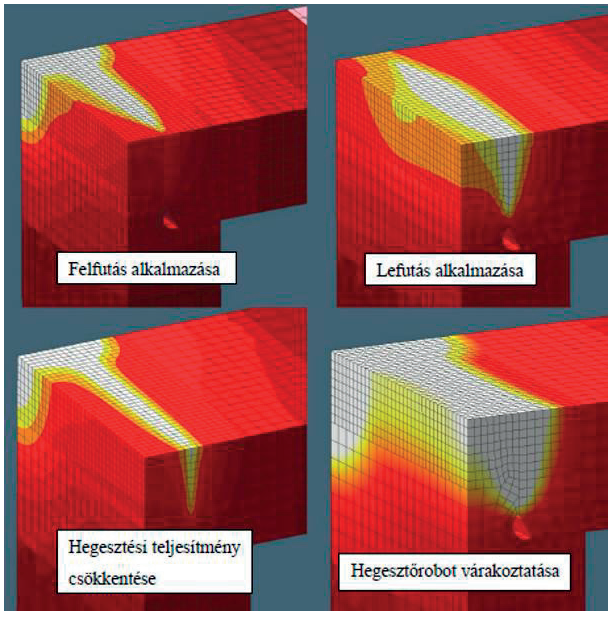
- beolvadás mélysége: 2,2 / 2,22 mm (1% eltérés),
- a hegfürdő felső átmérője: 1,27/1,22 mm (4% eltérés).

A hőhatási zóna minimális méret eltérései és a CT felvételekkel megegyező beolvadási karakterisztika alapján a hőforrásmodell kalibrálása sikeres volt.

3.3. A folyamat továbbfejlesztése, tesztek

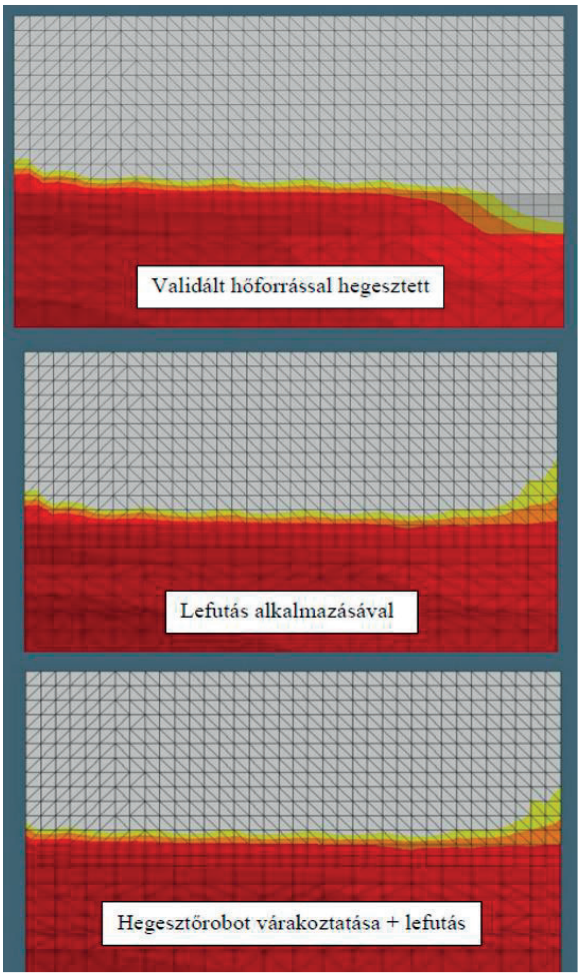
A hőforrásmodell validálása után a hőtolás okozta nagy varratbeesés kiküszöbölése volt a célunk. A hegesztési paraméterek (teljesítmény, hegesztő robot beállítások, hegesztés sebessége, hegesztőgép fel, lefutása) változtatásával, majd tesztszimulációk során megfigyelhető volt, hogyan befolyásolják a különböző beállítások a beolvadás mértékét.

A réz magas hővezetéséből adódó nehézségek miatt a kezdeti hőbevitel csökkentés nem lehetséges, mivel ez a varrat elején tovább rontaná a részleges beolvadást, csökkentve a hegesztés keresztmetszetét, minőségi besorolását. A lefutás alkalmazásával azonban csökkent a varrat végére feltorlódó hőenergia, ezzel a hegesztési hiba lehetősége. A beolvadás mértéke továbbra is megfelelő szinten maradt, továbbá a hegesztőrobot minimális várakoztatásával javulást értünk el a kezdeti beolvadás növelésében.

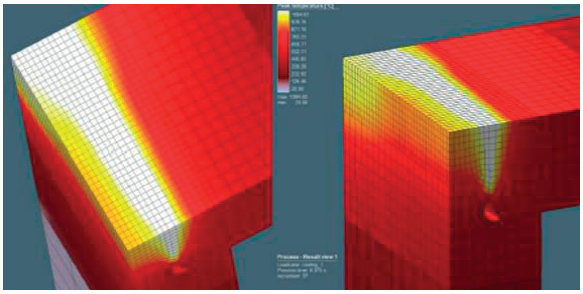


10. ábra Paraméterváltoztatások hatása a hegesztésre

Az eredmények alapján megfigyelhető a szimulációs futások kimeneteinek és a valóságban hegesztett darabok vizsgálati mintáinak hasonlósága. Ez megerősíti a szimulációs modell helyességét, amely előfeltétele a további, érdemi technológiafejlesztési szimulációknak.



11. ábra: Javított paraméterek hatása a beolvadás mélységére



12. ábra Hegesztett kötés képe: kalibrált hőforrással, paraméter javítások előtt, utána

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A végeselem alapú hegesztési szimulációk robusztus és nélkülözhetetlen eszközökké váltak a modern gyártástervezésben. A bemutatott eredmények igazolják, hogy a termofizikai kihívásokkal küzdő anyagok, mint a nagytisztaságú réz esetében is, a megfelelően validált szimulációs modellek nagy pontossággal képesek leképezni a valós ipari üzemi hegesztési technológiát.

5. SUMMARY

Finite element-based welding simulations have become robust and indispensable tools in modern manufacturing planning. The presented results demonstrate that, even for materials posing thermophysical challenges such as high-purity copper properly validated simulation models are capable of representing reality of the applied industrial welding technology with good accuracy.

6. IRODALOM

[1] N. Judit, *Az ipar 4.0 fogalma, összetevői és hatása az,* Budapesti Corvinus Egyetem: Vállalatgazdaságtan Intézet, 2017.

[2] H. v. Lintel, P. Böhlke, H.-G. Wobker, W. Michels, U. Krupp és K. Jahns, „Laser beam welding of deoxidized copper microstructure investigation and thermodynamic," *Materialwiss. Werkstofftech,* 2021.

[3] M. Dal és R.Fabbro, „An overview of the state of art in laser welding simulation," *Optics &LaserTechnology,* 2016.

[4] D. Franco, J. Oliveira, T. G. Santos és R. Miranda, „Analysis of copper sheets welded by fiber laser with beam oscillation," *Optics and Laser Technology,* 2021.

[5] Shahin Sanati, Seyedeh Fatemeh Nabavi,. A.· Reihaneh Esmaili és Hamid Dalir, „A Comprehensive Review of Laser Wobble Welding Processes in Metal Materials: Processing Parameters and Practical Applications," *Lasers in Manufacturing and Materials Processing,* 2024.

[6] „Elektron- és lézersugaras eljárással hegesztett kötések. Követelmények és ajánlások az eltérések minőségszintjeire". Magyar Szabadalom száma: ISO 13919-2:2021, június 2021.

[7] E. S. V. Marques, F. J. G. Silva és A. B. Pereira, „Comparison of Finite Element Methods in Fusion Welding Processes—A Review," *MPDI, metals,* 2020.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.9

ELEKTROMOS OFF-ROAD KISJÁRMŰ TERVEZÉSI TAPASZTALATAI

DESIGN EXPERIENCES OF ELECTRIC OFF-ROAD SMALL SCALE-VEHICLE

Fekécs Bálint[*], Marai Ádám[*], Nyirő Ákos[**], Dr. Háry András[***]

ABSTRACT

The spread of electric vehicles can be observed not only in the field of road vehicles, but also in the area of off-road vehicles. The aim of the project presented in this paper was to create a small-scale prototype of an off-road carrier vehicle platform. The entire development process was carried out using the tools of systematic product design. The aim of the paper is to summarize the experiences gained during this development and to draw conclusions about the design methodology for further research.

1. BEVEZETÉS

A terméktervezés módszeressége jelentős fejlődésen ment keresztül az elmúlt évtizedekben. Napjainkra nemcsak a tervezés módszertani háttere és szélekörű eszköztára érhető el, de a tervezést és a tervezési folyamatot hatékonyan támogató eszközök, szoftverek, menedzsment technikák is rendelkezésre állnak.

A jelent projekt tárgya több szempontból is speciális. Az off-road, azaz nem közúton használatos mobil eszközök fejlesztési eljárásai az autóipar igen kiforrott követelményeire és folyamataira csak részben tudnak támaszkodni. Ez amiatt is így van, mivel nem iparág-specifikus megoldásokról van szó, ezért a módszertant tekintve az általános tervezési metodológiákhoz közelebb állnak ezek a termékek. Másik oldalról, mivel mozgó eszközökről, és ebben az értelemben mégiscsak "járművekről" van szó, magukon hordozzák a jármű termék fejlesztésének minden sajátosságát – a komplexitást, a több részrendszerre épülő architektúrát, a hagyományos jármű egységek tervezési szempontjait.

Ez adja a jelen cikk mögött levő projekt, illetve a kapcsolódó kutatások specifikumát, amely indokolja, hogy az off-road mobil platformok tervezési módszertanával külön érdemes foglalkozni. A cikkben bemutatásra kerülő módszertan egy hosszabb távú fejlesztési program egy eleme, a cél itt egy olyan gyakorlatias, ugyanakkor számos tanulságot hordozó fejlesztési folyamat bemutatása, amelyre a későbbiekben is lehet építeni.

Az off-road mobil platformok (kapcsolódva az autonomous mobile platform elnevezésű területhez) témaköre egy igen intenzíven fejlődő szegmens. Piacuk dinamikusan fejlődik, amelyet a legtöbb területen növekvő automatizálási igény és a munkaerőhiány egyaránt ösztönöz. A moduláris, többféle feladatra konfigurálható platformok versenyelőnyt jelenthetnek, mivel csökkenthetik a fejlesztési és üzemeltetési költségeket.

Bár a hétköznapi közlekedésben ritkán találkozunk velük, az off-road mobil platformok fontos szerepet töltenek be számos ágazatban. Sok olyan terület van, ahol az épített útfelület hiányzik vagy nehezen járható, mégis szükség van szállításra és munkavégzésre. Ilyen a modern mezőgazdaság, a bányászat, az építőipar, a katasztrófavédelem, az űrkutatás, vagy a honvédelem, ahol a gumikerekes platformok nehezen végezhető, veszélyes vagy monoton feladatokat veszik át. Fejlesztésüket ma két fő irány határozza meg: a hatékony elektromos hajtásláncok alkalmazása, valamint az önvezető, autonóm vezérlések beépítése.

2. AZ OFF-ROAD MOBIL PLATFORMOK SZEREPE

Az off-road platform járművek esetében terepen a legnagyobb kihívást a talaj deformálódása és a nedvességtartalomtól függő, változó viselkedése jelenti. Ezt a fizikai és dinamikai kapcsolatot a terramechanika szakterülete vizsgálja, amelynek alapjait Bekker és Wong [3] [4] [5] [6] fektették le, különválasztva a munkagépekkel foglalkozó terepformáló és a járművek mozgékonyságát leíró terepi jármű mechanikát. Tömör talajon a kerék terheléséből adódó függőleges feszültségeloszlás a Boussinesq-összefüggéssel írható le, a gumiabroncs nem pontszerűen, hanem egy véges felfekvő felületen adja át a terhelést. Söhne [7] kimutatta, hogy nedvesebb talajon a feszültségek egyre inkább a kerék alatti középpont felé koncentrálódnak. Száraz, kemény földön a kerék alig süllyed be és kis felületen érintkezik a talajjal, míg nedves, laza terepen mélyebb nyomot hagy, de a felfekvő felülete is több mint duplájára nőhet. Ezért homokos talajon a megfelelő gumimintázat, sziklás terepen pedig az alacsonyabb guminyomás segíti a tapadást. A sikeres haladás végül azon múlik, hogy a kerék vonóereje – amelyet a talaj kohéziója és belső súrlódása korlátoz – le tudja-e küzdeni a talaj

** mérnök gyakornok, Széchenyi István Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.*
*** mérnök gyakornok, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.*
**** vezérigazgató, ZalaZONE Ipari Park Zrt.*

összenyomódásából fakadó gördülési ellenállást, az akadály- és a lejtőellenállást [8].

A kerék és a talaj közötti összetett kölcsönhatást a gyakorlatban három fő módon vizsgálhatjuk: elméleti számításokkal, laboratóriumi talajvályús kísérletekkel és valós terepi tesztekkel. Maguk az elméleti modellek is három csoportra oszthatók: (1) az empirikus módszerek kúpos penetrométeres méréseken alapulnak, és gyors becslést adnak az átjárhatóságra; (2) a fél-empirikus módszerek Bekker elméletét és a Bevameter mérőeszközzel felvett görbéket ötvözik, így kiválóak a futómű gyors optimalizálására; míg (3) a numerikus módszerek – a talajt folytonos közegként kezelő végeselem-módszer, a szemcséket szimuláló diszkrét elemes módszer és a hibrid módszer adják a legpontosabb képet a talajdeformáció, illetve jármű viszonyáról. Wong rendszeranalízise szerint a terep adottságai és a küldetési célok közvetlenül meghatározzák a jármű öt fő alrendszerének tervezését és az autonóm algoritmusokat [5] [9] [10].

A jelen cikkben bemutatott projekt pontosan ebbe a Wong-féle rendszeranalízisbe illeszkedik. Mivel a referenciaként vizsgált ipari platformok rendkívül drágák, a cél volt egy univerzális, többféle további fejlesztési irányt is lehetővé tevő, kisméretű prototípus jármű fejlesztése, elektromos gumikerekes tesztplatform kivitelben.

A fejlesztés előzménye egy „deszkamodellnek” tekinthető miniatűr eszköz volt, a jelen fejlesztési szakasz már funkcionálisan közel teljeskörű, méreteiben csökkentett, ugyanakkor fejlesztési módszertanában kiforrott. A jármű aktuális kivitele teleoperációs módon irányítható, jelenleg azonban már folyik a magasabb szinten automatizált megoldás kialakítása, haladva az önvezető jármű platform irányába.

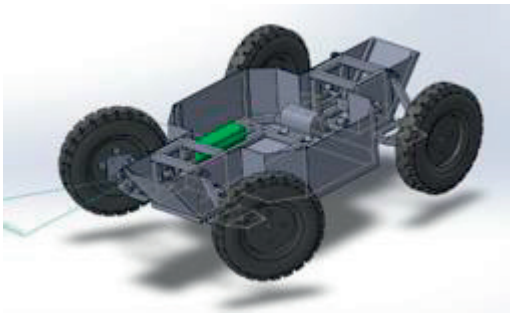


1. ábra A kifejlesztett prototípus jármű

A felhasználói igényeket szisztematikus módszertannal fordítottuk le műszaki paraméterekre, a megépített prototípust pedig valós terepi tesztekkel validáltuk. Ahhoz azonban, hogy a jármű a terepen fellépő ellenállásokat leküzdje, a motor által kifejtett erőt célszerűen kell eljuttatni a kerekekhez. Ezt biztosítja a jármű hajtásláncának kialakítása, amely az erőforrástól, a főhajtóművön és a féltengelyeken keresztül viszi át a hajtást a gumikerekekre.

3. AZ ALKALMAZOTT TERVEZÉSI MÓDSZERTAN

Egy jármű fejlesztése komplex mérnöki kihívás, amely a gépészeti struktúrák és az elektromos hajtáslánc szoros integrációját követeli meg. A projekt során egy szisztematikus, egymásra épülő lépésekből álló módszertant alkalmaztunk. Az első lépés a piaci igényekből kiindulva, a fejlesztési követelmények és az elvárások rögzítése volt, amely minden projekt kezdetekor kiemelt fontosságú. Ezt követte a szakirodalmi kutatás a releváns műszaki megoldások és technológiák feltérképezésére. Ezekre az alapokra támaszkodva végeztük el a jármű átfogó rendszertervezését, melyben elemeztük, hogy a járműnek milyen fő alegységei kell, hogy legyenek és azok milyen kapcsolatban vannak egymással. Ilyen alegységek a váz-platform, hajtáslánc, automatizált funkciók, szenzorok és vezérlőrendszerek. Következő lépés volt a termék koncepció kidolgozása CAD-es 3D modellezési fázisban.



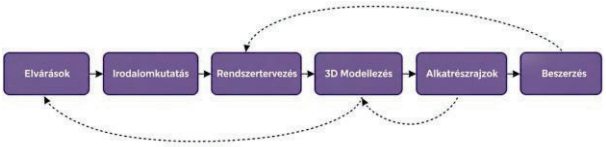
2. ábra 3D Modell

A folyamatot a gyártáshoz és összeállításhoz szükséges alkatrészrajzok elkészítése, valamint a meghatározott alkatrészek beszerzése zárta le. A tervezés lépéseit a 3. ábra foglalja össze.

A módszeres tervezés alapgondolata, hogy a véletlenszerű, „próbálkozásos ötletelést” egy logikusan felépített mérnöki folyamat váltsa fel. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a teljes járművet érintő „nagy feladatot” jól átlátható, kisebb mérnöki részproblémákra bontjuk. Ezzel a módszerrel a konkrét elvárásokból, mint például a megcélzott hatótáv vagy a terhelhetőség, lépésről lépésre jutunk el a konkrét, gyártható alkatrészekig. [1] [2]

A módszeres tervezési megközelítés egyik fő gyakorlati haszna, hogy a tervezési folyamat közben hozott döntések később is visszakövethetőek maradnak. Emellett az elkerülhetetlen módosításokat és visszacsatolásokat még a tervezőasztalon vagy a CAD szoftverben el lehet végezni. Így a hibák jó része nem a

fizikai építés és az alkatrészbeszerzés során derül ki, amivel rengeteg időt és felesleges költséget meg lehet takarítani.



3. ábra A tervezési folyamat

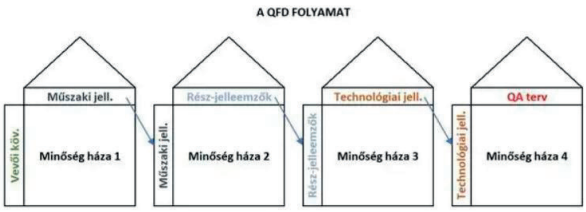
A módszeres tervezés kezdeti fázisában, az elvárások kategorizálásához és lebontásához számos módszer elérhető. Ezek közül az egyik legismertebb a *Kano-modell*, amely a termékfejlesztést segíti a vevői igények priorizálásával, amely félreértéseken alapuló későbbi erőfeszítéseket, időt és pénzt takaríthat meg. A modell a vevői elvárásokat öt kategóriába sorolja: az elengedhetetlen alapkövetelmények, a versenyalapot jelentő teljesítményelvárások, a semleges közömbös és az egyénfüggő zavaró tényezők, valamint a váratlan örömet okozó, innovatív vonzó tulajdonságok. Gyakorlati haszna, hogy segítségével a tervezés során a leginkább megtérülő, legnagyobb vevői elégedettséget hozó funkciókra lehet fókuszálni. [13]



4. ábra Kano modell

A jelen projekt során a Kano modell alkalmazása úgy történt, hogy összegyűjtésre került 50 darab termék tulajdonság, majd megtörtént ezeket besorolása a fent említett öt kategóriába. Ennek eredményeként egyértelművé vált, hogy melyek azok a tényezők, amelyek kiemelkedően fontosak a végső kimenet szempontjából. és melyek a kevésbé lényegesek.

A *QFD* (Quality Function Deployment, azaz minőségi funkció lebontás) egy olyan tervezési módszertan, amely a vevői igényeket, a tervezési célokat és a gyártási sajátosságokat köti össze, így a termékfejlesztés fókuszában végig a fogyasztó elvárásai maradnak. A modell a fejlesztési folyamatot egy négy szintből álló ún. „Minőség házán" keresztül vezeti le. A vevői igényeket először konkrét műszaki paraméterekre, majd azokat a termék egységekre/alkatrészekre, aztán gyártási folyamatokra, végül pedig minőségellenőrzési lépésekre fordítja le. Gyakorlati alkalmazása különösen hasznos, ha hiányzik a dokumentált követelményrendszer, mivel egységes, átfogó keretet és irányt ad a fejlesztők számára. [14]



5. ábra QFD modell

A projekt megvalósítása során a a QFD módszertan segítségével fordítottuk le a vevői elvárásokat – mint például az elakadásmentes, stabil és hosszú üzemidejű működés – konkrét mérnöki paraméterekké. Ezen igények alapján határoztuk meg a jármű legfontosabb műszaki jellemzőit.

Az off-road jármű tervezési alternatíváit egy átfogó rendszertervben foglaltuk össze. [15] A termék így előálló *rendszertérképe* strukturáltan mutatja be a jármű lehetséges alkalmazási területeit (mezőgazdasági, ipari stb.), a fizikai méretkategóriákat és a megcélzott terepviszonyokat. Számba veszi például az alváz anyaghasználatát és a platform kialakítását, a futómű szerkezetét, vagy a mobilitást biztosító kerék kialakítási opciókat. A hajtáslánc ágon feltérképezi a két- vagy négykerék-meghajtás erőátviteli módjait, a kefe nélküli és szénkefés villanymotorokat, továbbá a kanyarodást biztosító kormányű-kialakításokat. Az elektronikai alrendszerben pedig részletezi az autonóm és távirányítású vezérléshez választható mikrovezérlőket, a por- és vízállósági (IP) elvárásokat, a lehetséges akkumulátortípusokat, valamint az építéshez szükséges kiegészítő szerelési anyagokat.

A módszeres tervezés egyik legnagyobb gyakorlati kihívása az *elméleti követelmények és a valós gyártási, illetve beszerzési lehetőségek* (BOM – Bill of Material lista) összehangolása. Bár a 3D modellezés sokat segít az alrendszerek elrendezésében, a mechanika, a hajtás és az elektronika fizikai integrálása szinte mindig elkerülhetetlen kompromisszumokat követel. Az egyes elvárt termékjellemzők közötti ellentmondásokat a követelményjegyzéknél lehet ugyan elemezni, és törekedni ezek elkerülésére, de a gyárthatósági, beszerezhetőségi szempontok a későbbi fázisokban is szükségessé teszik a visszatérést akár egy-egy kitűzött termékjellemző újragondolásához. A megvalósítás során válik tehát egyértelművé, hogy az elméleti koncepcióból csak folyamatos iterációkkal és gyakorlati kompromisszumokkal építhető egy sok követelménynek egyszerre megfelelő jármű megoldás. Kevés szó esik a gazdasági kérdésekről, ez külön kutatás tárgya lehet, de ki kell emelni a költséghatékonyság szempontjait is, erre minden egyes tervezési lépésnél figyelemmel kell lenni.

4. A LÉTREHOZOTT TERMÉK

A jármű funkcionális céljaként egy mezőgazdaságban használt szabványos göngyöleg szállítási képessége került kitűzésre, akár sáros, meredek terepen is, ezáltal hasznos szerepet vállalva különböző feladatok elvégzésében, például ültetvények környezetében.



6. ábra A jármű burkolat nélkül

A jármű hordozó alapjaként egy egyedi kialakítású váz szolgál, amely pontos tervezés után, zártszelvényből került legyártásra. A szabványos anyagnak köszönhetően, a jól modellezhető szerkezeti tulajdonságok mellett, könnyedén lehetett rajta utólagosan is módosítani, ha azt egy-egy későbbi iterációs változtatás megkívánta. A problémamentes futáshoz 4 darab, a méret követelményekbe illeszkedő, piacon kapható kereket kapott, amelyek egyszerre biztosítják a megfelelő tapadást és hasmagasságot.

A hajtásról egy 1800 W-os elektromotor gondoskodik, amely láncos átvitelen keresztül forgatja meg mindkét tengelyt; a jobb menettulajdonságok érdekében ezekre egy-egy differenciálmű is került. A lánc feszessége, illetve a nyomatékleadás folyamatossága érdekében 4 láncfeszítő került elhelyezésre. Ezeken saját készítésű műanyag görgők kaptak helyet.

A féket és a kormányzást is egy-egy szervomotor kezeli; a féket 20 kg/cm-es, míg kormányzást 60 kg/cm-es tolóerővel. A fék funkciót egy szokványos, tárcsás fék látja el, amely az első tengelyen kapott helyet.

Energiaforrásként két akkumulátor került elhelyezésre: egy 48V 21Ah-es lítium-ion amely az elektromotort és a vezérlőket, és egy kisebb 12V 9Ah-es zselés kivitelű pedig a fék-és kormányszervót látja el energiával.

Az irányításért egy multifunkciós, elsősorban modellautókhoz fejlesztett kézi adóegység felel, amelynek jelét egy Arduino mikrovezérlő értelmezi és továbbítja, ezáltal vezérelve a jármű mozgását. A szervomotorok egyes paramétereit az erre a célra készült programon keresztül lehet beállítani.

Az elektronikai alkatrészek megóvása, illetve az esztétikusabb megjelenés érdekében a szerkezet rendelkezik egy fémlemezből kialakított burkolattal.

Tömeg	70 kg
Teherbírás	20 kg
Zajszint	80 dB
Hatótáv	10 km
Sebesség	4 m/s
Teljesítmény	5 kW
Energia fogyasztás	3 kWh
Vezérlési távolság	300 m
Töltési idő	1 h
Oldalirányú borulási szög	45°
Kanyarodási ív rádiusza	3 m
Hajlítási merevség	5 mm
Rugóállandó	2000 N/m

7. ábra Jármű műszaki paraméterek

5. TESZTELÉSI ÉS VALIDÁCIÓS TAPASZTALATOK

A kifejlesztett jármű megalkotása csak a folyamat egyik mérföldköve, hiszen a prototípus terveknek megfelelő megépítése önmagában nem bizonyítja, hogy a jármű megfelelően működik, így annak tesztelése legalább olyan fontos része a terméktervezési folyamatnak. A konstrukció működőképességének és a meghatározott műszaki követelményeknek való megfelelőségének igazolásához *átfogó tesztelési és validációs folyamat* szükséges. A járműipari standardokra épített módszeres tesztelési program segített feltárni a prototípus hibáit, problémáit, így fókuszálva tudtuk a kritikus irányokba fejleszteni a járművet. [11] [121]

A termék végső validációja során a tesztelési módszernek objektív, dokumentálható, illetve megismételhető eredményeket kell produkálnia. A méréseket egy *tesztmátrixra* építettük fel, amely tartalmazta a Kano modell alkalmazásával kijelölt, és a QFD-vel lebontott fő paraméterek elvárt célértékeit. Ezek alapján lehet kategorizálni a validáció eredményeit megfelelő, nem megfelelő vagy részben megfelelő osztályokba. A validációs méréseket két fő csoportra bontottuk: típusminősítések, itt elsősorban a jármű meghatározott műszaki tulajdonságainak és követelményeinek teljesülését vizsgáltuk, illetve működés közben mért mérések, ahol a cél a jármű tényleges üzemeltetési körülmények közötti viselkedésének megfigyelése volt. A jármű tesztelése nem csak egy egyszeri esemény, hanem a további fejlesztést is támogató visszacsatolási folyamat.



9. ábra A tesztelés és validáció folyamata

A tesztelés során a vizsgálandó paraméterek a tervezési folyamat legelején meghatározott követelményjegyzéket veszik alapul. Minden egyes tesztnél mérlegelendő az ismétlési szám, tekintettel arra, hogy ezen fázisban még csak funkcionális próbáról, nem megbízhatósági tesztről van szó.

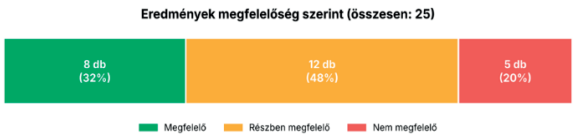
Vizsgált terület	Vizsgálatok
Automatizált funkciók	pl.: Kamerás rendszer, Állapot visszajelzők…
Platformtervezés	pl.: Vázszerkezet merevsége, Terhelhetőség…
Rendszertervezés	pl.: Üzemi terepszög, Hatótáv, Zajszint…
Hajtásrendszer	pl.: Sebesség, Teljesítmény, Energiafogyasztás…
Szenzor- és vezérlőrendszer	pl.: Vezérlési távolság, Forráskód…

10. ábra A tesztelés során vizsgált paramétercsoportok



11. ábra Jármű tesztelés közben

Egy mérési eredményt megfelelőnek kategorizáltunk, amennyiben meghaladta a kitűzött célt; részben megfelelőnek, ha a minimum és a maximum célérték közé esett. Nem megfelelő kategóriába azok a mérések kerültek, amelyek nem érték el az előre meghatározott minimum értéket. Az eredményekből leszűrhető, hogy a fejlesztés alapvetően teljesíti a paramétereket, néhány esetben túlszárnyalja az elvárásokat, ugyanakkor egyes paramétereknél alulmaradt a kitűzött érték tekintetében.



12. ábra A tesztek eredményei

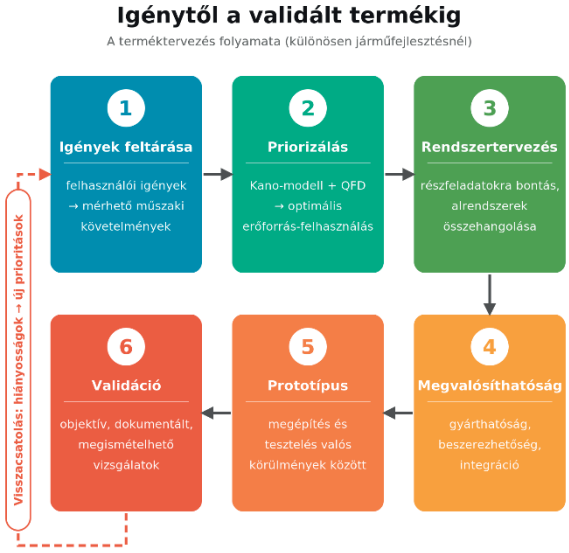
A mérések fontos tapasztalata, hogy a sikertelen vagy csupán részben sikeres vizsgálatok is rendkívül értékesek lehetnek. Ezek a hibák a fejlesztők elé helyezik a konstrukció gyengeségeit vagy akár a jármű prototípusának hiányzó funkcióit. Mindezek alapján az egyik legfontosabb tanulság, hogy bár a sikeres vizsgálati eredmények elengedhetetlenek, a fejlesztés szempontjából a sikertelen és részben sikeres vizsgálatok különösen értékes információkat szolgáltatnak, hiszen ezek világítanak rá a konstrukció hiányosságaira és a további fejlesztési lehetőségekre.

6. ÖSSZEFOGLALÓ, MÓDSZERTANI KÖVETKEZTETÉSEK

A projekt eredményeként a következő tanulságokat szűrhetjük le:

1. A hatékony terméktervezés alapja a felhasználói igények szisztematikus feltárása és konkrét, mérhető műszaki követelményekké alakítása.
2. A Kano-modell és a QFD módszertan alkalmazása segíti a követelmények priorizálását, valamint a fejlesztési erőforrások optimális felhasználását.
3. A rendszeralapú tervezés és a részfeladatokra bontás átláthatóbbá teszi a komplex mérnöki problémákat, és biztosítja az egyes alrendszerek összehangolását, ez járműfejlesztésnél különösen fontos.
4. A tervezési döntések során figyelembe kell venni a gyárthatóságot, az alkatrészek beszerezhetőségét és a különböző műszaki rendszerek integrációját.
5. A prototípus megépítése és valós körülmények közötti tesztelése elengedhetetlen a tervezési követelmények teljesülésének igazolásához.
6. Az objektív, dokumentálható és megismételhető validációs vizsgálatok lehetővé teszik a konstrukció hiányosságainak feltárását és a fejlesztési prioritások meghatározását.

A projekt végkonklúziója, hogy a terméktervezés iteratív folyamat, amelyben az egymás utáni fázisok visszacsatolásai, a termék részrendszerek közötti feladatok összehangolása, továbbá a teszteredményekre épülő visszacsatolás biztosítja a megbízható, felhasználói igényeknek megfelelő végtermék kialakítását.



13. ábra Általánosított tervezési séma

A kapcsolódó kutatások további lehetőségei:

- A tervezési módszertan továbbfejlesztése, a feltárt tanulságok alapján (az iterációs intenzitás erősítése, visszacsatolások rendszere).
- A jármű méretének növelése, valós felhasználási környezetbe való illesztése.
- Az automatizáltsági szint emelése, egyes autonóm funkciók beépítése.

7. SUMMARY, CONCLUSIONS ON DESIGN METHODOLOGY

As a result of the project, the following conclusions can be drawn:

1. The basis of effective product design is the systematic exploration of user needs and their translation into specific, measurable technical requirements.
2. The application of the Kano model and the QFD methodology helps to prioritize requirements and optimize the use of development resources.
3. System-based design and the division into sub-tasks make complex engineering problems more transparent and ensure the coordination of the individual subsystems, which is especially important in vehicle development.
4. Design decisions must take into account manufacturability, the availability of components and the integration of different technical systems.
5. Building a prototype and testing it in real-world conditions is essential to verify that the design requirements are met.
6. Objective, documentable and repeatable validation tests make it possible to identify the deficiencies of the design and to determine further development priorities.

The final conclusion of the project is that product design is an iterative process, in which the feedback of successive phases, the coordination of tasks between product subsystems, and feedback based on test results ensure the development of a reliable final product that meets user needs.

Further opportunities of the related research:

- Further development of the design methodology based on the lessons learned (strengthening iteration intensity, system of feedbacks).
- Increasing the size of the vehicle and fitting it into the real environment of use.
- Increasing the level of automation, incorporating certain autonomous functions.

8. IRODALOM

[1] Hansen, F. (n.d.). A módszeres géptervezés (L. Lehoczky, Ford.). ODR Portál. https://odrportal.hu/web/guest/record/-/record/MOKKAS0000497186

[2] Huba, A., Aradi, P., Czmerk, A., Lakatos, B., Chován, T., & Varga, T. (n.d.). Mechatronikai berendezések tervezése. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. https://mogi.bme.hu/TAMOP/mechatronikai_berendezesek_tervezese/ch19.html

[3] Bekker, M. G. (1956). Theory of land locomotion: The mechanics of vehicle mobility. University of Michigan Press.

[4] Bekker, M. G. (1969). Introduction to terrain-vehicle systems. University of Michigan Press.

[5] Wong, J. Y. (2010). Terramechanics and off-road vehicle engineering: Terrain behaviour, off-road vehicle performance and design (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

[6] Wong, J. Y. (2022). Theory of ground vehicles (5th ed.). Wiley.

[7] Söhne, W. (1958). Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. Agricultural Engineering, 39, 276–281.

[8] Taheri, S., et al. (2015). A technical survey on terramechanics models for tire–terrain interaction used in modeling and simulation of wheeled vehicles. Journal of Terramechanics, 57, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.08.003

[9] He, R., et al. (2019). Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications. Journal of Terramechanics, 81, 3–22.

[10] Yu, S., et al. (2025). A real-time terrain-adaptive local trajectory planner. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 26(3), 3324–3340.

[11] Wiecher, C., Mandel, M., Günther, J., Fischbach, J., Greenyer, M., Greinert, C., Wolff, R., Dumitrescu, D., Mendez, D., & Albers, A. (n.d.). Model-based analysis and specification of functional requirements and tests for complex automotive systems. https://doi.org/10.1002/sys.21748

[12] Jacoff, A. S., Huang, H.-M., Messina, E. R., Virts, A. M., & Downs, A. J. (n.d.). Comprehensive standard test suites for the performance evaluation of mobile robots. National Institute of Standards and Technology. https://www.nist.gov/publications/comprehensive-standard-test-suites-performance-evaluation-mobile-robots

[13] Kenesei, Z. (2017). Az elégedettség mérése a Kano-modell kétpólusú elvének alkalmazásával. Statisztikai Szemle. https://doi.org/10.20311/stat2017.01.hu0029

[14] Fodor, T. (n.d.). Mi a QFD és mire, mikor és hogyan alkalmazható? https://www.tfodor.hu/blog/?mi-a-qfd-es-mikor,-mire-es-hogyan-alkalmazhato

[15] Termék specifikációk ábrája (ZalaZONE belső dokumentum)

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.10

A MÉHFÉSZKEK ÉS A MESTERSÉGES KAPTÁRAK HŐHATÉKONYSÁGI ELEMZÉSE

THERMAL EFFICIENCY ANALYSIS OF BEE NESTS AND ARTIFICIAL HIVES

Forrai Sándor[*]*, Dr. habil. Szabó P. Balázs PhD.* [**]

ABSTRACT

The thermal performance of honeybee nests depends on the properties of the enclosing structure, cavity geometry, and internal comb arrangement. This paper presents a focused literature review comparing natural tree cavities and artificial beehives in terms of heat loss and winter microclimate. Experimental enclosure measurements and computational studies are distinguished from trials involving live colonies. Under the investigated modelling conditions, bee space above the combs increased heat loss by up to approximately 70%. Colony trials found that hive wrapping combined with top insulation reduced winter hive mass loss and supplementary sugar consumption and improved overwintering survival. These findings support evaluating hive materials, internal geometry, ventilation, and moisture conditions together when developing new hive designs.

1. BEVEZETÉS

A mézelő méhek fészkének hőháztartását a méhcsalád hőtermelése, a környezeti feltételek és a fészket határoló szerkezet együttesen alakítja. A természetes faodúk és a mesterséges kaptárak eltérő falvastagsága, geometriája és belső elrendezése különböző feltételeket teremthet a hőmérséklet és a páratartalom szabályozásához. A kaptárak hőtechnikai értékelése ezért az anyagválasztás mellett a szerkezeti kialakítás vizsgálatát is igényli.

A határoló szerkezeteken keresztüli hőátadás mellett a bejáraton keresztüli légáramlás is befolyásolja a fészek hőmérlegét. Mitchell a nektár besűrítésének energetikai modelljében ezt külön advektív hőtranszportként veszi figyelembe, amelynek nagysága a bejárat felületétől, a légsebességtől és a belső–külső hőmérséklet-különbségtől függ [1].

A természetes méhfészek szerkezeti referenciát adhat a mesterséges kaptárak hőtechnikai értékeléséhez. Az összehasonlításban a határoló falak mellett a fészeküreg alakját, a bejárat elhelyezkedését, valamint a lépek és az üregfal közötti kapcsolatot is figyelembe kell venni. Ezek a jellemzők a belső légáramláson keresztül is befolyásolhatják a hőtranszportot.

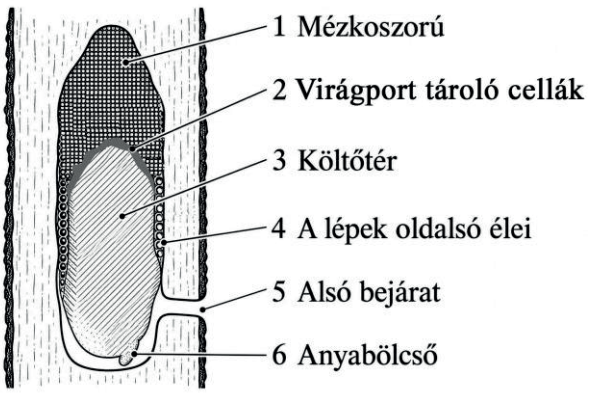
A tanulmány célja a természetes méhfészkek és a mesterséges kaptárak összehasonlítása a hőveszteség és a hőszigetelés szempontjából. A szakirodalmi áttekintés a fészek felépítését, a lépelrendezés szerepét, valamint a kaptáranyagok és a kiegészítő szigetelés hatását tárgyalja, elkülönítve a modellezésből származó megállapításokat az élő méhcsaládokon végzett vizsgálatok eredményeitől.

2. A TERMÉSZETES MÉHFÉSZEK SZERKEZETI JELLEMZŐI

Seeley és Morse [2] a természetes méhfészkek jellemzéséhez 39 faodúban található fészket vizsgáltak és közülük 21-et részletesen elemeztek. A vizsgált fészkek vázlatát az 1. ábra mutatja be, ahol az üregek függőlegesen megnyúlt, közel hengeres alakúak voltak és a legtöbb vizsgált fészeküreg térfogata 30–60 liter volt. A fészkek többsége az üreg alsó részén elhelyezkedő kis keresztmetszetű bejárattal rendelkezett.

A lépek felső és oldalsó éleik mentén kapcsolódtak az üreg falához, azonban a csatlakozások helyenként a méhek közlekedését biztosító átjárókkal voltak megszakítva.

A mézkészlet a fészek felső és peremi tartományaiban helyezkedett el, míg a fiasítás a mézkészlet alatt, a fészek középső tartományában volt. A virágpor a méz és a fiasítás között helyezkedett el [2].

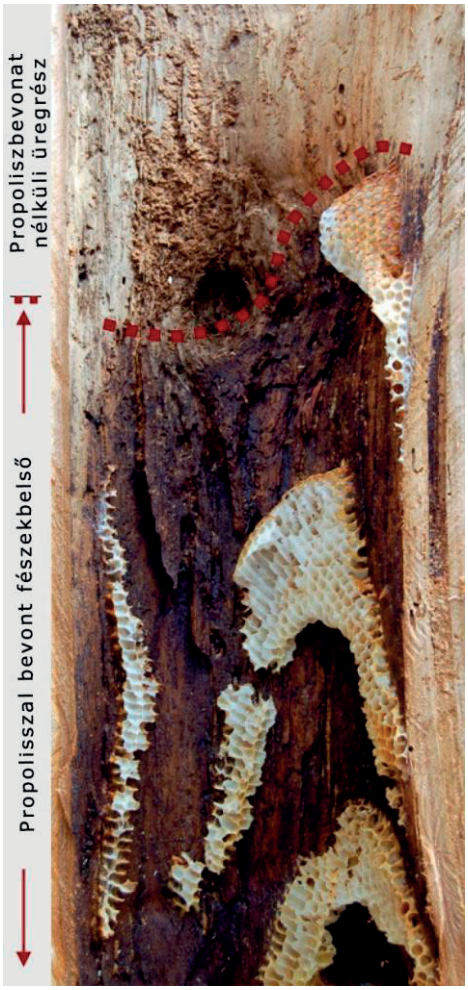


1. ábra. A méh-fészek sematikus ábrája [2] alapján

A forrás szerint a fiasítási terület peremén helyezkednek el a heresejtes léprészek. Az üreg belső felületét a méhek propoliszréteggel borították, amelynek vastagsága jellemzően 0,3–0,5 mm volt. A propolisszal bevont

* *mérnök tanár, Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Gépészeti Intézet*
** *egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Élelmiszermérnöki Intézet*

fészekbelső és a bevonat nélküli üregrész közötti határt a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. Propolisszal bevont fészekbelső és bevonat nélküli üregrész, (a szaggatott vonal a bevonat határát jelöli) [3]

A szerzők megállapítják, hogy az alsó bejáratú fészkek konvektív hőveszteségе kisebb, mint a felső bejáratúaké. A vizsgálat ugyanakkor nem tartalmazott közvetlen hőveszteség- vagy hőszigetelési méréseket. Eredményei a természetes fészkek geometriai és szerkezeti referenciáját adják meg [2].

3. A TERMÉSZETES FÉSZEKÜREGEK ÉS A KAPTÁRAK HŐTECHNIKAI ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Mitchell [4] mesterséges kaptárak és természetes faodúkat reprezentáló hőtechnikai modellek összehasonlításával vizsgálta a fészket határoló szerkezetek eredő termikus konduktanciáját. A teljes méretű faodúmodelleket poliizocianurát- (PIR-) habból készítette, a természetes faodúk termikus konduktanciájának közelítésére; a modellezési megközelítést egy 1:5 méretarányú famodellel ellenőrizte. A méhcsalád hőtermelését ismert teljesítményű elektromos fűtőelemmel helyettesítette, majd az állandósult belső és külső hőmérsékletek alapján meghatározta a határoló szerkezet eredő termikus konduktanciáját. A konduktancia meghatározására szolgáló kísérlet nem vizsgálta az élő méhcsalád viselkedését, a hőtárolás időfüggő folyamatait, valamint a párolgást és a kondenzációt [4].

A szerző a határoló faanyag nedvességtartalmától függően a fakaptáraknál megközelítőleg 4–7-szeres, a teljes méretű expandált polisztirol- (EPS-) kaptáraknál pedig 1,5–5-szörös hőátadást közölt a természetes faodúkat reprezentáló kialakításokhoz képest [4].

Az összehasonlítás kiegészítésére a szerző a méhcsalád tömegének és a határoló szerkezet eredő termikus konduktanciájának hányadosát, az MCR mutatót alkalmazta. Azonos méhcsaládtömeg mellett a nagyobb MCR kisebb, egységnyi hőmérséklet-különbségre jutó hőveszteséget jelent. A tanulmány alapján a kaptárak értékelésekor az anyag és a falvastagság mellett a geometriai kialakítást, a tetőt, a nyílások elhelyezkedését és a méhcsalád méretét is figyelembe kell venni [4].

A vizsgált tanulmányban közölt hőtechnikai különbségek önmagukban nem igazolják a telelési túlélés vagy a mézhozam javulását, ezért ezek megállapításához élő méhcsaládokon végzett vizsgálatok szükségesek.

4. A LÉPELRENDEZÉS ÉS A BELSŐ RÉSEK SZEREPE A HŐTRANSZPORTBAN

A határoló szerkezet hőszigetelő tulajdonságai mellett a fészek belső kialakítása is befolyásolja a hőtranszportot. A természetes faodúk és a keretes kaptárak egymástól eltérnek a lépek falhoz való kapcsolódásában, a lépek körüli átjárók kialakításában és a rendelkezésre álló függőleges térben is. Ezért a hőtechnikai összehasonlítást a belső légáramlás és a lépelrendezés vizsgálatával szükséges kiegészíteni.

Mitchell [5] áramlástani modellezéssel (CFD) hasonlította össze a természetes faodúk és a vékony falú mesterséges kaptárak hőtranszportját. A vizsgálat a lépek körüli rések, valamint a szabályozott hőmérsékletű fiasítási terület függőleges elhelyezkedésének energetikai hatásaira irányult.

A természetes fészkeket reprezentáló lépszéli rések átlagos méretét méhek által benépesített mesterséges faodúk megfigyeléséből határozta meg [5].

A természetes fészkekben a lépek közvetlenül kapcsolódnak az üreg falához, helyenként átjárókat hagyva, míg a keretes kaptárakban a lépek és a falak, illetve a tető között összefüggő rés található. A modell szerint a lépek feletti méhjárat akár 70%-kal növelhette a hőveszteséget. A kaptárakban a fiasítási területen át zajló konvekció megfékezéséhez a faodúkhoz képest legalább másfélszeres méhsűrűségre volt szükség. A faodúk nagyobb függőleges mozgástere és hőellenállása ugyanakkor kedvezőbb feltételeket biztosíthat a hőszabályozáshoz [5]. Tervezési szempontból ebből az a fontos következtetés vonható le, hogy a kaptár hőtechnikai fejlesztésekor az anyag és a falvastagság

mellett a lépelrendezést, a rések folytonosságát és a fiasítás lehetséges helyzetét is vizsgálni kell. A közölt számszerű eredmények a vizsgált modellfeltételekre vonatkoznak, ezért nem tekinthetők valamennyi kaptártípusra érvényes értékeknek.

5. FA- ÉS POLIURETÁN KAPTÁRAK TÉLI MIKROKLÍMÁJÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Alburaki és Corona [6] tanulmányukban kilenc fa Langstroth-kaptár és kilenc poliuretán kaptár téli mikroklímáját hasonlította össze az Egyesült Államokban, 2020 decemberétől 2021 márciusáig.
A vizsgált kaptártípusokat a 3. ábra szemlélteti [6]. Mindkét kaptárcsoport két, egyenként 10 keretes fiókból állt, illetve a vizsgálathoz hasonló méretű méhcsaládokat választottak ki, amelyek azonos gondozást kaptak.
A fiasítási fiók közepén elhelyezett érzékelők óránként rögzítették a belső hőmérsékletet és a relatív páratartalmat [5]. A poliuretán kaptárak átlagos belső hőmérséklete 10,20 °C, a fa kaptáraké 9,73 °C volt, az átlagos relatív páratartalom 52,05%, illetve 62,50% volt. A hőmérsékleti idősorok a fakaptárakban kifejezettebb ingadozásokat mutattak, míg a poliuretán kaptárakban kisebb nappali–éjszakai páratartalom-változást figyeltek meg [6].
Az eredmények értelmezésekor figyelembe veendő, hogy a két kaptártípus szellőzési kialakítása is különböző volt. A poliuretán kaptárak felső és alsó szellőzőnyílásokkal rendelkeztek, míg a fa kaptárakat a szerzők zárt kialakításúként írták le.
Az alacsonyabb páratartalmat részben a poliuretán kaptárak eltérő szellőzési kialakításával magyarázzák a tanulmányban.
A vizsgálat ezért két teljes kaptárkialakítás összehasonlításának tekinthető, amelyben az anyag és a szellőzés hatása nem különíthető el teljesen. A tanulmány téli mikroklíma-adatokat szolgáltat, de nem közöl közvetlen összehasonlító mérést a táplálékfogyasztásról vagy a telelési túlélésről.

6. A KAPTÁR BURKOLAT ÉS A FELSŐ HŐSZIGETELÉS HATÁSA A TÉLI TÁPLÁLÉKFOGYASZTÁSRA ÉS A TÚLÉLÉSRE

St. Clair és munkatársai [7] nyolc Illinois állambeli méhészetben, összesen 43 méhcsalád bevonásával vizsgálták a kiegészítő kaptárburkolás hatását.
A véletlenszerűen kijelölt kezelt kaptárak 4 mm vastag fekete, légkamrás polipropilén burkolatot és 3,81 cm vastag felső habszigetelést kaptak, míg a kontroll kaptárak ilyen kiegészítés nélkül teleltek.
A méhcsaládok azonos előkészítő gondozásban részesültek. A vizsgálat során követték a belső hőmérsékletet, a kaptártömeg változását, a kiegészítő cukorlepény fogyását és a méhcsaládok túlélését [7].
A burkolt kaptárak tömegvesztesége kisebb volt, mint a kontrollcsoporté. A telet túlélő családok körében a kontroll kaptárak tömegcsökkenési üteme megközelítőleg kétszerese volt a burkolt kaptárakénak.
A kontrollcsoport a kiegészítő cukorlepényből is jelentősen többet fogyasztott. A burkolt csoport telelési túlélése szintén kedvezőbbnek bizonyult. A teljes téli időszakra átlagolva ugyanakkor nem figyeltek meg számottevő különbséget a két csoportban mért belső hőmérséklet között [7].



3. ábra. A vizsgálatban alkalmazott kaptártípusok: a) fa Langstroth-kaptár, b) poliuretán kaptár [6]

Az eredmények arra utalnak, hogy a külső burkolat és a felső szigetelés együttes alkalmazása hasonló belső hőmérséklet fenntartása mellett mérsékelheti a téli táplálékkészlet felhasználását.
A megállapítás a vizsgált éghajlati és kezelési körülményekre vonatkozik; a burkolat és a felső szigetelés különálló hatása a kísérleti elrendezés miatt nem határozható meg külön-külön.
Ezen munkák alapján a kaptárak továbbfejlesztésének egyik kutatási iránya olyan anyagok és szerkezeti megoldások vizsgálata lehet, amelyek hőtechnikai tulajdonságai támogatják a méhcsalád aktív hőszabályozását és illeszkednek a fészek biológiai működéséhez [8, 9].

Meikle és munkatársai [10] kísérletében a tömör és hálós kaptáralj váltogatása nem befolyásolta szignifikánsan a belső hőmérsékletet és annak napi ingadozását, ami a méhcsalád aktív hőszabályozásának szerepét hangsúlyozza.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az áttekintett szakirodalom alapján a természetes faodúk és a mesterséges kaptárak hőtechnikai különbségeit nem kizárólag a határoló falak anyaga és vastagsága határozza meg. A fészek geometriája, a lépek elrendezése, a belső rések és a szellőzőnyílások kialakítása együttesen befolyásolja a hőtranszportot. A poliuretán kaptárakban a fakaptárakhoz képest magasabb átlagos belső hőmérsékletet és alacsonyabb relatív páratartalmat mértek, azonban az anyag és a szellőzési kialakítás hatása nem különíthető el teljesen. A kiegészítő burkolattal és felső szigeteléssel együttesen ellátott kaptárak kisebb téli tömegveszteséget és cukorlepény-fogyasztást, valamint jobb telelési túlélést mutattak a vizsgált körülmények között. A további fejlesztések során a hőveszteség mérséklését a nedvességviszonyokkal és a méhcsalád működésével együtt szükséges értékelni.
Új kaptár- vagy szigetelési kialakítások eredményességének igazolásához a hőtechnikai modellezés mellett összehasonlító, élő méhcsaládokon végzett vizsgálatok is szükségesek.

8. SUMMARY

Based on the reviewed literature, the thermotechnical differences between natural tree cavities and artificial hives are not determined solely by the material and thickness of the enclosing walls.
The geometry of the nest, comb arrangement, internal gaps, and ventilation openings jointly influence heat transport. Polyurethane hives had higher mean internal temperatures and lower relative humidity than wooden hives; however, the effects of material and ventilation design could not be fully separated.
Under the conditions investigated, hives fitted with both supplementary wrapping and top insulation showed lower winter mass loss, lower sugar-cake consumption, and better overwintering survival. In further developments, the reduction of heat loss must be evaluated together with moisture conditions and colony behavior.
To verify the effectiveness of new hive or insulation designs, comparative studies on live bee colonies are required in addition to thermotechnical modeling.

9. IRODALOMJEGYZÉK

[1] D. MITCHELL: *Thermal efficiency extends distance and variety for honeybee foragers: analysis of the energetics of nectar collection and desiccation by Apis mellifera*, Journal of the Royal Society Interface, Vol. 16, No. 150, 20180879, 2019. https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0879

[2] T.D. Seeley, R..A. Morse: *The nest of the honey bee (Apis mellifera L.)*, Insectes Sociaux Vol. 23, pp. 495–512, 1976 https://doi.org/10.1007/BF02223477

[3] M. SIMONE-FINSTROM, M. SPIVAK: Propolis and bee health: the natural history and significance of resin use by honey bees, *Apidologie*, Vol. 41, pp. 295–311, 2010. https://doi.org/10.1051/apido/2010016

[4] D. MITCHELL: *Ratios of colony mass to thermal conductance of tree and man-made nest enclosures of Apis mellifera: implications for survival, clustering, humidity regulation and Varroa destructor*, International Journal of Biometeorology, Vol. 60, No. 5, pp. 629–638, 2016 https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-015-1057-z

[5] D. M. MITCHELL: *Are man-made hives valid thermal surrogates for natural honey bee nests (Apis mellifera)?*, Journal of Thermal Biology, Vol. 122, No. 103882, 2024 https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2024.103882

[6] M. ALBURAKI, M. CORONA: *Polyurethane honey bee hives provide better winter insulation than wooden hives*, Journal of Apicultural Research, Vol. 61, No. 2, pp. 190-196, 2021 https://doi.org/10.1080/00218839.2021.1999578

[7] A. L. ST. CLAIR, N. J. BEACH, A. G. DOLEZAL: *Honey bee hive covers reduce food consumption and colony mortality during overwintering,* PLoS ONE Vol.. 17, No. 4, pp. 1-17, 2022 https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266219

[8] A. STABENTHEINER, H. KOVAC, M. MANDL: *Coping with the cold and fighting the heat: thermal homeostasis of a superorganism, the honeybee colony*, Journal of Comparative Physiology A, Vol. 207, pp. 337–351, 2021 https://doi.org/10.1007/s00359-021-01464-8

[9] A. A. ILGUN, T. SCHMICKL: *Mycelial Beehives of HIVEOPOLIS: Designing and Building Therapeutic Inner Nest Environments for Honeybees,* Biomimetics, Vol. 7, No. 2, pp. 75, 2022 https://doi.org/10.3390/biomimetics7020075

[10] W. G. MEIKLE, A. BARG, M. WEISS: *Honey bee colonies maintain CO_2 and temperature regimes in spite of change in hive ventilation characteristics*, Apidologie, Vol. 53, Article 51, 2022. https://doi.org/10.1007/s13592-022-00954-1

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.11

RADIÁLISAN GRADIENS GÖRBÜLT RUDAK HŐRUGALMASSÁGTANI MEGOLDÁSAI FESZÜLTSÉGFÜGGVÉNYEK SEGÍTSÉGÉVEL

THERMOELASTIC PROBLEMS OF RADIALLY GRADED CIRCULAR ARCHES USING STRESS FUNCTIONS

Dr. Gönczi Dávid *

ABSTRACT

This paper deals with the determination of thermal stresses distribution and deformations in radially graded circular arches. The study focuses on the analysis of curved beams made of functionally graded materials, where the material composition varying in the radial direction according to an arbitrary function. The arch is assumed to be under generalized plane stress state and subjected to combined thermal and mechanical loads. An arbitrary radial temperature field is prescribed, while we investigate the application possibilities of special radial surface forces applied to the upper and lower curved boundary surfaces and moments at the end cross section of the beam. The solution is derived by generalizing the semi-analytical solutions of multilayered components.

1. BEVEZETÉS

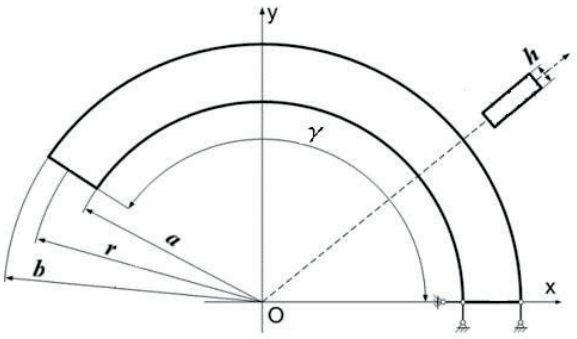
A görbült rudak a tartószerkezetek gyakran alkalmazott szerkezeti elemei. Az elmúlt években számos kutatás foglalkozott a többrétegű, valamint a funkcionálisan gradiens anyagú gerendák mechanikai viselkedésének különböző szempontjaival. A rudak és egyszerű geometriájú testek mechanikai analízisével számos szakkönyv foglalkozik, többek között az [1–4] szakirodalmak. Az egyszerű, funkcionálisan gradiens szerkezeti elemek megoldásaival foglalkoznak az [5-7] tanulmányok. A bimetál szerkezeti elemek a rétegzett rúdszerkezetek egyik gyakorlati alkalmazási területét jelentik. Számos tanulmány vizsgálta a két különböző anyagból felépülő bimetál szalagok mechanikai viselkedését, azonban ezeknek a vizsgálatoknak a nagy részében az ívelt geometriát nem vették figyelembe, mint például a [8, 9].

A [10] tanulmány többrétegű, ívelt gerendákban kialakuló feszültségek és elmozdulások analitikus meghatározásával foglalkozik két rétegből álló bimetál szerkezetekre. A különböző, izotrop anyagokból készült rétegeket kizárólag csak hőterhelés éri, amely egy a teljes szerkezetre előírt konstans hőterhelésből adódik. A feladatot két eltérő elméleti modellel vizsgálják, egy szilárdságtani elméleteket tartalmazó (Euler-Bernoulli-féle rúdmodellhez köthető) és egy síkfeszültségi állapotot feltételező megközelítéssel. Másik népszerű téma a radiálisan gradiens rudak témakörében a stabilitási feladatok megoldása. Ide hozhatjuk példaként a [11] szakirodalmat, amely perturbációs technikát használt rugalmasan ágyazott rudak feladatainak megoldására, vagy a [12] cikk, amelyben a gerendát terhelő koncentrált erő és nyomaték hatását vizsgálják.

Pydah és Sabale [13] kétirányban funkcionálisan gradiens köríves gerendák hajlítási problémáját vizsgálták különböző végterhelések mellett. Eslami és munkatársai [14] kétlépcsős perturbációs módszert alkalmaztak egy oldalirányú nyomásnak és hőmérsékletmezőnek kitett, funkcionálisan gradiens cső megoldására. A vizsgált íves szerkezet anyagtulajdonságai a radiális irány mentén változtak, egy speciális hatványfüggvény szerinti eloszlásnak megfelelően.

A [15] munkában egy radiálisan gradiens görbe középvonalú rúd megoldását mutatják be, amelyben a rugalmassági modulus a radiális irány mentén hatványfüggvény szerint változik. Ecsedi és Baksa [16] olyan módszert dolgoztak ki, amely radiális terhelésnek kitett, köríves, speciálisan ortotrop gerendák feszültségállapotának meghatározására alkalmazható.

Jelen tanulmány egy többrétegű, ívelt gerenda vizsgálatából indul ki. A gerendát radiális irányban speciális hőterhelés éri. Az egyes homogén rétegek egymással tökéletesen kapcsoltak, nincs köztük relatív elmozdulás. A probléma leírásához (r, φ, z) hengerkoordináta-rendszert alkalmazunk.



1. ábra A feladat vázlata

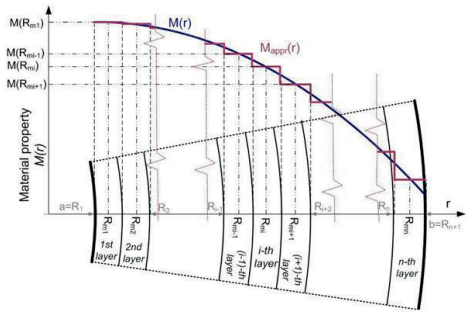
* *egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet*

A kiindulási probléma általánosításával szeretnénk közelíteni a radiálisan gradiens anyagú rudak megoldásait. Az általánosított síkfeszültségi állapot feltételezéseiből indulunk ki, a szétkapcsolt (állandósult állapotú) hőrugalmasságtan alapegyenleteit használjuk a deformációk és a feszültségi állapot leírására. Szeretnénk vizsgálni a radiális irányban előírt hőmérsékletmező mellett a rúdra ható nyomatékok és speciális radiális irányú nyomások hatását is. Az utóbbi felületi terhelést a rúd alsó és felső görbült peremfelületére írjuk elő.

A feladat vázlatát szemlélteti az 1. ábra. A görbe középvonalú rúd külső és belső sugarát jelölje a és b, a rúd vastagsága (z irányban) legyen h, azaz $a \le r \le b,\ 0 \le \varphi \le \gamma,\ -\frac{h}{2} \le z \le \frac{h}{2}$ geometriai tartományt vizsgájuk.

2. A PROBLÉMA MEGOLDÁSA

A probléma megoldásának közelítéséhez használjunk többrétegű megközelítést. Bontsuk fel a szerkezetet n darab homogén rétegre, amelyeket tökéletesen összekapcsolunk. Legyen $R_1 = a$ és $R_{n+1} = b$. A feladat kiindulása az előírt hőmérséklet különbség függvény, amely az abszolút hőmérséklet és a szerkezet egyensúlyi hőmérsékletének a különbsége, és jelölje $\vartheta(r)$. Vegyük úgy, mintha a többrétegű szerkezetünkben minden rétegnek egy konstans hőmérséklete lenne, amit jelöljön ϑ_i az i. rétegben. Ezt megkaphatjuk például úgy, hogy az eredeti hőmérséklet függvényének kiszámoljuk a diszkrét értékét a réteg közepén (2. ábra), de vehetünk például integrál értelemben vett átlagot is a réteg vastagsága (r irányú) mentén.



2. ábra Az anyagi paraméterek közelítése

Az Euler-Bernoulli-féle rúdelmélet feltételezéseiből indulunk ki. Az elmozdulásmezőt az alábbi alakban keressük az i. réteg esetén ($i = 1, \dots, n$):

$$u_{ri}(r,\varphi) = U_i(r) + c_1 \cos\varphi + c_2 \sin\varphi,$$
$$u_{\varphi i}(r,\varphi) = Cr\varphi + c_1 \sin\varphi - c_2 \cos\varphi + c_3 r, \quad (1)$$

Kis alakváltozást feltételezve, alkalmazva a kinematikai egyenletet hengerkoordináta-rendszerben az alábbi összefüggést kapjuk a tangenciális és radiális fajlagos relatív nyúlásokra:

$$\varepsilon_r(r) = \frac{\partial u_r}{\partial r} = \frac{\mathrm{d}u_r(r)}{\mathrm{d}r}, \varepsilon_\varphi(r) = u_r r^{-1}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\varphi i} = \frac{U_i}{r} + C, \varepsilon_{ri} = \frac{dU_i}{dr}, \quad (3)$$

A kompatibilitási egyenletbe helyettesítve a (3) összefüggéseket kapjuk, hogy az i. rétegre ($i = 1, \dots, n$):

$$r\frac{d\varepsilon_{\varphi i}}{dr} + \varepsilon_{\varphi i} - \varepsilon_{ri} - C = 0. \quad (4)$$

Lineárisan rugalmas anyagi viselkedést feltételezve az anyagtörvény az alábbi alakban írható fel az i. réteg esetén:

$$E_i\varepsilon_{ri} = \sigma_{ri} - \nu_i\sigma_{\varphi i} + E_i\alpha_i\vartheta_i, \quad (5)$$
$$E_i\varepsilon_{ri} = \sigma_{\varphi i} - \nu_i\sigma_{ri} + E_i\alpha_i\vartheta_i, \quad (6)$$

ahol E_i a réteg rugalmassági modulusza, ν_i a Poisson szám, α_i a lineáris hőtágulási együttható, $\sigma_{ri}, \sigma_{\varphi i}$ pedig a radiális és tangenciális normálfeszültségek.

Az egyensúlyi egyenlet nemzérus skalár vetületi egyenleteit felírva kapjuk, hogy

$$\frac{d\sigma_{ri}}{dr} + \frac{\sigma_{ri} - \sigma_{\varphi i}}{r} = 0. \quad (7)$$

A (6) egyenlet átrendezése után a normálfeszültségek a V feszültségfüggvény segítségével az alábbi alakban írhatók fel:

$$\sigma_{\varphi i} = \frac{dV_i}{dr}, \quad (8)$$
$$\sigma_{ri} = \frac{V_i}{r}\ \ (i = 1, \dots n). \quad (9)$$

Ezeket az összefüggéseket behelyettesíthetjük az (5-6) összefüggésekbe, amit pedig a (4) kompatibilitási egyenletebe. Így kapjuk, hogy

$$\frac{\mathrm{d}^2V_i}{\mathrm{d}r^2} + r^{-1}\frac{\mathrm{d}V_i}{\mathrm{d}r} - V_i r^{-2} - E_i C r^{-1} = 0. \quad (10)$$

Ennek a differenciál egyenletnek a megoldása

$$V_i(r) = A_{1i}r + \frac{A_{2i}}{r} + \frac{E_i C}{2} r\ln(r)\ \ , R_i \le r < R_{i+1}, \quad (11)$$

$$\frac{dV_i}{dr} = A_{1i} - \frac{A_{2i}}{r^2} + \frac{E_i C}{2}\ln(r) + \frac{E_i C}{2} = \sigma_{\varphi i} \quad (12)$$

a feszültség függvényre. A rúd irányú terhelésből származó peremfeltétel:

$$N = \int_{R_1}^{R_{n+1}} \sigma_\varphi(r)dr = \int_{R_1}^{R_{n+1}} \frac{d}{dr}(r\sigma_r)dr =$$
$$= \sum_{i=1}^{n}\int_{R_i}^{R_{i+1}} \frac{dV_i}{dr}dr = 0 =$$
$$= R_2\sigma_{r1}(R_2) - R_1\sigma_{r1}(R_1) + \dots + R_{n+1}\sigma_{rn}(R_{n+1}) - R_n\sigma_{rn}(R_n) \quad (13)$$

egyenletre vezet. A nyomatéki egyenlet (peremfeltétel) felírásával adódik, hogy

$$M = \int_{R_1}^{R_{n+1}} r\sigma_\varphi(r,\varphi)dr = D, \quad (14)$$

amely a rúd végének terheletlen esetében $D = 0$, míg egy M nagyságú nyomaték esetén $D = Mh^{-1}$ kifejezéssel adható meg.

Az elmozdulásmező c_i $(i = 1, 2, 3)$ ismeretlen komponenseinek meghatározásához a

$$u_{r1}(R_1, 0) = 0, u_{\varphi 1}(R_1, 0) = 0, u_{\varphi 2}(R_{n+1}, 0) = 0 \quad (15)$$

kinematikai peremfeltételeket tudjuk használni.

Alkalmazzunk két, egymástól függő nagyságú (ellentétes irányú) felületen megoszló terhelést, amelyek $p_1(r = a), p_2(r = b)$:

$$ap_1 + bp_2 = 0. \quad (16)$$

Ekkor a radiális normálfeszültségre (megadott alakú elmozdulásmező mellett) a peremen felírható, hogy

$$\sigma_{r1}(R_1) = \sigma_{rn+1}(R_{n+1}) = ap_1. \quad (17)$$

Amennyiben ezek a peremek terheletlenek, az előző (17) egyenlet jobb oldala zérus értéket vesz fel.
A rétegek közötti illesztési feltételekhez kihasználjuk, hogy a rétegek tökéletes kapcsolata miatt az elmozdulásmezőnek folytonosnak kell lennie, azaz

$$U_i(R_{i+1}) = U_{i+1}(R_{i+1}), \qquad (18)$$

illetve a feszültségmező folytonosságából a radiális normálfeszültségekre is fenn kell állnia a

$$\sigma_{ri}(R_{i+1}) = \sigma_{ri+1}(R_{i+1}), \ \ (i = 1,\dots,n-1) \qquad (19)$$

összefüggéseknek.
Összegezve, a $2n$ + 4 darab ismeretlenhez felírtunk $2n$ +4 darad egyenletet, amelynek a rétegek illesztésére vonatkozó feltétle tömören az alábbi formában fogalmazható meg

$$\mathbf{Dx} = \mathbf{f}, \qquad (20)$$

ahol az x oszlopmátrix tartalmazza az ismeretlen A_{1i}, A_{2i} konstansokat, **f** pedig a terhelésből származó tagokat. Az elmozdulásmezőhöz felírható, hogy

$$U_i = \left(E_i - \frac{\nu_i}{E_i}\right) A_{1i} r + \left(E_i + \frac{\nu_i}{E_i}\right) A_{1i} r^{-1} + \frac{C}{2}(-1 + (1-\nu_i)\ln r) r + \alpha_i \vartheta_i r. \qquad (21)$$

A többrétegű feladat megoldásának egyik hátránya, hogy a kapott tangenciális irányú normálfeszültség, amely a domináns feszültség, sokszor oszcilláló jelleget mutat. Ezt ellensúlyozhatjuk egy megfelelő approximációs görbe alkalmazásával, amely például legkisebb négyzetek módszerével is meghatározható.

3. NUMERIKUS PÉLDA

A numerikus példa számításaihoz az alábbi adatokat használtuk fel:
$R_1 = a = 0{,}5\ \text{m}, R_2 = b = 0{,}7\ \text{m}, \gamma = 270°, h = 5\ \text{mm}.$
A hőterhelést adó hőmérsékletkülönbség függvény legyen:

$$\vartheta(r) = 110r + 40\ [\text{K}].$$

Az anyagállandók $(M = E, \nu, \alpha)$ radiális koordinátától való függéséhez az alábbi függvényt használtuk:

$$G(r) = \frac{r-a}{b-a},$$

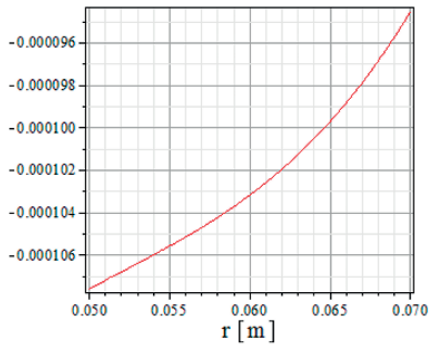
$$M(r) = (M_1 - M_2)G + M_2,$$

amivel

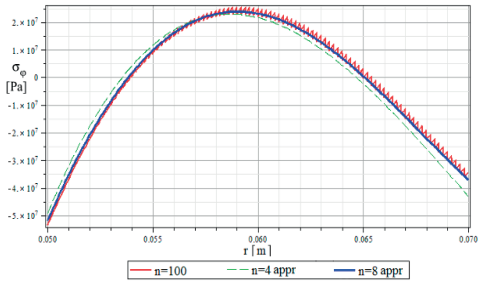
$$E_1 = 210\text{GPa}, E_2 = 340\text{GPa}, \nu_1 = 0.32, \nu_2 = 0.25,$$

$$\alpha_1 = 1.2 \cdot 10^{-6}\frac{1}{\text{K}}, \alpha_2 = 3.9 \cdot 10^{-6}\frac{1}{\text{K}}.$$

A feladat megoldásához Maple szoftvert használtunk. Az approximációs függvényünk legyen egy negyedfokú polinom. Az elmozdulásmezőt szemlélteti a 3. ábra, míg a 4. ábrán látható a tangenciális normálfeszültség 3 rétegszám esetén. Ezen három esetből az első két vizsgált esetben alkalmaztuk az approximációs függvényünket.



3. ábra Az elmozdulásmező [m] függvénye



4. ábra A tangenciális normálfeszültség

4. ÖSSZEGZÉS

A tanulmány a radiálisan gradiens, körív középvonalú rudak egy hőrugalmasságtani feladatának megoldását prezentálta. A rudat általánosított síkfeszültségi állapot mellett egy speciális hőterhelés éri, amely a hengerkoordináta-rendszer radiális irányának tetszőleges függvénye. A funkcionálisan gradiens anyagú rúd megoldását egy többrétegű (kompozit anyagnak tekinthető) modellből vezettük le. Vizsgáltuk azokat az eseteket, amikor koncentrált nyomaték terheli a gerendák végét, avagy speciális radiális irányú megoszló terhelés a gerenda alsó és felső görbült peremeit. Megadtuk a kombinált hő és mechanikai terhelések esetén kialakuló elmozdulásmező és feszültségfüggvények képleteit a kompatibilitási egyenletet és az egyensúlyi egyenletekből levezetett feszültségfüggvényeket felhasználva.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

[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,
[5] Gönczi D.: *Determination of stresses and displacement in orthotropic radially graded disks*, GÉP, 76(3-4), pp. 51-54., 2025. https://doi.org/10.70750/GEP.2025.3-4.12
[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] Gönczi D.: *Thermoelastic analysis of functionally graded anisotropic rotating disks and radially graded spherical pressure vessels*, Journal of Computational and Applied Mechanics, 19 (2), pp. 85-104.,2024, https://doi.org/10.32973/jcam.2024.004
[8] Aignatoaie. M.: *FEA study on the elastic deformation process of a simple bimetal beam*. Applied Mechanics and Materials, 371(8), pp. 448–452,2013, 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.448
[9] Suhir. E.: *Interfacial stresses in bimetal thermostats*, Journal of Applied Mechanics, 56(3), pp. 595–600, 2013, 10.1115/1.3176133
[10] Gönczi D.: *Analysis of a curved bimetallic beam*, Journal of Computational and Applied Mechanics, 14 (1-2), pp. 41-51., 2019, 10.32973/jcam.2019.003
[11] Babaei, H., Kiani, Y., Eslami, M.R.: *Thermomechanical non-linear in-plane analysis of fix-ended FGM shallow arches on nonlinear elastic foundation using two-step perturbation technique*, Int. J. Mech. Mater. Des., 15(2), pp. 225–244, 2019, https://doi.org/10.1007/s10999-018-9420-y
[12] Kiss L.P.: Stability of arches with internal hinge, Mathematics and Mechanics of Solids 29 (10), pp. 1947-1957, 2025, https://doi.org/10.1177/10812865241245
[13] Pydah A., Sabale, A.: *Static analysis of bi-directional functionally graded curved beams*, Composite Structures 160: 867–876, 2017, 10.1016/j.compstruct.2016.10.120
[14] Babaei, H, Kiani, Y, Eslami M.R.: *Geometrically nonlinear analysis of functionally graded shallow curved tubes in thermal environment*, Thin-walled Structured 123, pp. 48-57, 2018, 10.1016/j.tws.2018.08.008
[15] Haskul, M.: *Elastic state of functionally graded curved beam on the plane stress state subject to thermal load*, Mechanics Based Design of Structures and Machines, 47., 2019. 10.1080/15397734.2019.1660890
[16] Ecsedi I., Baksa A.: *A half circular beam bending by radial loads*, Journal of Computational and Applied Mechanics, 12(1), pp. 3-18., 2017.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.12

GŐZFEJLESZTŐ-CSÖVEK SZERKEZETINTEGRITÁSI VIZSGÁLATÁNAK MI-TÁMOGATOTT KIEGÉSZÍTÉSE

AI-SUPPORTED COMPLEMENT TO THE STRUCTURAL INTEGRITY INSPECTION OF STEAM GENERATOR TUBES

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

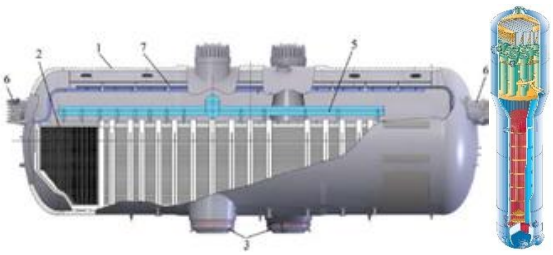
ABSTRACT

Integrity decisions on steam generator tubes rely on eddy current testing (ECT), which gives little information on the outer surface or on the damage mechanism, while secondary-side visual inspections are general surveys not directed at the ECT indications. This paper develops the concept of a remotely operated, ECT-guided targeted optical inspection for the secondary side. The inspection task is defined on the ECT target set, and five requirements are derived: traceability, position verification, image quality, foreign material exclusion and a strictly complementary role. A closed-form geometric analysis of the inter-tube lanes and of the usable circumferential arc shows that horizontal WWER (Water-Cooled, Water-Moderated Energy Reactor) bundles with in-line arrangement allow perpendicular viewing, whereas the interior of triangular-pitch vertical bundles practically does not, and that depth of field and glare, rather than resolution, limit image quality. A structured image data model and a staged validation strategy are proposed. Artificial intelligence (AI) is treated as an optional complement for image quality control, position identification and condition classification, subject to qualification. Finally, the need to develop the inspectability and monitoring into small modular and Generation IV reactors with longer fuel cycles and design lives is discussed, using the AP300 as an example.

1. BEVEZETÉS

A nyomottvizes atomerőművek gőzfejlesztőinek hőátadó csövei a primer és a szekunder kör közötti nyomáshatár részei, ezért integritásuk közvetlen nukleáris biztonsági kérdés. A hazai nukleáris iparban a téma elsősorban a Paksi Atomerőmű négy VVER-440 (ВВЭР, Víz-Víz Energetikai Reaktor) típusú blokkja miatt alapvető: a blokkok biztonságos üzemeltetése és üzemidő-hosszabbítása a gőzfejlesztők, ezen belül a hőátadó csövek rendszeres állapotfelmérésére is támaszkodik [1]. A Paks II. projekttel a VVER-1200 típus gőzfejlesztői is megjelennek Magyarországon. Nemzetközi szinten a függőleges kialakítású U-csöves nyomottvizes blokkok mellett több kis moduláris reaktor (SMR), például az AP1000-alapú AP300, valamint egyes negyedik generációs típusok is hasonló gőzfejlesztőkön keresztül adják át a hőt a szekunder körnek. A hőátadó csövek szerkezetintegritása ezekben a berendezésekben is a blokk teljes élettartamát meghatározó kérdés, bár az anyagok, az üzemi körülmények és a vizsgálati hozzáférhetőség típusonként eltérnek [2, 3]. A két alaptípust, a vízszintes VVER- és a függőleges U-csöves gőzfejlesztőt, az 1. ábra szemlélteti.

Az állapotfelmérés elsődleges eszköze az örvényáramos vizsgálat (Eddy Current Testing, ECT) [3], amely a csőfalról, illetve a csőfal hibájáról ad részletes információt, a külső felületről és a károsodási mechanizmusról azonban kevesebbet.



1. ábra WWER 1000 gőzfejlesztő PGV-1000MKP [4], Függőleges kilakítású gőzfejlesztő [5]

VVER-gőzfejlesztőkben a szekunder oldali vizuális vizsgálat legalább négyévente előírt, személyesen vagy távvezérelt kamerával [4]. Függőleges gőzfejlesztőkben az EPRI (Electric Power Research Institute) az idegen tárgyak keresését és eltávolítását (Foreign Object Search and Retrieval, FOSAR) az ECT-vel azonos leállásban, legalább a köpeny és a csőköteg közötti gyűrűtérben és a csőmentes sávban javasolja [6]. Ezek a vizsgálatok azonban áttekintő jellegűek, nem az ECT által kijelölt pontokra irányulnak.

A cikk célja egy ECT-vezérelt, célzott külső optikai vizsgálat koncepciójának kidolgozása a gőzfejlesztő hőátadó csöveinek szekunder oldali vizsgálatára. Ennek keretében megfogalmaztuk a vizsgálati feladatot és a vele szemben támasztott követelményeket, és elemeztük a módszer geometriai korlátait a különböző gőzfejlesztő-típusokban. A mesterséges intelligenciát (MI) a koncepció kiegészítő lehetőségeként vizsgáljuk: azt mutatjuk meg, hogy a strukturáltan gyűjtött felvételek milyen adat- és validálási keretek mellett támogathatják az MI-alapú képfeldolgozást.

* *PhD hallgató, 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. ECT-VEZÉRELT CÉLZOTT OPTIKAI VIZSGÁLAT

2.1. A vizsgálati feladat és a követelmények

A hőátadó csövek állapotáról hozott döntés több, egymásra épülő lépés eredménye. A vizsgálatot a jelek értékelése, a hibák osztályozása és méretezése követi, ezután a hibák idealizálása és az integritásszámítás következik, a folyamatot pedig a dokumentálás zárja. [1, 4]. Az örvényáramos vizsgálat korlátai régóta ismertek. A vezetőképes vagy ferromágneses lerakódások, valamint a megtámasztások és más szerkezeti elemek jele elfedheti a hibajelet. Idegen tárgyak kimutatására jelenleg nincs általánosan minősített ECT-eljárás, ezért az iparági ajánlás a vizuális vizsgálati módszerrel való összehangolt alkalmazást javasolja. [7]. Vizuális vizsgálatot tehát már most is végeznek. Ami hiányzik, az egy olyan eljárás, amely az ECT által kijelölt helyekről igazolt pozíciójú, megismételhető felvételeket ad. A szekunder oldali vizuális vizsgálat tehát már része a gyakorlatnak, nincs azonban olyan eljárás, amely az ECT által kijelölt helyekhez igazolt pozíciójú, reprodukálható felvételeket rendelne.

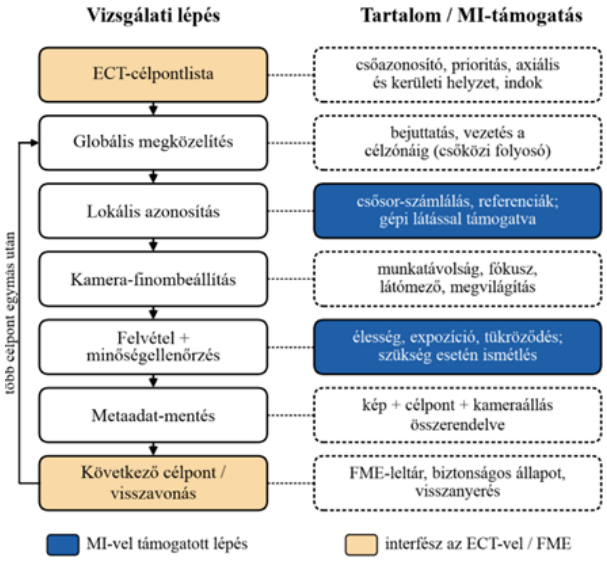
A célzott optikai vizsgálatnak az ECT által kijelölt, a szekunder oldalról hozzáférhető helyekről igazolt pozíciójú, minősített felvételeket kell szolgáltatnia, a felvételi körülmények dokumentálásával együtt. A rendszert leürített és lehűtött gőzfejlesztőben, mérsékelt dózisteljesítményű környezetben történő alkalmazásra kell kialakítani. Távvezérelt, félautomata üzemmódban kell működnie úgy, hogy az egyes célpontok felvételét az operátor hagyja jóvá. A vizsgálati feladatból és a fejezetben bemutatott korlátokból a rendszerrel szemben az alábbi öt követelményt fogalmaztuk meg:

- **K1** - nyomon követhetőség: minden felvételnek egyértelműen egy célponthoz és egy vizsgálati kampányhoz kell rendelhetőnek lennie,
- **K2** – pozíció igazolás: a felvétel helyét a hajtás helyzetjelétől független geometriai referenciákkal is igazolni kell,
- **K3** - képminőség: a felvételnek meg kell felelnie az előre rögzített élességi, expozíciós és lefedettségi kritériumoknak, hogy a kampányok között reprodukálható legyen,
- **K4** - idegenanyag-kizárás (Foreign Material Exclusion, FME) és visszanyerhetőség: a rendszert úgy kell kialakítani, hogy egyetlen eleme se maradhasson a gőzfejlesztőben, meghibásodás esetén sem,
- **K5** - kiegészítő szerep: a rendszer nem végezhet biztonsági célú hibaméretezést; eredményeinek az ECT-indikációk értelmezését kell támogatniuk.

2.2. A vizsgálati folyamat felépítése

A vizsgálati folyamatot a 2. ábra foglalja össze. A berendezés mozgatása háromszintű: a globális pozicionálás a bejuttatástól a célzónáig, a lokális pozicionálás a keresett cső és a csőközi folyosó azonosításáig, a finombeállítás a kamera munkatávolságáig és optikai tengelyéig tart.

Lehetséges konstrukcióváltozatok a vezetősínes vagy vontatott endoszkópos fej, a karcsú csőközi platform és a külső manipulátorral vezetett optikai fej. Függőleges gőzfejlesztőkhöz csőkötegközi vizsgáló- és FOSAR-rendszerek már léteznek: a CECIL robot a vizsgálónyíláson át beépített sínen mozog, és hajlékony lándzsával juttatja a vizsgáló szondát a csőoszlopközökbe [8]. A koncepció újdonsága ezért nem a bejuttatás, hanem az ECT-célponthalmazhoz kötött, igazolt helyzetű vizsgálat és a nyomon követhető, strukturált képi adatszerkezet.



2. ábra Az ECT-vezérelt célzott optikai vizsgálat folyamata

2.3. Geometriai hozzáférhetőség és képalkotási korlátok

A hozzáférhetőséget a csőköteg egyenes csőközi rései határozzák meg (*1. táblázat*). Ez a vízszintes VVER-gőzfejlesztők folyosós elrendezésében, illetve a függőleges gőzfejlesztők szabályos háromszög-osztásában a legszűkebb egyenes rés szélessége:

$$s_{\mathrm{f}} = p - d, \tag{1}$$

$$s_{\mathrm{h}} = \frac{\sqrt{3}}{2} p - d, \tag{2}$$

ahol s_{f} a folyosós, s_{h} a háromszög-osztású elrendezés legszűkebb egyenes résszélessége, p az osztás és d a csőátmérő. A 3/4 hüvelykes, háromszög-osztású kötegekben s ≈ 2,9 mm, ami egyezik a csőkötegközi eszközök alsó határával [8].

1. táblázat Csőköteg-geometriák és a legszűkebb egyenes csőközi rés

Gőzfejlesztő	Elrendezés	d / p [mm]	s [mm]
VVER-440 [9]	vízszintes, folyosós	16 / 24×29,5	8 / 13,5
VVER-1200 [10]	vízszintes, folyosós	16 / 22×24	6 / 8
PWR, 3/4"-os cső [11]	függőleges, háromszög	19,05 / 25,4	≈2,9
AP1000, AP300* [12]	függőleges, háromszög	17,5 / 24,9	≈4,1
** az AP300 csőgeometriája nem nyilvános, az AP1000-ével azonosnak feltételezve*			
$s = s_f$ (folyosós, két osztásirányban) vagy $s = s_h$ (háromszög-osztás)			

A képalkotás korlátjának jellemzésére tekintsük a résben elhelyezett kamerát, amelynek optikai tengelye merőleges a cső tengelyére, és amely a csőfaltól L távolságra van (*3.a ábra*). A palást egy pontja akkor értékelhető, ha a látósugár és a felületi normális által bezárt β beesési szög nem nagyobb β_{max}-nál; nagyobb szögnél a fémes felület tükröződése és a perspektivikus torzulás miatt a kép nem értékelhető. A cső középpontja, a felületi pont (P) és a kamera által alkotott háromszögre felírt szinusztételből az értékelhető ív φ^* félszöge (R = d/2):

$$\varphi^* = \beta_{\max} - \arcsin\left(\frac{R\sin\beta_{\max}}{R+L}\right), \tag{3}$$

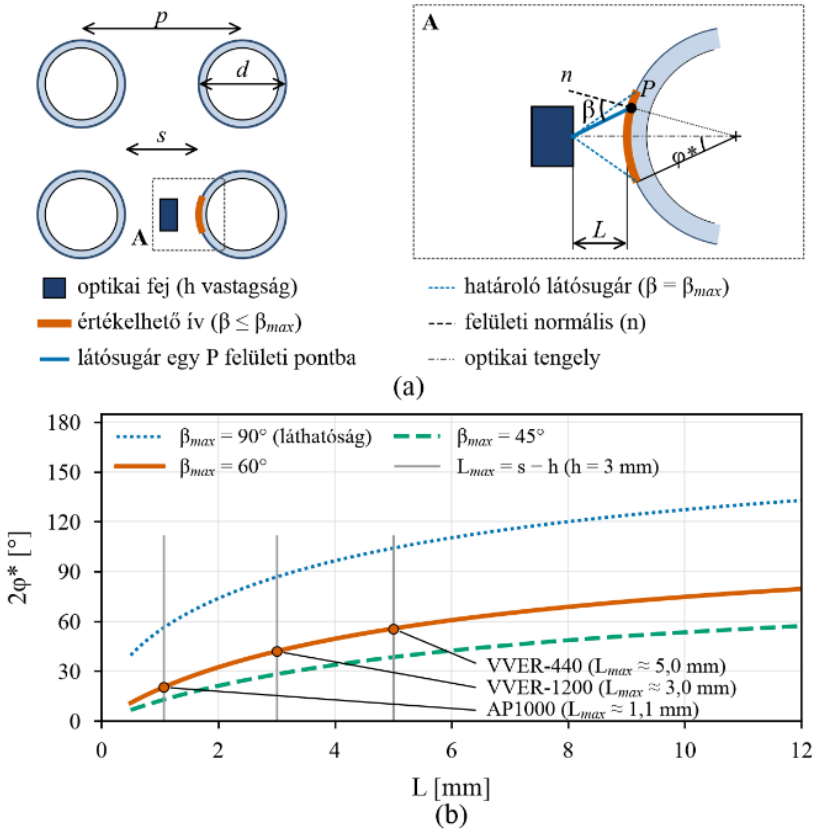
β_{max} = 90° esetén (3) a geometriai láthatóság határát, φ^* = arccos(R/(R+L)) értéket adja. A *3.b ábra* szerint d = 16 mm, L = 4 mm és β_{max} = 60° esetén $2\varphi^* \approx 49°$, azaz egy felvétel a kerület kb. 14%-át fedi le; a hozzáférhető oldal dokumentálásához ezért több nézet vagy kerületi pásztázás szükséges. Feltételezett h = 3 mm vastag optikai fejjel a merőleges nézet legnagyobb munkatávolsága L_{max} = s − h: ez VVER-440-nél 5 mm (a másik irányban 10,5 mm), VVER-1200-nál 3 mm, AP1000-nél ≈1 mm, a 3/4 hüvelykes háromszög-osztásban pedig a fej el sem fér. A háromszög-osztású kötegek belseje így jellemzően csak a rés irányába néző ferde nézettel vizsgálható, nagy beesési szöggel.

A görbült palást miatt az értékelhető íven belül a munkatávolság Δz-vel változik, ami a szükséges mélységélességet adja; a felbontási követelmény (Δ) pedig a legkisebb vizsgálandó a_{min} jellemzőből és a jellemzőnkénti k képpontszámból adódik:

$$\Delta z = R(1 - \cos\varphi^*), \tag{4}$$

$$\Delta = \frac{2L\tan(\alpha/2)}{N} \le \frac{a_{\min}}{k}, \tag{5}$$

ahol α a látószög és N a képpontszám. Az előbbi példában Δz ≈ 0,7 mm; L = 4 mm, α = 90° és N = 1600 esetén Δ ≈ 0,005 mm. Közeli munkatávolságnál tehát a felbontásnál erősebben korlátoz a mélységélesség, a megvilágítás és a tükröződés. Az értékek szemléltető jellegűek; az optika kiválasztásához próbatesten végzett mérések szükségesek.



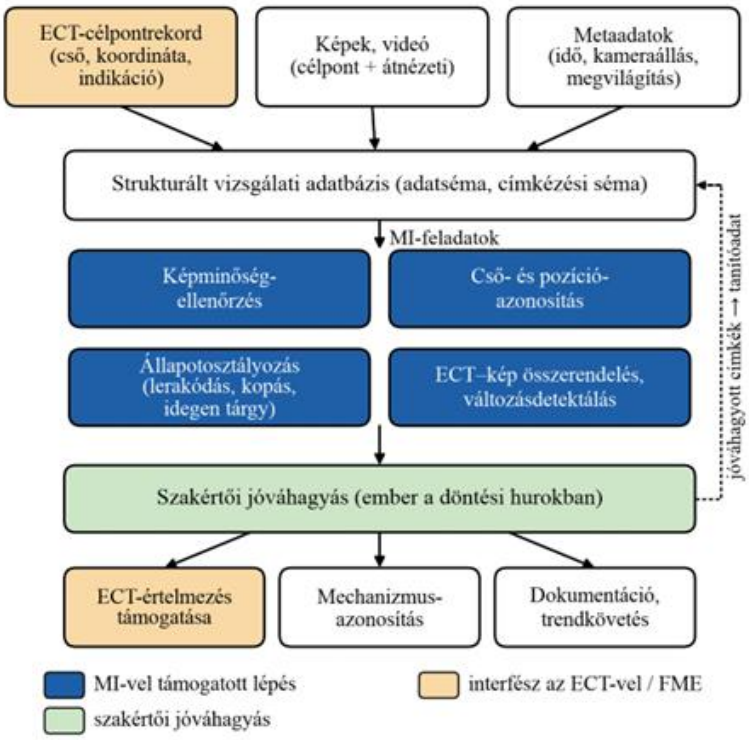
3. ábra (a) Kamera a folyosós csőköteg résében;
(b) az értékelhető ív 2φ szöge a munkatávolság függvényében, d = 16 mm*

3. ADATMODELL, VALIDÁLÁS ÉS AZ MI ALKALMAZHATÓSÁGA

3.1. Képi adatmodell és a MI kiegészítő szerepe

A K1 és K3 követelmény teljesítéséhez minden felvételhez rögzíteni kell a célpontot, a felvételi körülményeket (időpont, kameraállás, munkatávolság, megvilágítás), a képminőségi jelzőt és a szakértő által jóváhagyott állapotot (*4. ábra*). Az így felépülő adatbázis MI nélkül is értéket ad: a felvételek visszakereshetők, a kampányok között összevethetők, és az ECT-indikációkkal összerendelhetők.

A csővizsgálati láncban a MI az ECT-jelek gépi értékelésében a legfejlettebb. A strukturált képi adatbázisra kiegészítő feladatként a képminőség-ellenőrzés, a cső- és pozícióazonosítás, az állapotosztályozás és a kampányok közötti változáskezelés illeszthető. Fényképekből a hibák hossza és szélessége jó közelítéssel becsülhető, mélységük azonban nem, ezért a mélység meghatározása az ECT feladata marad. Az automatikus elemzőket minősíteni kell, és minden algoritmusmódosítás újraminősítést igényel. A MI-funkciók ezért döntéstámogató szerepűek, az eredményeket szakértő hagyja jóvá.



4. ábra A képi adatmodell és a kiegészítő MI-feldolgozás

3.2. Alkalmazhatóság új blokkokban: SMR-ek és negyedik generációs típusok

A koncepció előnye, hogy a vizsgálat az ECT által kijelölt helyekre irányul, és az eredmények rendezett, visszakereshető formában kerülnek rögzítésre. Így az ECT-indikációkhoz a cső külső felületéről is információ társul, ami megkönnyíti a károsodási mechanizmus azonosítását, a téves jelzések kiszűrését és az elváltozások időbeli követését. A módszer korlátja, hogy a kamerával a falmélység nem mérhető, csak a hozzáférhető zónák vizsgálhatók (2.3. alfejezet), a sugárzás pedig csökkenti a kamerák élettartamát.

A kérdés jelentősége az új blokkoknál tovább nő. Az SMR-ek és a negyedik generációs típusok fejlesztésében a hosszabb üzemanyagciklus és a nagyobb tervezett élettartam a jellemző irány. Emiatt ritkábbak a vizsgálati lehetőségek, miközben a gőzfejlesztőnek hosszabb ideig kell megbízhatóan üzemelnie. Nem elegendő ezért a meglévő vizsgálati eljárásokat utólag alkalmazni: a vizsgálati és monitorozó rendszereket a berendezéssel együtt kell fejleszteni, és ezt a tervezés szakaszában lehet a legegyszerűbben megoldani.

Az AP300 jól szemlélteti ezt. Az egyhurkos, AP1000-alapú blokknak egyetlen függőleges U-csöves gőzfejlesztője van, amelynek állapota közvetlenül a blokk rendelkezésre állását határozza meg [2, 12]. A négyéves üzemanyagciklus és a 80 évet meghaladó élettartam [2] mellett a szerkezeti hibák időben történő azonosítása és folyamatos monitorozása a hosszú élettartam biztosításának feltétele.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy ECT-vezérelt, célzott optikai vizsgálat koncepcióját mutatta be, amely a nyomottvizes atomerőművek gőzfejlesztőinek a szekunder oldali vizuális vizsgálatát az ECT által kijelölt célpontokhoz köti, és az indikációk helyéről igazolt pozíciójú, nyomon követhető felvételeket ad. A zárt alakú geometriai elemzés szerint a folyosós VVER-csőkötegek lehetővé teszik a merőleges nézetet. A strukturált képi adatbázis önmagában is értéket ad, és lehetővé teszi az MI-alapú képfeldolgozást, mint minősítéshez kötött, kiegészítő lehetőséget.

5. SUMMARY

The paper presented the concept of an ECT-guided targeted optical inspection that links the secondary-side visual inspection of pressurised water reactor steam generators to the target locations identified by ECT, and provides traceable images of the indication sites with verified position. The closed-form geometric analysis shows that VVER tube bundles with in-line arrangement allow perpendicular viewing. The structured image database is valuable in itself, and it enables AI-based image processing as a complementary option subject to qualification.

6. IRODALOM

[1] KASÓ F. Á., ZWIERCZYK P. T.: *Gőzfejlesztő hőátadó csövek szerkezetintegritási értékelésének fejlődéstörténete a nyomottvizes atomerőművekben*, GÉP, LXXVI. évf., 3–4. szám, 2025, https://doi.org/10.70750/GEP.2025.3-4.16

[2] WESTINGHOUSE: Regulatory Engagement Plan – Westinghouse AP300 SMR, SAPP-GWGLH-001 Rev. B, 2024, NRC ML24060A244

[3] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION REACTOR DATABESE https://world-nuclear.org/nuclearreactor-database/summary [elérés: 2026.10.18.]

[4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators*, IAEATECDOC-1668, Bécs, 2011, ISBN 978-92-0-121410-2 https://wwwpub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1668_web.pdf [elérés: 2026.10.18.]

[5] Steam Generator Engineering Product Portfolio, https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/steam-generator-engineering-product-portfolio/ [elérés: 2026.10.18.]

[6] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE: *Steam Generator Integrity Assessment Guidelines Revision 3,* EPRI, Palo Alto 2009 https://www.nrc.gov/docs/ML1004/ML100480243.pdf [elérés: 2026.10.18.]

[7] U.S. NRC, EPRI SGMP: NRC / SGMP Steam Generator Task Force Meeting, 2018.01.23., NRC ML18022B105 https://www.nrc.gov/docs/ML1802/ML18022B105.pdf [elérés: 2026.10.18.]

[8] QINETIQ: CECIL® – Consolidated Edison Combined Inspection and Lancing, termékismertető, https://www.qinetiq.com/-/media/81d77d6127b64ebcabd3297f1611e93b.ashx?ver=e48b5ccee04a44049d5f0f49dbfdce14 [elérés: 2026.10.18.]

[9] PELTONEN V.: Formation of hard magnetite deposits in simulated pressurized water reactor steam generator environment, MSc thesis, LUT University, Lappeenranta, 2022 https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164449/Master's_thesis_Peltonen_Veera.pdf?sequence=1 [elérés: 2026.10.18.]

[10] LARSON A.: Belarusian Nuclear Power Plant Cuts Nation's Reliance on Natural Gas-Fired Electricity Generation, POWER Magazine, 2024.11.19. https://www.powermag.com/belarusian-nuclear-power-plant-cuts-nations-reliance-on-natural-gas-fired-electricity-generation/ [elérés: 2026.10.18.]

[11] U.S. NRC: St. Lucie Plant, Unit 2 – Review of the 2012 Refueling Outage Steam Generator Tube Inservice Inspection Report, NRC ML14013A247, 2014 https://www.nrc.gov/docs/ML1401/ML14013A247.pdf [elérés: 2026.10.18.]

[12] WESTINGHOUSE: AP1000 Plant Description and Analysis Report, WCAP-15612, 2000, NRC ML003779406 https://www.nrc.gov/docs/ml0037/ML003779406.pdf [elérés: 2026.10.18.]

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.13

BOKA ÍZÜLET MOZGÁSANALÍZISE KINEMATIKAI SZERKEZETTEL

MOTION ANALYSIS OF THE ANKLE JOINT USING A KINEMATIC MECHANISM

Dr. Kátai László[*], *Dr. Mező Róbert*[**], *Dr. Gárdonyi Péter*[***], *Nagy István*[****]

ABSTRACT

The aim of this study was to develop a simplified kinematic mechanism for the spatial analysis of ankle and foot motion and to demonstrate a coordinate-based method for determining the displaced position of anatomical reference points. The model was constructed according to the main anatomical relationships of the ankle and foot, with the Talus as the central element connecting the Talocrural, Subtalar and Talonavicular joints. A coordinate system related to the anatomical planes was assigned to the mechanism, and characteristic coordinates were defined for the joint points. Homogeneous coordinate transformation was applied to determine the spatial position of a selected point after a prescribed combined motion. The method was demonstrated for a combined dorsiflexion of 27.5° and eversion of 17°, using the Talonavicular joint point as an example. The resulting coordinates and their differences provide a quantitative description of the spatial displacement caused by the prescribed motion. The results demonstrate that the developed kinematic representation can numerically describe complex ankle motion and compare different motion states based on the position changes of selected kinematic points.

1. BEVEZETÉS

A bokaízület összetett biomechanikai rendszer, amelynek mozgását a lábszár és a lábfej csontos struktúrái, valamint azok ízületi kapcsolatai együttesen határozzák meg. A mozgások térbeli leírása a sagittalis, coronalis és transversalis síkok, valamint az ezekhez rendelt koordinátarendszer segítségével valósítható meg. Jelen munkában a boka mozgásának vizsgálatára egy egyszerűsített kinematikai szerkezetet alakítottunk ki, amely a főbb anatómiai kapcsolatok mechanikai viszonyait és a hozzájuk tartozó koordinátapontokat modellezi. A cél olyan számítási módszer alkalmazása volt, amely az ismert kiinduló koordináták és mozgásszögek alapján meghatározza az egyes kinematikai pontok elmozdult térbeli helyzetét.

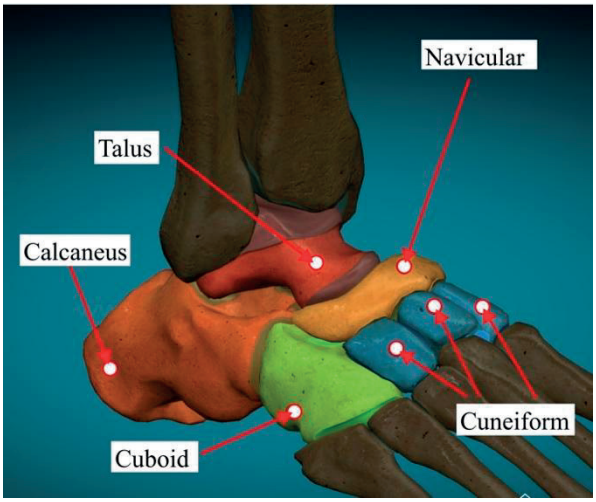
2. A BOKA ANATÓMIÁJA

2.1. A lábfej struktúrája

A bokaízület elsődleges csontos elemeit a lábszár csontjai, a sípcsont (Tibia) és a szárkapocscsont (Fibula), valamint az ezek által közrefogott ugrócsont (Talus) alkotják. A Tibia és a Fibula alsó végei ízületi villát képeznek, amelybe a Talus illeszkedik. Ez a kapcsolat biztosítja a bokaízület fő, csuklószerű mozgását [1].

A Talus a lábfej további csontjaival is kapcsolatban áll. Hátulsó irányban a sarokcsonttal (Calcaneus), előrefelé pedig a sajkacsonttal (Navicular) illeszkedik. A Navicularhoz kapcsolódik a három ékcsont (Cuneiform), míg a lábfej laterális oldalán a köbcsont (Cuboid) helyezkedik el. Ezek a csontok alkotják a lábtő (tarsus) fő szerkezeti egységét, amely a boka és a láb elülső része közötti mechanikai kapcsolatot biztosítja [2, 3].

Az 1. ábra a boka és a közvetlenül kapcsolódó lábtőcsontok térbeli elhelyezkedését szemlélteti. A vizsgált mozgások szempontjából kiemelt jelentőségű a Tibia–Fibula–Talus alkotta bokaízület, valamint a Talushoz kapcsolódó Calcaneus és Navicular helyzete.



1. ábra A bokát alkotó csontok [3]

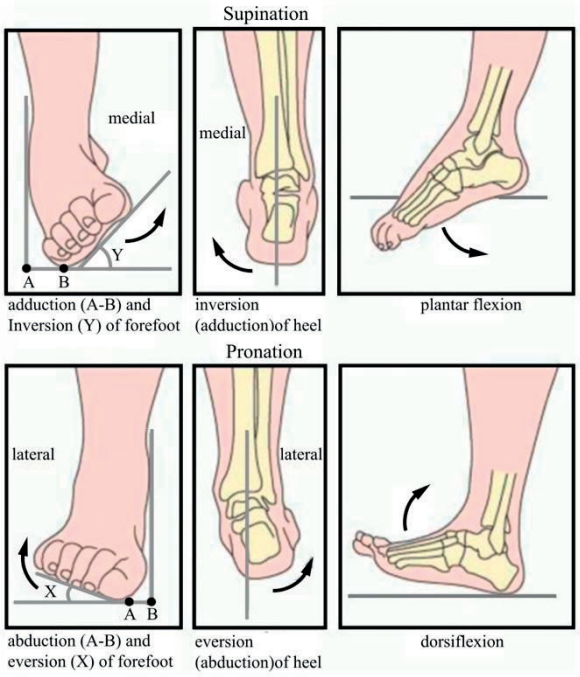
* *egyetemi tanár, MATE, Műszaki Intézet*
** *mesteroktató, MATE, Műszaki Intézet*
*** *egyetemi adjunktus, MATE, Műszaki Intézet*
**** *főorvos, LBT Kereskedelmi és Szolgáltató Kft., Budapest*

2.2. Boka kinematikai alapjellemzői

Az anatómiai mozgások leírására három egymásra merőleges síkot különböztetünk meg. A testet jobb és bal részre osztó sagittalis sík, az erre merőleges, a test hossztengelyével párhuzamos coronalis (frontális) sík, valamint az ezekre merőleges transversalis (haránt) sík szolgál a mozgások térbeli értelmezésére.

A boka és a lábfej mozgásai mindhárom síkban értelmezhetők. A sagittalis síkban a legfontosabb mozgások a dorsalflexió és a plantarflexió, amelyek a lábfej emelését, illetve lefelé irányuló mozgását jelentik. A coronalis síkban az inverzió és az everzió értelmezhető, amelyek során a talp befelé, illetve kifelé fordul. A transversalis síkban az abdukció és addukció a lábfej oldalirányú, illetve a test középvonala felé történő elmozdulását jelenti [4].

A fenti alapmozgások kombinációjaként jön létre a szupináció és a pronáció. A szupináció az inverzió, az addukció és a plantarflexió, míg a pronáció az everzió, az abdukció és a dorsalflexió összetett mozgásaként értelmezhető. A jobb lábfej jellemző mozgásait a 2. ábra szemlélteti [5].



2. ábra A jobb lábfej elmozdulási lehetőségei [5]

1. táblázat Elmozdulások csoportosítása

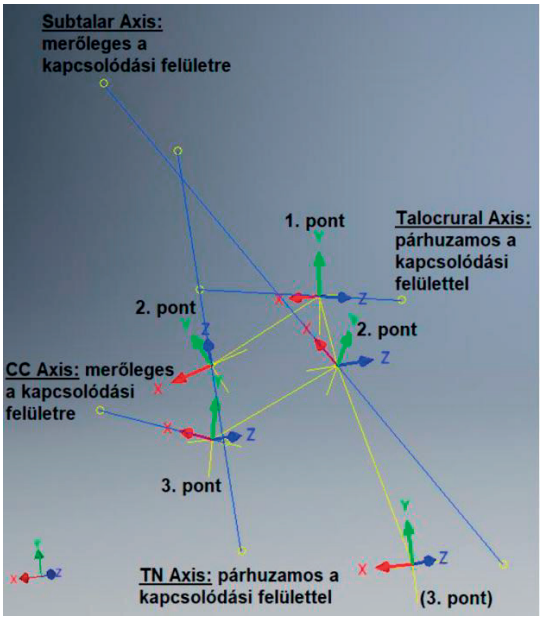
Mozgási sík	Alapmozgások	Összetett mozgások
Sagittalis	dorsalflexió, plantarflexió	szupináció, pronáció
Coronalis	inverzió, everzió	szupináció, pronáció
Transversalis	abdukció, addukció	szupináció, pronáció

2.3. A kinematikai szerkezet felépítése

A boka és a lábfej mozgásainak vizsgálatához olyan egyszerűsített kinematikai szerkezet került kialakításra, amely az anatómiai csontok és ízületi kapcsolatok főbb mechanikai viszonyait reprodukálja. A modell koordinátarendszerének alapját az előzőekben definiált anatómiai síkok adják. Az X tengely a sagittalis, míg a Z tengely a coronalis síkkal párhuzamos irányultságot reprezentálja. A modellhez egy további, a transversalis síkkal párhuzamos sík is tartozik, amely a talajjal való érintkezési felületet szemlélteti.

A kinematikai modellben a koordinátapontok az egyes részegységekhez tartoznak, ezért azok a mozgások során az adott egységgel együtt változtatják helyzetüket és irányultságukat. Ez lehetővé teszi az egyes ízületi kapcsolatok és a teljes szerkezet mozgásának geometriai leírását. A koordinátapontok és az ízületi tengelyek irányultságát az anatómiai ízületek kapcsolódási geometriája alapján határoztuk meg. A koordináta pontos és ízületi tengelyek értelmezését szemlélteti a 3. ábra.

A szerkezet alapját egy talp- és lábfejegység képezi, amely a lábfej külső elmozdulását és a talajjal való kapcsolatot reprezentálja, valamint rögzítési és forgási pontokat biztosít a további részegységek számára.



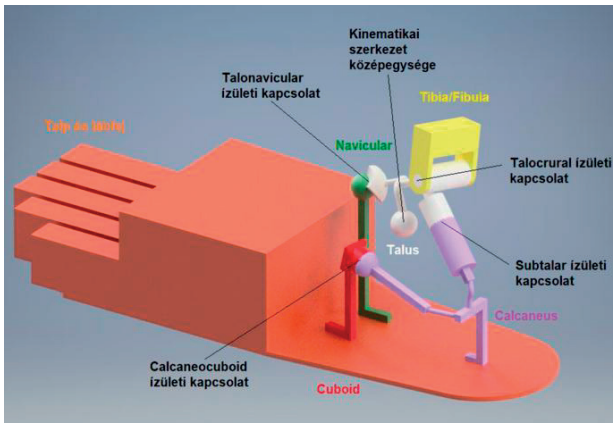
3. ábra A koordináta pontok, ízületi tengelyek (kék) és kapcsolati vonalak (sárga)

A Talocrural ízület modellezése során a Tibia és Fibula által kialakított foglalati geometria került figyelembevételre, amelybe a Talus illeszkedik és amely a boka fő forgási kapcsolatát biztosítja. A Calcaneus a modellben merev, karos mechanizmusként jelenik meg, amely a Subtalar és Calcaneocuboid kapcsolatokon keresztül kapcsolódik a rendszerhez. A modell mindkét kapcsolatnál gömbcsuklós jelleget alkalmaz, kiegészítve a talp egységéhez viszonyított forgási lehetőséggel. A Navicular a Talonavicular kapcsolatot reprezentálja, amelynek mozgását gömbfejes kapcsolat modellezi. A

Cuboid a Calcaneushoz hasonlóan gömbcsuklós kapcsolaton keresztül csatlakozik a rendszerhez.

A kinematikai szerkezet központi eleme a Talus, amely három fő ízületi kapcsolatot köt össze: a Talocrural, a Subtalar és a Talonavicular ízületet. Ennek megfelelően a Talus biztosítja a lábfej és a lábszár közötti, valamint a lábtő irányába történő mozgások központi mechanikai kapcsolatát. A modellben külön központi koordinátapont is meghatározásra került, amely a boka geometriai középpontját reprezentálja, és lehetőséget biztosít a különböző mozgásállapotok helyzet- és szögváltozásainak összehasonlítására.

A kialakított kinematikai modell teljes felépítését a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra A kialakított kinematikai szerkezet

3. EREDMÉNYEK

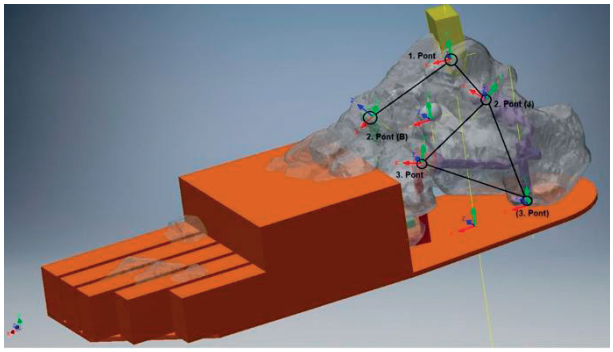
Az elkészített kinematikai szerkezet alkalmas a boka összetett mozgásának a szimulációjára és a mozgás során történő elmozdulásak meghatározására. Erre vonatkozóan megfelelő koordináta számításokat végeztünk el.

Az egyes pontok kiinduló koordinátáit az alábbi táblázat mutatja.

2. táblázat Stabil lábfej koordináta pontjai

Koordináta pont helyzete	Koordináta síkjainak bezárt szöge	Ízületi kapcsolati pontok
$O_n = \begin{pmatrix} -35 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 0° (XZ) Transverse: 0° (XY) Sagittal:0°	Kinematikai szerkezet középső koordináta pontja (origó)
$P_{TTF} = \begin{pmatrix} -49{,}698 \\ 31{,}699 \\ 3{,}519 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 15,5° (XZ) Transverse: 9,8° (XY) Sagittal:18,27°	Talocrural ízületi kapcsolat (1. csuklópont)
$P_{TN} = \begin{pmatrix} -12{,}386 \\ 16{,}326 \\ 6{,}864 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 26,5° (XZ) Transverse: 40° (XY) Sagittal:46,72°	Talonavicular ízületi kapcsolat (2. csuklópont (B))
$P_{TC} = \begin{pmatrix} -58{,}184 \\ 13{,}867 \\ -5{,}660 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 46° (XZ) Transverse: 41° (XY) Sagittal: 157°	Subtalar ízületi kapcsolat (2. csuklópont (J))
$P_{CC} = \begin{pmatrix} -22{,}255 \\ -1{,}566 \\ -13{,}305 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 17,7° (XZ) Transverse: 165° (XY) Sagittal:9,5°	Calcaneocuboid ízületi kapcsolat (3. csuklópont)
$P_{CG} = \begin{pmatrix} -49{,}698 \\ -42{,}940 \\ 3{,}519 \end{pmatrix}$	(YZ) Coronal: 0° (XZ) Transverse: 0° (XY) Sagittal:0°	Calcaneus-Ground elfordulási középpont (3. csuklópont)

Az ízületi kapcsolatokat reprezentáló koordináta pontok és a hozzájuk tartozó megfelelő kinematikai párok megfeleltetését az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra A boka és a kinematikai reprezentatív modellje

A kinematikai modell egyik vizsgált pontja, a Talonavicular ízületi kapcsolat (2. csuklópont, B) stabil helyzetben a következő koordinátával rendelkezik:

$$p_{TN} = \begin{pmatrix} -12{,}386 \\ 16{,}326 \\ 6{,}864 \end{pmatrix}$$

míg a kinematikai szerkezet középpontját jelentő referenciaorigó helyvektora:

$$O_n = \begin{pmatrix} -35 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Egy összetett lábfejmozgás vizsgálatára 27,5° dorsalflexiót és 17° everziót választottunk. A modellben a dorsalflexió a Z tengely, míg az everzió az X tengely körüli elfordulásként került értelmezésre. A két elfordulás együttes hatása a rotációs mátrixok egymást követő alkalmazásával írható le:

$$R = R_Z(\gamma) R_X(\alpha),$$

ahol, γ=27,5°, a=17°.

A Z tengely körüli forgatást leíró mátrix:

$$R_Z(27{,}5^\circ) = \begin{pmatrix} \cos 27{,}5^\circ & -\sin 27{,}5^\circ & 0 \\ \sin 27{,}5^\circ & \cos 27{,}5^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

az X tengely körüli forgatás pedig:

$$R_X(17^\circ) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 17^\circ & -\sin 17^\circ \\ 0 & \sin 17^\circ & \cos 17^\circ \end{pmatrix}$$

A két mátrix szorzataként:

$$R = \begin{pmatrix} 0{,}88701 & -0{,}44157 & 0{,}13500 \\ 0{,}46175 & 0{,}84825 & -0{,}25934 \\ 0 & 0{,}29237 & 0{,}95630 \end{pmatrix}$$

A Talonavicular pont elmozdult helyzete ezután a forgatott pontvektor és a referenciaorigó összegeként határozható meg:

$$p'_{TN} = R\, p_{TN} + O_n.$$

A referenciaorigó figyelembevételével az elmozdult helyzet koordinátái:

$$p'_{TN} = \begin{pmatrix} -17{,}269 \\ 6{,}349 \\ 11{,}337 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -35 \\ 10 \\ 0 \end{pmatrix} = \boxed{\begin{pmatrix} -52{,}269 \\ 16{,}349 \\ 11{,}337 \end{pmatrix}}$$

értékűre adódnak.

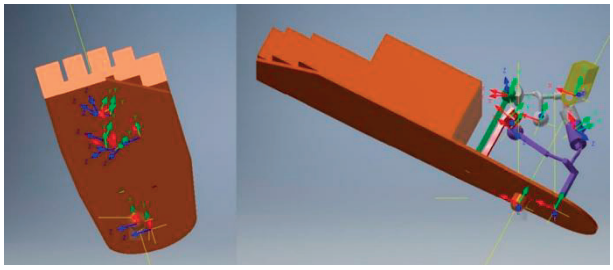
Ez alapján a Talonavicular ízületi pont stabil helyzetből történő elmozdulása koordinátánként:

$$\Delta p_{TN} = p'_{TN} - p_{TN}$$

$$= \begin{pmatrix} -52,269 - (-12,386) \\ 16,349 - 16,326 \\ 11,337 - 6,864 \end{pmatrix} = \boxed{\begin{pmatrix} -39,883 \\ 0,023 \\ 4,473 \end{pmatrix}}$$

értékű.

A számítás szemlélteti, hogy a kinematikai szerkezetben az egyes anatómiai pontok térbeli helyzete kizárólag a kiinduló koordináták és a vizsgált elfordulási szögek ismeretében meghatározható. Így egy adott mozgás – jelen esetben a dorsalflexió és az everzió együttes alkalmazása – számszerűen leképezhető, és az eredeti, valamint az elmozdult helyzet koordinátáinak összevetésével az egyes kinematikai pontok elmozdulása is meghatározható. A leírás a homogén koordináta-transzformáció alkalmazásával történt, amelynek célja a nyugalmi és a mozgás utáni helyzet közötti kapcsolat meghatározása.



6. ábra A Dorsal flexiós és Everziós elmozdulás szemléltetése

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

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálat során a boka és a lábfej főbb anatómiai és kinematikai sajátosságaira épülő egyszerűsített kinematikai szerkezetet alakítottunk ki. A modell központi eleme a Talus, amely a Talocrural, Subtalar és Talonavicular ízületi kapcsolatokat köti össze, míg a Calcaneus, Navicular és Cuboid a hozzájuk tartozó kapcsolatokon keresztül vesznek részt a mozgásban. A szerkezethez az anatómiai síkokhoz illesztett koordinátarendszert és az egyes ízületi pontokat jellemző koordinátákat rendeltünk.

A mozgásállapotok meghatározására koordináta-transzformációt alkalmaztunk, amely a kiinduló pontkoordináták és az elfordulási szögek alapján határozza meg az új térbeli helyzetet. A módszer alkalmazását 27,5° dorsalflexió és 17° everzió együttes vizsgálatával mutattuk be. A Talonavicular ízületi pont példáján keresztül meghatároztuk a stabil és az elmozdult helyzet koordinátáit, valamint az ezek közötti koordinátaváltozásokat.

Az eredmények alapján a kialakított kinematikai modell alkalmas a boka összetett mozgásának kinematikai leképezésére, valamint az anatómiai pontok helyzetváltozásának számszerű meghatározására. A módszer lehetőséget biztosít a különböző mozgásállapotok koordinátaalapú összehasonlítására, ezáltal megfelelő alapot teremthet a boka mozgásának további kinematikai elemzéséhez.

5. SUMMARY

During the study, a simplified kinematic mechanism was developed based on the main anatomical and kinematic characteristics of the ankle and foot. The central element of the model is the Talus, which connects the Talocrural, Subtalar, and Talonavicular joints, while the Calcaneus, Navicular, and Cuboid participate in the motion through their respective joint connections. A coordinate system aligned with the anatomical planes was assigned to the mechanism, together with coordinates characterizing the individual joint points.

To determine the different motion states, coordinate transformation was applied to determine the new spatial position based on the initial point coordinates and the rotation angles. The method was demonstrated by considering a combined 27.5° dorsiflexion and 17° eversion. Using the Talonavicular joint point as an example, the coordinates of the stable and displaced positions, as well as the coordinate changes between these positions, were determined.

The results demonstrate that the developed kinematic model is suitable for the kinematic representation of complex ankle motion and for the quantitative determination of changes in the positions of anatomical points. The method enables coordinate-based comparison of different motion states and thus provides an appropriate basis for further kinematic analysis of ankle motion.

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 Ankle

[3] https://anatomylearning.com/webgl2021v1/browser.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/

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.14

MI TÁMOGATOTT VIZUÁLIS KONCEPCIÓTERVEZÉS EGY HÁZTARTÁSI GOMBATERMESZTŐ RENDSZER FEJLESZTÉSÉN KERESZTÜL

AI-SUPPORTED VISUAL CONCEPT DESIGN THROUGH THE DEVELOPMENT OF A HOUSEHOLD MUSHROOM GROWING SYSTEM

Kovách Katalin, Dr. Gotthard Viktor***

ABSTRACT

A cikk azt vizsgálja, hogyan integrálható a mesterséges intelligencia az ipari terméktervezés koncepcionális szakaszába. A vizsgálat tárgya egy moduláris, beltéri gomba-termesztő termékcsalád fejlesztése. A munka áttekinti az AI-módszerek tervezési alkalmazásait, majd bemutatja egy sketch-alapú, generatív vizuális workflow-t és az AI-támogatott kezdeti 3D-modellezést. Ismerteti három termékcsalád-koncepció kialakítását és részletesebben az otthoni gombatermesztő berendezés végleges koncepcióját is.

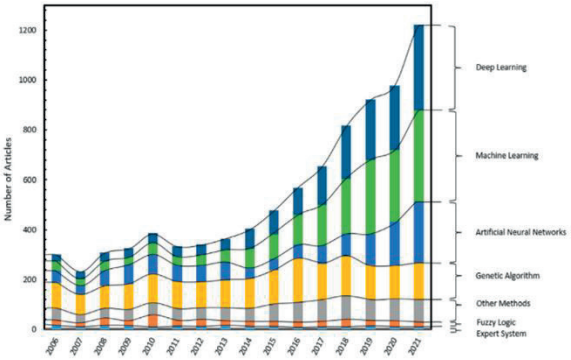
A tapasztalatok szerint az AI a koncepcióalkotás során jelentősen gyorsítja az iterációt. A kézi vázlat, mint strukturális referencia és a rövid, célzott prompt kombinációja adta a legmegbízhatóbb eredményt. Az AI-kimenetek ugyanakkor nem helyettesítik a mérnöki validációt és a parametrikus CAD-modellezést.

1. BEVEZETÉS

Az élelmiszer-előállítás decentralizálása, lokalizálása és kontrollálhatósága iránti igény az utóbbi években jelentősen nőtt. Ezzel párhuzamosan a mesterséges intelligencia (MI) soha nem látott eszköztárat kínál a termékfejlesztéshez. A jelen munka egy olyan beltéri moduláris gombatermesztő rendszer koncepcionális és műszaki megalapozását tűzi ki célul, amely a lakossági, kereskedelmi és ipari igényekhez egyaránt adaptálható lehet. Eközben tudatosan vizsgálja, hogyan alakíthatja át az MI-alapú módszertan a jövő terméktervezési gyakorlatát a hagyományos módszertanhoz [1] képest.

2. MI-TÁMOGATOTT TERVEZÉS: ELMÉLETI HÁTTÉR ÉS ESZKÖZÖK

Az MI a termékfejlesztésben elsősorban három célt tud hatékonyan támogatni: optimalizálás, javítás és előjelzés. Az MI-vel támogatott tervezés relevanciája évről évre nő. A tervezési alkalmazásokban használt MI-módszerekről szóló publikációk száma 2006. és 2021. között folyamatosan emelkedett, a machine learning és a deep learning egyre nagyobb részesedésével, ahogy ez a 1. ábrán [2] is látszik.



1. ábra: Design alkalmazásokban használt MI módszerekről megjelent publikációk száma 2006-2021 között

A gépi tanulás (Machine learning = ML) három fő kategóriába sorolható: felügyelt, felügyelet nélküli és megerősítéses tanulás. Feladattípusai szerint regresszióra és klasszifikációra oszlik. Az ipari ML-alkalmazások közel 70%-a felügyelt tanulásra épül, és főként a minőség-ellenőrzés, a prediktív karbantartás és a folyamatoptimalizálás területén hasznos.

Az AI jelentősen csökkenti a fejlesztési időt és költséget, miközben növeli a pontosságot és a megbízhatóságot. Ugyanakkor kihívás marad az algoritmusok átláthatósága, a modellek validálása és az etikai kérdések kezelése. Modell validálás nélkül AI-eredmény nem biztonságos. [3]

Az MI sok esetben közvetlenül beépül a CAD/szimulációs szoftverbe, és természetes nyelven vezérelhető, workflow-kat automatizál, miközben javaslatokat ad és szakértői tudást tárol.

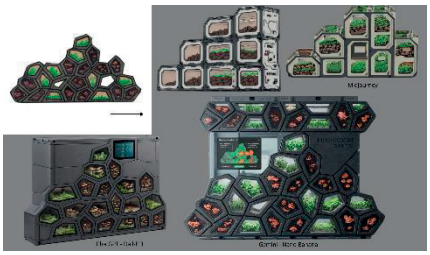
Ennek - többek között - nagy előnye, hogy a szoftverhasználattal töltött idő a tanulási ráta szerint csökken. A szakértői tudás nem vész el, a tervező a kreatív munkára fókuszálhat, nem a menük navigálására.[4]

Az AIGC (Artificial Intelligence-Generated Content) olyan digitális tartalom, amelyet mesterséges intelligencia generál minimális emberi beavatkozással. Ezek közül néhány bemutatásra kerül a tervezési folyamat leírásában. Az AIGC a teljes terméktervezési folyamatba integrálható. [5]

** demonstrátor, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék*
*** adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék*

3. ÖTLETRAJZOK ÉS GYORS LÁTVÁNYTERV-ALKOTÁS GENERATÍV MI-VEL

A koncepciófázisban a cél a minél több lehetséges irány gyors feltérképezése. A generálás mindig sajátkezű ötletrajzokra épült. Az MI vizualizációs gyorsítóként szolgált, és nem önálló tervezőeszközként. A szerzők tapasztalata szerint egy részletes markerrajz vagy prezentációs sketch 20–30 percet vehet igénybe. Az alkalmazott módszernél elegendő volt egy 3–5 perc alatt készült vázlat és egy strukturált prompt ahhoz, hogy pár percen belül fotórealisztikus látványterv jöjjön létre.

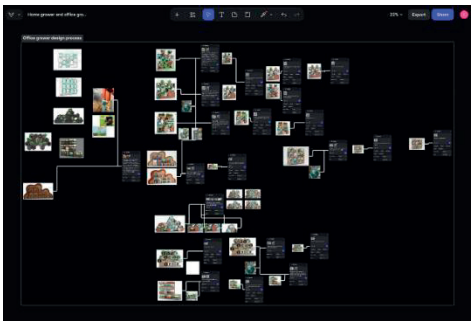


2.ábra: Ötletrajzok és gyors látványtervek

A workflow az image-to-image és a text-to-image módszerek kombinációjára épült.
A tesztelt eszközök közül a Gemini (Nano Banana), a ChatGPT (DALL·E 3) és a Midjourney adta a látványtervek döntő részét. Ezek esetében a kiindulás és a látványterv a 2. ábrán látható. (a fehér háttéren a kézi rajz, a szürke háttéren a generált látványtervek láthatók).

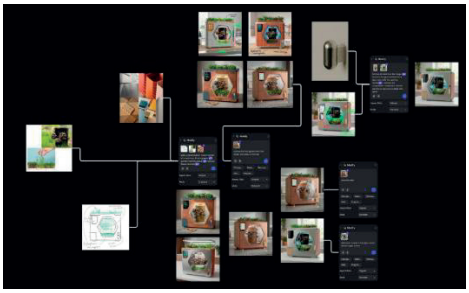
4. IPARI KONCEPCIÓTERVEZŐ RENDSZER ALKALMAZÁSA

Vannak olyan kifejezetten ipari formatervezési workflow-khoz készült platformok (mint a Vizcom, Meshy, Comfy, Krea AI stb.), amelyek a skicceket, rajzokat vagy tömegvázlatokat neurális hálózatok segítségével koherens látványtervekké alakítják.



3. ábra: Irodai gombatermesztő látványterv workflow részlet

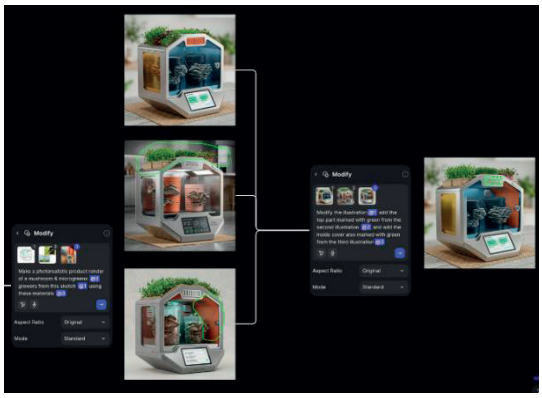
Ezek AI-orchestrációs rendszerekhez állnak közelebb, mint az általános célú képgenerátorhoz. Ez magyarázza, hogy az ipari feladaton jobban teljesítenek, mint a chatbotok képgenerátorai.



4. ábra: Referenciák beillesztése

A tervezés során használt felület (Vizcom) központi eleme egy végtelen, node/board-alapú canvas, amelyen a skiccek, a renderverziók és a variációk egymás mellett követhetők. A prompt mezőkben megadható a szöveges utasítás, a renderelési stílus, az anyagkarakter és a realizmus szintje. A reference image panelen inspirációs képek, anyagminták és CMF-referenciák tölthetők fel (4. ábra), amelyeket a rendszer embeddingekké (valamilyen adatot számok sorozatává, azaz egy vektorrá) alakít.

Ez a vektor egy sokténye zős “térben” jelöli ki az adat helyét, és úgy van kialakítva, hogy a hasonló jelentésű dolgok egymáshoz közel kerüljenek, majd összeveti azt a skicc geometriájával. Nagy előnye még a rendszernek, hogy kis módosítások esetén nem kell újra generáltatni az egész koncepciót, elég csak a módosítani kívánt régiót kijelölni és azt szerkeszteni, ahogy az a következő ábrán látható.



5.ábra: Region-based editing

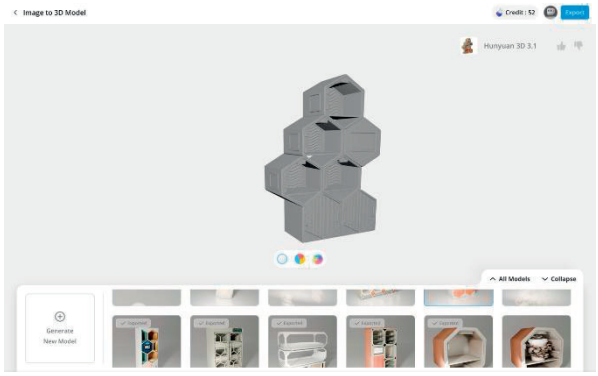
Az ilyen jellegű MI tervező programok értéke ezért a korai koncepcióvalidációban, a vizuális kommunikációban és a formai iterációban rejlik. A szerző tapasztalata szerint a sketch → render → CAD preview → prezentáció folyamat, amely hagyományosan napokat vagy heteket igényelt, néhány óra alatt végigiterálható.

5. MI-TÁMOGATOTT KEZDETI 3D-MODELLEZÉS

A kezdetleges tömegmodellek és a gyors volumetrikus reprezentációk létrehozásához a Bambu Lab által fejlesztett, felhőalapú Bambu Studio által elérhető

MakerLab image-to-3D rendszer került alkalmazásra. Az image-to-3D eljárás alulhatározott probléma, mivel a 2D-s kép nem hordozza a mélységi információt, így egyetlen képhez végtelen sok 3D geometria tartozhat. A NeRDi keretrendszer [6] egyetlen képből, 3D felügyeleti adat nélkül állít elő neurális sugárzási teret (NeRF). Ehhez nagy adathalmazon előtanított diffúziós modellt használ, amely a nem látott nézőpontokból renderelt képek realizmusát biztosítja.

„*Az emberek a 3D világról a mindennapi megfigyeléseik során szereznek tudást, és kialakítanak egy általános józan érzéket arról, hogyan nézzenek ki a dolgok, és hogyan ne.*" Ezt szimulálják nagy adathalmazon előtanított diffúziós modellekkel. A rendszer egy NeRF (Neural Radiance Field) neurális hálózatot optimalizál, amely minden térbeli ponthoz színt és sűrűségértéket rendel, és ez alapján bármely kameraállásból képes képet renderelni. [6]



6. ábra: Image-to-3D output

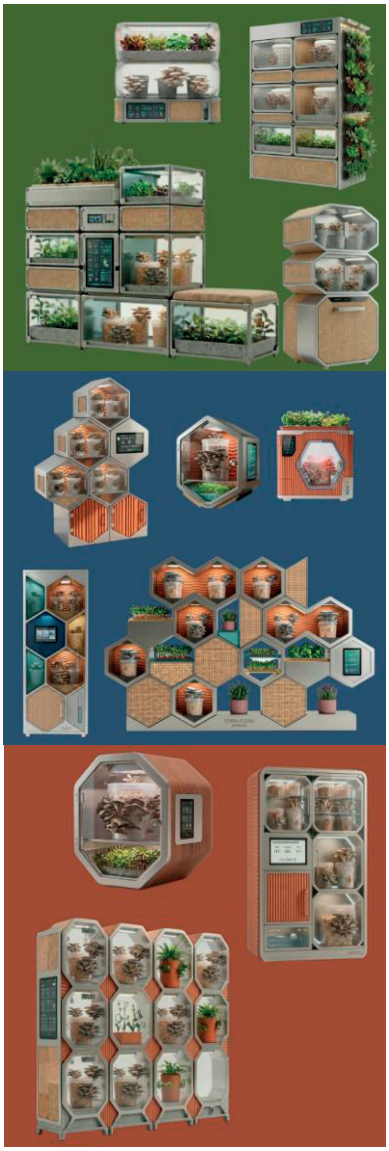
Az így kapott mesh még nem alkalmas gyártási célú CAD-felhasználásra, az arányok, a tömegkapcsolatok és a formai struktúra gyors vizsgálatához viszont megfelelő alapot nyújtanak.

6. HÁZTARTÁSI GOMBATERMESZTŐ GÉP

A háztartási gombatermesztő gép a kutatás gyakorlati alkalmazási területe, ahol az MI-vel támogatott tervezési munkafolyamatot egy valós termékfejlesztési feladaton próbáltuk ki.

6.1 Koncepciók: három termékcsalád

Három, eltérő formavilágú és felhasználási logikájú termékcsalád-koncepció készült. Közös elemük a moduláris gondolkodás, a skálázhatóság és a transzparens működés. A koncepciók azt mutatták, hogy a rendszer nem csak technológiai termékként, hanem belsőépítészeti és edukációs elemként is értelmezhető. Az Urban Farming, a Hexagon és az Octagon termékcsalád elemei a 7. ábrán láthatóak.



7. ábra: Az Urban Farming, a Hexagon és az Octagon termékcsalád elemei

6.2 Letisztázás: a koncepciók módosítása

A végső formai és vizuális irány a megbízóval folytatott egyeztetések alapján alakult ki. A módosításokat funkcionális, műszaki és gazdasági szempontok indokolták legfőképp a termékcsalád irodai beltéri moduláris gombatermesztő szekrény eleménél (Oktagon evolúciója a 8. ábrán látható).

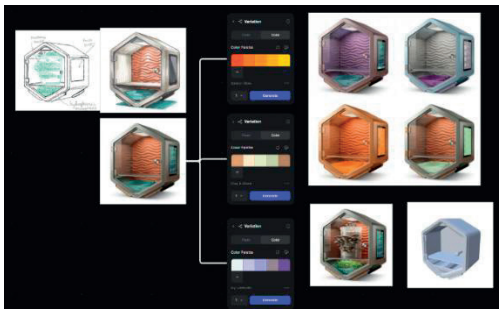


8. ábra: Octagon termékcsalád irodai látvány-gombafarm evolúciója

A módosító szempontok közé tartozik a gombák helyigénye, falvastagság növelése és a kevesebb, de nagyobb modulra való igény költséghatékonysági szempontból.

6.3 Fő design: az otthoni gombatermesztő végleges koncepciója

Az otthoni berendezés a termékcsalád legkisebb eleme, egy jól lehatárolható rendszer, és a koncepció tervezés folyamata végig vezethető rajta. Ezt illusztrálja egy iterációt bemutató részlet a tervezésből a 9. ábrán.



9. ábra: Beltéri otthoni gombatermesztő iterációs folyamatábrájának részlete

Alapját a Hexagon termékcsalád egyik eleme adta, amely kombinálva lett az Urban Farming termékcsalád formai és funkcionális megoldásaival. A Hexagon koncepció a hatszög alapú moduláris struktúrára épül. A forma természetes sejtszerkezeteket idéz, miközben kortárs design-bútor jelleggel rendelkezik. A rendszer célja egy erősen vizuális, rugalmasan konfigurálható beltéri termesztőrendszer létrehozása volt. Az Urban Farming koncepció egyszerre alkalmas gombatermesztésre, microgreen nevelésre és növénytárolásra.

A letisztázott koncepció közös formanyelv és a transzparens működés révén illeszkedik a nagyobb, irodai és kereskedelmi léptékű változatokhoz. Könnyen átlátható működésű és formavilága beleillik a klasszikus konyhai környezetbe.



10. ábra: Letisztázott beltéri otthoni gombatermesztő koncepciója

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Összegzésként elmondható, hogy az MI vizualizációs gyorsítóként működik jól. A legmegbízhatóbb eredményt a kézi vázlat, mint strukturális referencia és a rövid, célzott prompt együttese adja. Az ipari alkalmazásokra specializációdott szoftverek node-alapú canvas, referenciakezelés és a region-based editing funkciókkal jobban támogatták az iterációt, mint az általános, ezeket a funkciókat nélkülöző képgenerátorok.

A kimenetek ugyanakkor nem gyártásra kész adatok. Az MI által generált látványtervek és 3D-hálók nem tartalmaznak valós méreteket, és funkcióvesztett geometriákat is tartalmazhatnak. A mérnöki validáció, a parametrikus CAD és a prototipizálás ilyen jellegű szoftverrel nem kiváltható.

8. SUMMARY

In summary, AI works well as a visualization accelerator. The most reliable results come from combining a hand-drawn sketch as a structural reference with a short, targeted prompt. Software specialized for industrial applications, with a node-based canvas, reference management and region-based editing, supported iteration better than general-purpose image generators that lack these features. The outputs are not manufacturing-ready data. AI-generated concept renderings and 3D meshes do not contain real dimensions and may include geometries that have lost their function. Engineering validation, parametric CAD and prototyping cannot be replaced by this type of software.

9. IRODALOM

[1] SZEGHŐ, K.: A tervezési folyamat támogatásának újabb lehetőségei, GÉP 0016-8572 3057-9473 56 (11-12) pp. 157-160 (2005)

[2] YÜKSEL, Nurullah és mtsai., 2023. Review of artificial intelligence applications in engineering design perspective. Engineering Applications of Artificial Intelligence. február 2023. Vol. 118, o. 105697. DOI 10.1016/j.engappai.2022.105697

[3] ELENA, Moskicheva. *Integration of Artificial Intelligence in Industrial Design: From Generative Models to Intelligent Automation*

[4] HODGES, Justin, 2025. AI Enables Data-Driven Product Design. NaN. 2025. Sz. s1, o. 66–69. DOI 10.1515/zwf-2025-0004.

[5] SHI, Yuxuan, ZHOU, Yue és RASALINGAM, Rasslenda Rass, 2025. Innovation and Challenges in Product Design Paradigms Based on Artificial Intelligence-Generated Content (AIGC): A Review. PaperASIA. 28 augusztus 2025. Vol. 41, sz. 4b, o. 380–392. DOI 10.59953/paperasia.v41i4b.603.

[6] DENG, Congyue és mtsai., 2022. NeRDi: Single-View NeRF Synthesis with Language-Guided Diffusion as General Image Priors. arXiv. DOI 10.48550/ARXIV.2212.03267.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.15

MÓDSZER FELTÁRÁS NÉLKÜLI CSŐBÉLELÉS ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATÁRA

METHOD TO CHECK THE APPLICABILITY OF NO-DIG PIPE INSERTS

Dr. Lovas László[*], *Dr. Égető Csaba*[**]

ABSTRACT

Changing a pipe system in the soil is a complicated job. Either all the pipes have to be removed from the soil or a new pipe can be guided inside the existing ones. To judge the second possibility, the measurement of the existing pipe is needed. Then, it must be evaluated where to remove the pipe portion from the soil and where to just pull in a new into the old. This paper deals with algorithms allowing to differentiate the pipe portions, and to decide where to open the pipe system.

1. BEVEZETÉS

A talajban futó csővezetékek az infrastruktúra fontos részei. Folyamatos karbantartásuk, fejlesztésük elsőrendű feladat. A csövek a talaj mozgása, a szállított közeg hatása, illetve saját anyaguk fáradása miatt időközönként cserére szorulnak. A csővezeték cseréje általában jelentős földmunkákkal járó, költséges folyamat, különösen városi környezetben.

A költségek csökkentésére több módszert dolgoztak ki [1]. A közös ezekben, hogy a csővezeték belsejében, földmunkát minimálisan igényelve végezhetők. A három fő módszer a cső pneumatikus bélelése, a cső spirálcsöves bélelése, illetve kisebb keresztmetszetű csővezeték elemek behúzása a meglevő rendszerbe.

Pneumatikus bélelés esetén rugalmas műanyag csövet juttatnak be a régi cső belsejébe, majd felfújják, a meglevő csőfalra tapasztják és kikeményítik.

A spirálcsöves bélelést nagy átmérőjű csövek esetén használják. A cső a spirálvarrott acélcsövekhez hasonlóan speciális profilszalag felcsévélésével jön létre. Az acélcső hegesztési varrata helyett a műanyag profilszalag alakzáró kötéssel pattan össze. Ha a régi cső nem kör keresztmetszetű, akkor speciális gyantával töltik ki a spirálcső és a régi cső közötti térfogatot. Így az új cső mechanikailag teherbíró lesz.

Kisebb keresztmetszetű csővezeték behúzása esetén egymással gömbfejes tokkal összekötött csőszakaszokból álló vonat kerül behúzásra a meglevő régebbi csőszakaszba.

2. MÓDSZER

Csővezeték behúzása esetén először vezetőkábelt húznak végig a bélelendő csőszakaszon. Ez után adott átmérőjű és hosszúságú elemekből csővonatot állítanak össze, amelyet adott ponttól kezdve behúznak a meglevő rendszer belsejébe. A kezdőpont olyan pont, amely esetén a cső adott hosszban fel van tárva, azaz ki van bontva a földből. A csővonat a béléscső külső átmérőjére erősített görgőkön gurul a régi cső belsejében. Egy béléscsövet két ponton támasztanak meg görgőkkel. Ennek okán a béléscsövek korlátozott módon el tudnak fordulni a régi cső pillanatnyi helyzetéhez képest. Erre szükség is van, mert a béléscsövek mérete és a régi cső mérete (átmérő és hossz) jellemzően nem egyezik. A görgős megtámasztás miatt a béléscső tengelye jó közelítéssel a régi cső tengelyvonalán mozog.



1. ábra: Csővonat behúzás előkészítése

A módszer előnye, hogy kevés földmunka kell hozzá. Hátránya, hogy a meglevő csővezeték geometriáját nagyon pontosan kell ismerni. A csővonat elemei korlátozott szögben képesek elfordulni egymáshoz képest, így előre el kell tudni dönteni, mely vezeték részek alkalmasak adott csővonat behúzására, és mely részeket kell kibontani a földből a béleléshez.

Ehhez első lépésben fel kell mérni a meglévő csőszakaszt. A csőszakaszt először alkalmassá teszik a belső felmérésre, például leürítik, továbbá ott, ahol erre lehetőség nyílik, átszellőztetik, stb. Ilyen környezet veszélyes munkatérnek és ezáltal az ott végzett munka

* *egyetemi docens, Budapesti Műszaki Egyetem, Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék*
** *egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki Egyetem, Általános és Felsőgeodézia Tanszék*

beszállásos munkavégzésnek minősül. Legtöbb esetben számítani kell veszélyes gázokra, mikroorganizmusokra. Ennek megfelelően szigorú munkavédelmi előírások betartásával, külső biztosítás mellett kell/lehet elvégezni a felmérést.



2. ábra: Egy csőszakasz keresztszelvényének mérése

A csőszakasz elemekből épül fel. A felmérés során minden csőelem elején és végén – egy-egy keresztszelvényben - minimum 8 db belső palástpont 3D helyzetét határozzuk meg egy, a teljes felmérendő területre érvényes egységes koordinátarendszerben (lásd *2. ábra*).

A mérések feldolgozásakor minden szelvényben kiszámítjuk a mért keresztszelvényben a részletpontokra illeszkedő regressziós kör sugarát és koordinátáit, valamint megadjuk az egyes keresztszelvények szelvényszámát is (*1. táblázat*).

Ezzel létrejön az az adatsor, ami a további munka alapja.

1. táblázat Mérési adatok

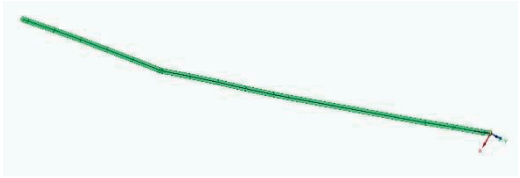
M1 - a mért keresztmetszetekben a vízvezeték tengelypontjai

	keresztm.-ben csőtengely koordináták				keresztm.-ben Folyásfenék mag. [m B.f.]
Szelvény	Y_{EOV} [m]	X_{EOV} [m]	M_{Balti} [m]	Belső sugár [m]	
0+000.00	656266.658	237578.533	117.363		
0+001.26	656265.493	237578.990	117.233	0.377	116.857
0+001.44	656265.317	237579.038	117.237	0.408	116.829
0+001.83	656264.946	237579.143	117.240	0.409	116.831
0+001.97	656264.811	237579.179	117.238	0.407	116.831
0+007.37	656259.602	237580.635	117.221	0.409	116.812
0+007.50	656259.483	237580.669	117.221	0.406	116.816
0+012.89	656254.309	237582.198	117.205	0.408	116.797
0+013.03	656254.178	237582.236	117.200	0.410	116.791
0+017.03	656250.342	237583.342	117.016	0.411	116.605

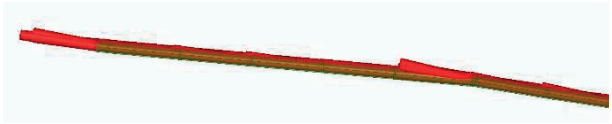
2.1 A cső modellezése

A csővezeték behúzás előkészítéséhez modellt kell készíteni a felmért vezetékről. A valós vezeték helyzetét a talaj mozgása és a vezeték öregedése egyaránt befolyásolja. A modellezés első lépése a vezeték tengelyének kiszámítása, amelyet a szelvényenként meghatározott kiegyenlítő körök középpontjainak vonallánca. A tengelypontok tört vonalat alkotnak a térben.

A tengelypontok megléte után két úton indulhatunk el a modellezéssel. Az egyik lehetséges eset az, hogy CAD szoftverben 3D modellezéssel felépítjük az egyes vezeték elemekből a valós vezetékszakaszt (*3. ábra*). Ennek a szakasznak a tengelye mentén lépésről lépésre beküldjük a béléscsövet. Az egyes béléscső helyzeteket megvizsgálva közvetlenül látható, hogy a béléscső belefér a meglevő keresztmetszetbe, vagy nem. Vizsgálható az is, hogy az egyes béléscső pozíciók között a szögeltérés lehetővé teszi a béléscső behúzást, vagy sem. Ezeket a megengedett szögeltéréseket az adott nyomásszinthez megadja a gyártó. Fontos részlet a behúzandó betétcsőre vonatkozóan az, hogy a betétcső külső átmérője – szemben a belső átmérőjével – nem állandó a tokos kapcsolat miatt. A toknál az egyes csőelemek külső átmérője kiszélesedik, hogy a következő elemet fogadni tudja és így tovább. Ez a fajta modellezés lassú, munkaigényes, mind a felépítés, mind az eredmény kinyerés tekintetében.



3. ábra: Csőszakasz CAD modellje

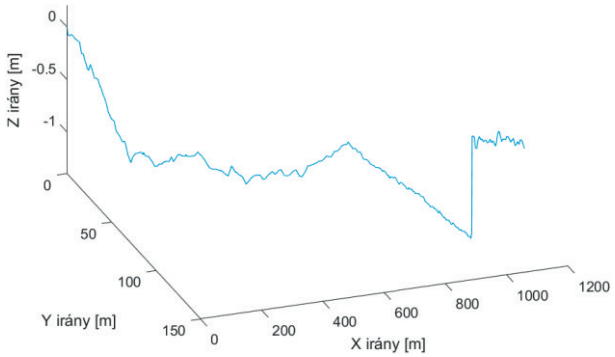


4. ábra: Csőszakasz és behúzott betétcső CAD modellje

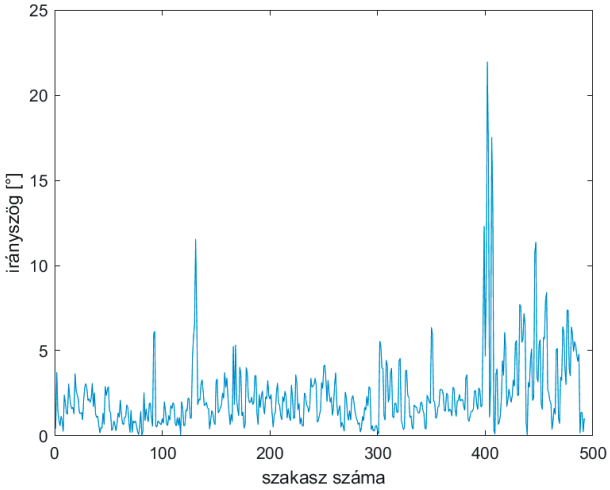
A ***3***. ábra mutatja, hogy hogy néz ki a talajban fekvő felmért csőszakasz. A ***4***. ábra mutatja, hogy a lépésről lépésre behúzott betétcső nem fér el az eredeti csőben. Ezen felül az is látszik, hogy a relatív csőhelyzetek szögének kinyerése hosszadalmas munkát igényel.

A fentiek alapján szükséges egy olyan algoritmus kifejlesztése, amely hosszadalmas CAD modellezés nélkül adja a szükséges adatokat. Az algoritmust Matlab környezetben, mesterséges intelligencia segítségével készítettük el.

A behúzhatóság vizsgálatához a kiindulási alapot a meglevő vezetéken végzett fent leírt geometriai mérések és azokból levezetett tengelypont koordináták, valamint csőátmérő adatok szolgáltatják. (3. *ábra*). Egy mért szakasz középvonala az 5. ábrán látható.



5. ábra: Cső középvonala



6. ábra: Csőszakaszok iránytörése

Vizsgálni lehet a mért szakasz-hosszakat, valamint az iránytöréseket az egyes elemek között (*6. ábra*). A következő lépés az alkalmazandó betétcső paramétereinek vizsgálata. A behúzandó betétcsövek külső átmérője kisebb, mint a meglevő cső belső átmérője, figyelemmel a korábban tett kiegészítésre a tokos kialakítás miatt Ez a különbség megbízótól függően kb. 50 mm-től 100 mm feletti értékig változhat. A behúzandó csővonat egyes elemei adott szögtartományban képesek elfordulni egymáshoz képest. A behúzandó csővonat egyes elemeinek hossza és az elemek között megengedett maximális elfordulási szög egyértelműen megmondja, hogy az adott mért szakaszon a behúzás lehetséges-e.

A 6. ábrából látszik, hogy a 90-110, 120-140 és 400-420 elemek közötti csőszakaszoknál a törésszög miatt biztos fel kell tárni a talajt.

A valós folyamat modellezésére a következő matematikai modell szolgál. Tekintsünk két, egymáshoz rögzített betétcsövet, amelyek végpontjaikkal a mért cső középvonalán haladnak. A csőközépvonal tört vonal, ezért megesik, hogy iránytöréskor a végpontok közötti betétcső rész elhagyja a középvonalat. Az egyenes szakaszokon és iránytöréseken egyaránt jó vizsgálati módszer, hogy a betétcső szakasz lehetséges végpontjait gömbfelület írja le. A gömbfelület középpontja a csuklópont a két betétcső között. A gömbfelület középpontját a tört vonalon végig mozgatva a felület és a vonal metszéspontjai kiadják az adott cső végpontokat. A végpontot vizsgáló egyenlet az alábbi:

$$|\overrightarrow{r_0} - \overrightarrow{r_i}| - r_{gömb} < \varepsilon \qquad (1)$$

Itt $\overrightarrow{r_0}$ a vizsgáló helyzet irányvektora a csőhossz adott pontjában, $\overrightarrow{r_i}$ a csőhosszon végigfutó pont irányvektora, $r_{gömb}$ pedig a vizsgáló gömb sugara. Ez a sugár értelemszerűen a betétcső hosszával egyenlő. Az ε érték elméletileg nulla, a gyakorlatban pedig egy megfelelően kis érték ahhoz, hogy az algoritmus sikeresen lefusson.

A cső középvonal elején egyetlen gömbsugárral kezdjük a vizsgálatot, majd ahogy tovább lépünk a középvonal mentén, és a második betétcső is bevonódik, két sugarat kapunk. A két sugár, azaz a behúzandó csővonat két eleme között az iránytörés korlátos értékig megengedett, ezért ezt is figyelembe kell venni. Az iránytörés szögét az alábbi egyenlet mutatja:

$$\alpha = acos\left(\frac{\overrightarrow{r_{sugár1}} \cdot \overrightarrow{r_{sugár2}}}{|\overrightarrow{r_{sugár1}}| \cdot |\overrightarrow{r_{sugár2}}|}\right) \qquad (2)$$

További egyszerűsítés a modellben, hogy a betétcső mozgást leképező sugarak egy vizsgálócsőben futnak. Ennek a csőnek az átmérője a betétcső külső átmérőjének és az eredeti cső átmérőjének a különbsége, ez a rendelkezésre álló szabad hely. Ismert, hogy az eredeti cső mérete a talajban pontról pontra változik, és idővel jellemzően kicsit növekedik. Ezt a változás a modell figyelmen kívül hagyja, és az eredeti névleges csőmérettel számol. Ezzel a biztonság felé tévedünk a behúzás szempontjából.

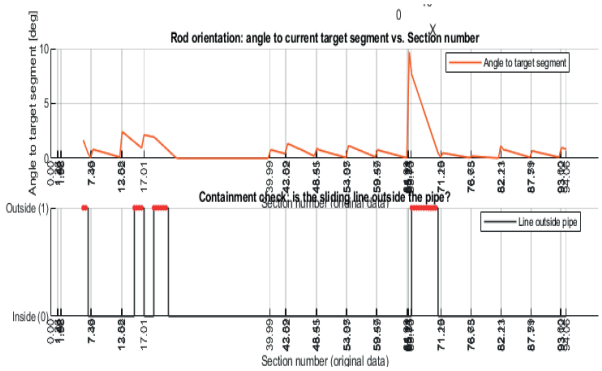
2.2 Az algoritmus változatok

A folyamathoz kétféle algoritmust készítettünk. Az egyik esetben a CAD modellezéshez hasonlóan a csővonat az eredeti cső középvonalán halad. Ez konzervatívabb becslést ad, és megfelelő első közelítésnek. Az eredményeket a 7. *ábra* mutatja.

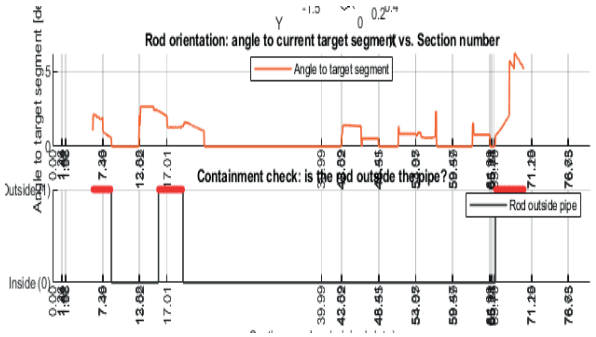
Itt a felső ábra mutatja az irányszög változást az 1. ábrán mutatott csőszakasz esetén. Jól látszik, hogy a 63-71 m közötti hossztartományban nagy az iránytörés, biztos bontani kell a talajt. Az alsó ábra azt mutatja, hány helyen lép ki a betétcső a mozgás során az eredeti cső kontúrjából. Itt négy szakasz látszik.

A másik algoritmus azt mutatja, amikor a csővonat az eredeti cső alján csúszik befele. Ez az aktuális valós

helyzet. Ez egy olcsóbb módszer, ezt azokban az esetekben szoktál alkalmazni, ahol várhatóan az eredeti cső belső átmérője és a betétcső külső átmérője között – jellemzően a tokos kiképzésre a tok átmérője a legnagyobb - nagyon kevés hely marad (pl. néhány cm!) Az eredményeket a 8. ábra mutatja.



7. ábra: Eredmény a cső középvonalán futó csővonat esetén



8. ábra: Eredmény a cső alján futó csővonat esetén

A kétféle algoritmust összehasonlítva jól látszik, hogy a cső alján futó csővonat nagyobb szabadsággal, kisebb iránytöréssel fut: kisebb az iránytörés csúcsértéke. Az is látszik, hogy az eltérő algoritmus miatt megakad a 70, méter körül, és nem megy tovább. Eltérés még, hogy kevesebb az eredeti csőből kibújás mértéke. További eltérés, hogy a cső alján mozgás a több variációs lehetőség miatt sokkal lassabban, mintegy kétszer annyi idő alatt fut le.

3. A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA HASZNÁLATÁNAK TAPASZTALATAI

A mesterséges intelligencia (AI) napjainkban rohamosan fejlődik. Szövegszerkesztésben, szövegalkotásban és elemzésben már megbízható, jó alapot ad a további munkához. A mostani programozási feladatból az látszik, hogy adott programnyelvben adott feladatot is rendben meg tud oldani. Az alkalmazás sajátossága, hogy szövegesen kell megadni neki azt, hogy mit szeretnénk, majd folyamatosan, iteratív módon lehet bővíteni az egyes funkciókat. Az AI képes arra, hogy a kész kódot megadott adatokkal leteszteli, és szükség esetén javítja. Ha több megoldás lehetséges, felajánlja a választási lehetőségeket és várja a felhasználó döntését.
Ugyanakkor a mesterséges intelligencia nem tervezhető időt igényel a gondolkodásra. Ez az időszak néha meghaladja az adott munkafolyamatra szánt időegységet, így az AI folyamatos felügyeletre, interakcióra szorul. Az adott kódokat mintegy két hét alatt sikerült elkészíttetni. Ebből az idő nagy része az algoritmus programozása és hibajavítása volt. A felhasználói interfész és annak kezelése nagyon gyorsan és jó minőségben készült el.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk egy talajban elhelyezett csőszakasz felújításának lehetőségét vizsgálta betétcső behúzás módszerével. Ehhez először mérésre kerültek az eredeti csőszakasz valós koordinátái. Ez után két algoritmus változatot készült a behúzott csővonat mozgásának vizsgálatára. A cső középvonalán futó betétcső számítása gyors. A cső fenekén futó betétcső számítása lassú, azonban nagyobb mozgásszabadsággal rendelkezik. A magyarországi csővezeték hálózat állapotát ismerve a szoftverrel jelentős költség megtakarítás érhető el, hiszen a szükséges minimumra csökkenthető a jelentős talajmunkával járó csőszakasz feltárás.

5. SUMMARY

The paper deals with the overhaul of a pipeline section in the ground using the liner insertion method. Firstly, the actual coordinates of the original pipe section were measured. Then, two algorithm variants were developed to analyze the movement of the inserted pipe train. Calculating the liner running along the centerline of the pipe is quick.. Calculating the liner running along the bottom of the pipe is slow, but it allows for greater freedom of movement. Given the condition of the pipeline network in Hungary, the software can yield significant cost savings, as it allows the excavation of pipe sections involving substantial earthwork to be reduced to the absolute minimum.

6. NYILATKOZAT

A cikkben említett programkódok mesterséges intelligencia segítségével készültek.

7. IRODALOM

[1] Dr. Égető Csaba: Ivóvíz főnyomóvezeték geometriai felmérése belülről. Konferencia előadás, 18. Műszaki Térinformatikai Konferencia, 2024. https://gita.hu/e2024/

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.16

3D NYOMTATOTT 0,3 MM MODULÚ MŰANYAG FOGASKEREKEK PONTOSSÁGA

ACCURACY OF 3D PRINTED PLASTIC GEARS WITH A 0.3 MM MODULE

*Dr. Marada Imre**

ABSTRACT

Small plastic gears can be found in almost every sector of industry. These are gears with a module of not larger than 0.5 mm and made from some form of polymer. In my previous research, I studied small plastic gears as the subject of my PhD thesis. In that research, I established that the faults on small plastic gears can be detected by examining the recirculation torque. To this end, I used SLA 3D printing to produce gears with both faultless and faulty teeth. In my PhD thesis, I examined the 0.5 mm module, as injection-molded gears of this size were available to me for comparison. In this article, I examined the accuracy of SLA 3D printed gears with a 0.3 mm module.

1. BEVEZETÉS

A kisméretű műanyag fogaskerekek olyan fogaskerekek, melyeknek a modulja 0,5 mm-nél nem nagyobb és polimer alapanyagból készülnek. Gyártásukat általában fröccsöntéssel szokták végezni, leggyakoribb alapanyagaik közé a poliamid és a polioximetilén tartozik. [1] [2]

Kisméretű műanyag fogaskerek szinte minden területen előfordulhatnak. Általában nem teljesítményhajtások esetében alkalmazzák őket, hanem kinematikai műveletek végrehajtásakor. A járműiparban például a visszapillantó tükrök állításánál használják ezeket. De megtalálhatóak irodai gépekben, például nyomtatókban, vagy mérőeszközökben is. [3] [4]

Korábbi kutatási tevékenységem során, a PhD értekezésemben foglalkoztam kisméretű műanyag fogaskerekekkel. Munkámban a kisméretű műanyag fogaskerekek hibáinak kimutathatóságát vizsgáltam. Megállapítottam, hogy az átforgatási nyomaték mérésével ezek a hibák kimutathatóak. Ezekhez a mérésekhez kis mennyiségben, alacsony költséggel kellett hiba nélküli és hibás fogakat tartalmazó fogaskerekeket gyártanom. Mivel a fröccsöntés csak nagy gyártási volumen mellett gazdaságos eljárás, ezért kutatásom során megvizsgáltam az egyes 3D nyomtatási eljárások pontosságát optikai mikroszkópos mérésekkel és ezeket fröccsöntött fogaskerekek pontosságával hasonlítottam össze. Mivel a fröccsöntött fogaskerekekből csak m=0,5 mm modulú, 30-as és 50-es fogszámú fogaskerekek álltak rendelkezésemre, ezért a nyomtatáshoz és az átforgatási nyomaték vizsgálatához s ilyen méretekkel rendelkező fogaskerekeket választottam. Végül a vizsgálataim bemutatták, hogy az STL (sztereolitográfia) eljárással, Phrozen Mini 8k s nyomtatóval, 0,05 mm rétegvastagság és 4 s megvilágítási idő mellett, Phrozen Rock Black Stiff alapanyag alkalmazásával az átforgatási nyomaték vizsgálatokhoz megfelelő pontosságú 0,5 mm modulú műanyag fogaskerekeket lehet gyártani. [5]

Azonban a kisméretű műanyag fogaskerekeket nem csak 0,5 mm modullal, hanem annál kisebb modulok esetén is szokták alkalmazni, ezért célomul tűztem ki, hogy megvizsgáljam, hogy ez az eljárás, ugyanezzel a nyomtatóval, paraméterekkel és alapanyaggal milyen pontosságú lesz 0,5 mm-nél kisebb modul esetén. Választásom végül a 0,3 mm modulra esett.

2. A MÉRÉSHEZ HASZNÁLT ESZKÖZÖK, PARAMÉTEREK

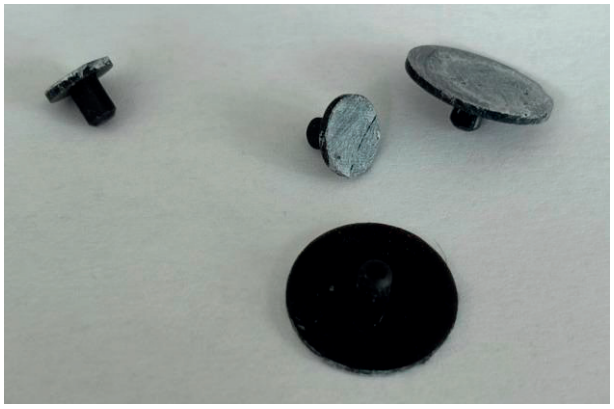
A fogaskerekek profilját KISSSoft szoftver segítségével generáltam le, majd egy Phrozen Sonic Mini 8k s nyomtatóval gyártottam le őket a Phrozen gyártó Rock Black Stiff elnevezésű fotopolimeréből. A rétegvastagság 0,05 mm, a megvilágítási idő 4 s volt. A fogaskerekek az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra A nyomtatott fogaskerekek

* *adjunktus, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet*

A mérések során optikai mikroszkópot használtam. Emellett a mérésekhez speciális mérősablonokat is gyártottam, amiket a 2. ábra mutat. A sablonokat a fogaskerekek furatába lehet egyszerűen pozícionálni, így a mérési pontok könnyen megtalálhatóak. A sablonok kétféle mérettel rendelkeztek. Az egyik méret az osztókör átmérője, a másik a lábkör átmérője volt.



2. ábra A mérési sablonok

A vizsgált paraméterek a fog alakja, a foghúrméret, az osztóhúrméret, a fogmagasság és a fejmagasság voltak.

A foghúrméret a fog két ellentétes profilján megjelenő pontok közötti távolságot jelenti, de nem ívhosszban, mint a fogvastagság, hanem ez a pontokat összekötő egyenes szakasz hossza. [6]

A szomszédos fogak egyoldali fogfelületeinek távolságát az osztókörön ívhosszban értve osztásnak nevezzük. [6]

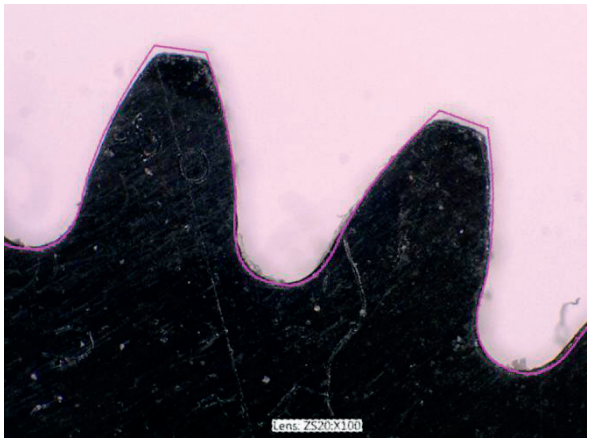
Az osztóhúrméret, az osztással szemben, az osztás méréséhez használt két pontot összekötő egyenes szakasz hossza. [5]

A fogmagasság a fog a lábkör és a fejkör közötti, a fogfelületre merőlegesen elhelyezkedő szakaszának a mérete. A fejmagasság a fogmagasságnak a fejkör és az osztókör közötti szakasza. [6]

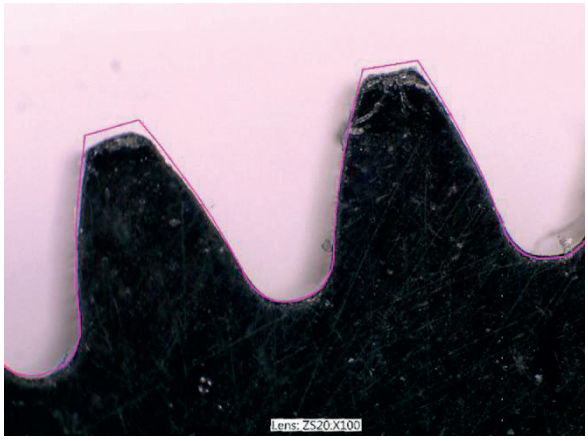
3. A KORÁBBI EREDMÉNYEK 0,5 MM MODUL ESETÉRE

A PhD értekezésemben m=0,5 mm modulú fogaskerekeket vizsgáltam. Az összehasonlítás érdekében az ezekkel a fogaskerekekkel kapott mérési eredményeimet ebben a fejezetben röviden bemutatom.

A fog alakja a 3. és 4. ábrán látható. Az ábrákon látszik a mikroszkópi kép mellett a kiindulási geometria profilja is. Összehasonlítva a generált és a nyomtatott profilt jól látszik, hogy a nyomtatott profil meglehetősen pontosan követi a kiindulási geometriát. [5]



3. ábra A z=30 fogaskerekek foga 100-szoros nagyítással [5]



4. ábra A z=50 fogaskerekek foga 100-szoros nagyítással [5]

Az 1., 2., 3. és 4. táblázatok pedig a mért legnagyobb, legkisebb és átlagos értékek eltérését mutatják a kiindulási geometriához képest.

1. táblázat A foghúrméret eltérése m=0,5 esetén [5]

Érték	z=30	z=50
Maximum	+41,75 µm (5,8%)	+35,94 µm (5%)
Átlag	+11,24 µm (1,6%)	+10,05 µm (1,4%)
Minimum	-17,36 µm (2,4%)	-10,41 µm (1,5%)

Az 1. táblázat megmutatja, hogy a legnagyobb eltérés a névleges foghúrmérethez képest 41,75 µm volt. Ez 5,8%-os eltérésnek felel meg. [5]

2. táblázat Az osztóhúrméret eltérése m=0,5 esetén [5]

Érték	z=30	z=50
Maximum	+18,73 µm (1,2%)	+19,71 µm (1,3%)
Átlag	+1,07 µm (0,1%)	+0,21 µm (0,07%)
Minimum	-14,77 µm (0,9%)	-20,96 µm (1,3%)

A 2. táblázat az osztóhúrméret eltérését mutatja. Itt a legnagyobb eltérés 20,96 µm volt, ami 1,3%-os eltérés a névleges értékhez képest. [5]

3. táblázat A fogmagasság eltérése m=0,5 esetén [5]

Érték	z=30	z=50
Maximum	+25,31 µm (2,2%)	+28,81 µm (2,6%)
Átlag	-0,49 µm (0,04%)	-0,53 µm (0,05%)
Minimum	-26,41 µm (2,3%)	-20,82 µm (1,9%)

A 3. táblázat azt mutatja, hogy a fogmagasság esetén a legnagyobb eltérés 28,81 µm volt, ami 2,6%-os különbséget jelent a kiindulási geometriához képest. [5]

4. táblázat A fejmagasság eltérése m=0,5 esetén [5]

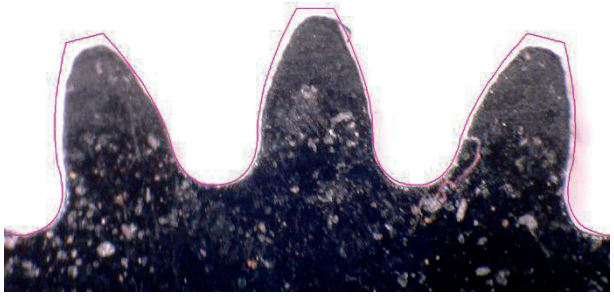
Érték	z=30	z=50
Maximum	+27,05 µm (5,4%)	+28,21 µm (5,6%)
Átlag	-0,54 µm (0,1%)	-0,3 µm (0,06%)
Minimum	-26,06 µm (5,2%)	-26,98 µm (5,4%)

Végezetül a 4. táblázat bemutatja, hogy a fejmagasság legnagyobb eltérése 28,21 µm volt, ami 5,6%-ot jelent. [5]

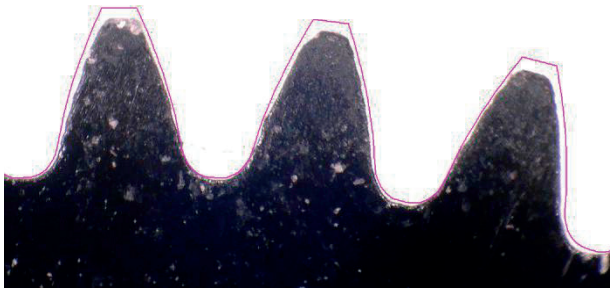
A táblázatban látható eltérések hasonlóak voltak a rendelkezésemre álló fröccsöntött fogaskerekekéivel. Ezek alapján PhD értekezésemben arra a következtetésre jutottam, hogy az így legyártott fogaskerekek megfelelő pontosságúak arra, hogy átforgatási nyomaték vizsgálatokra használjam fel őket [5].

4. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK 0,3 MM MODULRA

A 0,3 mm modulú nyomtatott fogaskerekek fogainak nagyított képét az 5. és 6. ábrák mutatják. Kétféle fogszámot választottam a vizsgálatokhoz, ezek 25 és 50 voltak. Az ábrákon most is látható a kiindulási geometria kontúrja. Az ábrákon tisztán látszik, hogy a 0,3 mm modulú fogaskerekek nem követik olyan jól a kiindulási geometria profilját, mint 0,5 mm modul esetén.



5. ábra A z=25 fogaskerekek foga 100-szoros nagyítással



6. ábra A z=50 fogaskerekek foga 100-szoros nagyítással

A kiindulási geometria foghúrméretét, osztóhúrméretét, fogmagasságát és fejmagasságát az 5. táblázat mutatja be. Ezek voltak a névleges értékek, amikhez képest a mérések eredményeit viszonyítottam a továbbiakban.

5. táblázat A kiindulási geometriai adatai

Paraméter	z=25	z=50
Foghúrméret (s')	421,466 µm	402,786 µm
Osztóhúrméret (p')	939,999 µm	941,858 µm
Fogmagasság (h)	675 µm	675 µm
Fejmagasság (h_a)	300 µm	300 µm

A 6. táblázat a foghúrméret legnagyobb, legkisebb és átlagos értékének eltérését mutatja a kiindulási geometriához képest. Bár a legnagyobb eltérés, ami 39,813 µm volt, méretében kisebb, mint a 0,5 mm modul esetén, százalékosan mégis jelentősen nagyobb a 9,88%-os hiba, mint az 5,8%-os, ami a 0,5 mm modulnál volt.

6. táblázat A foghúrméret eltérése m=0,3 esetén

Érték	z=25	z=50
Maximum	+27,769 µm (6,5%)	+39,813 µm (9,88%)
Átlag	-0,346 µm (0,08%)	+1,141 µm (0,28%)
Minimum	-23,084 µm (5,5%)	-23,537 µm (5,8%)

Az osztóhúrméret maximális, minimális és átlagos értékeinek eltérését a 7. táblázat tartalmazza. Bár a 0,3 mm modulnál mért legnagyobb eltérés kevesebb, mint 3 µm-rel volt csak nagyobb a 0,5 mm modul esetén mértnél, azonban százalékosan a hiba mértéke majdnem megduplázódott 1,3%-ról 2,5%-ra.

7. táblázat Az osztóhúrméret eltérése m=0,3 esetén

Érték	z=25	z=50
Maximum	+19,851 µm (2,1%)	+21,463 µm (2,3%)
Átlag	+0,099 µm (0,01%)	-3,592 µm (0,4%)
Minimum	-22,634 µm (2,4%)	-23,083 µm (2,5%)

A 8. táblázat a fogmagasság legnagyobb, legkisebb és átlagos értékének eltérését mutatja a névleges értékhez képest. Bár a 27,556 µm-os legnagyobb eltérés méretében kisebb, mint a 0,5 mm modul esetén mért 28,81 µm, százalékosan mégis jóval nagyobb a 4,1%-os eltérés, mint az 2,6%-os, ami a 0,5 mm modulnál volt.

8. táblázat A fogmagasság eltérése m=0,3 esetén

Érték	z=25	z=50
Maximum	+27,713 µm (4,1%)	+27,556 µm (4,1%)
Átlag	+0,539 µm (0,08%)	+0,223 µm (0,03%)
Minimum	-23,619 µm (3,5%)	-26,775 µm (4%)

AA 9. táblázat a fejmagasság maximális, minimális és átlagos értékeinek eltérését mutatja be. Bár a 0,3 mm modulnál mért legnagyobb eltérés, ami 26,27 µm volt, kisebb, mint a 0,5 mm modul esetén mért 28,21 µm, azonban százalékosan a hiba mértéke jelentősen megnőtt 5,6%-ról 8,8%-ra.

9. táblázat A fejmagasság eltérése m=0,3 esetén

Érték	z=25	z=50
Maximum	+26,27 µm (8,8%)	+26,27 µm (8,8%)
Átlag	+0,461 µm (0,15%)	+0,285 µm (0,1%)
Minimum	-22,539 µm (7,5%)	-25,072 µm (8,4%)

A mért értékeket figyelembe véve kijelenthető, hogy az eltérések µm-ben nagyságrendileg ugyanakkorák voltak, mint a 0,5 mm modul esetében. Ugyanakkor a 0,3 mm modul esetén a névleges értékek jelentősen kisebbek, mint a 0,5 mm modulnál. Ezért, ha százalékosan fejezzük ki az eltéréseket, azt tapasztaljuk, hogy így azok jóval nagyobbak.

Mivel 0,3 mm modulú fröccsöntött fogaskerekek nem álltak rendelkezésemre, ezért a mért eredményeket nem tudtam összehasonlítani velük. Ezért nem kijelenthető, hogy 0,3 mm modul esetén az alkalmazott 3D nyomtatási technológia az adott paraméterekkel és anyaggal megfelelő pontosságú-e.

Kijelenthető azonban, hogy ha ezeket a fogaskerekeket átforgatási nyomaték méréshez használnám, nagyobb mértékű hibákat kellene elhelyeznem a fogakon, hogy ugyanannyira hatásosan tudjam azokat kimutatni a nyomatékgörbén, mint a 0,5 mm modul esetén. Ez azért lenne szükséges, mert ebben az esetben a fogak gyártásból adódó hibája a névleges értékekhez képest viszonyítva nagyobb, mint a 0,5 mm modulnál volt.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a cikkben 0,3 mm modulú SLA módszerrel 3D nyomtatott műanyag fogaskerekek pontosságának vizsgálatát mutattam be.

Első lépésként legeneráltam a fogaskerekek 3D CAD geometriáját, majd ezeket SLA nyomtató alkalmazásával legyártottam. Ezt követően mérési sablonokat gyártottam le a könnyebb mérhetőségért. A méréseket egy optikai mikroszkóppal végeztem el. A mért paraméterek a fog alakja, a foghúrméret, az osztóhúrméret, a fogmagasság és a fejmagasság voltak. A cikkben röviden bemutattam a PhD értekezésem során 0,5 mm modullal végzett méréseimet is az összehasonlíthatóság érdekében.

A mérések eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy egyértelműen nem lehet kijelenteni, hogy ez a technológia ilyen kis modul esetén is megfelelő pontosságú, de ha ezeket a fogaskerekeket átforgatási nyomaték méréshez használnám, nagyobb mértékű hibákat kellene elhelyeznem a fogakon, hogy ugyanannyira hatásosan tudjam azokat kimutatni a nyomatékgörbén, mint a 0,5 mm modul esetén

6. SUMMARY

In this article, I presented an investigation into the accuracy of 3D printed plastic gears produced using the SLA method with a 0.3 mm module.

As a first step, I generated the 3D CAD geometry of the gears, then manufactured them using an SLA printer. I subsequently produced measurement templates to make measurement simpler. I carried out the measurements using an optical microscope. In the article, I also briefly presented the measurements I carried out with a 0.5 mm module during my PhD thesis for the sake of comparability.

Based on the results of the measurements, I concluded that it cannot be clearly stated that this technology offers sufficient accuracy for such a small module; however, if I were to use these gears to measure recirculation torque, I would need to put larger faults on the teeth in order to detect them just as effectively on the torque curve as with the 0.5 mm module

7. IRODALOM

[1] Bihari, J.: Kisméretű műanyag fogaskerekekkel szerelt hajtóművek tűrésezési problémái, GÉP 2016/5-6., pp: 14 – 17, 2016.

[2] Bihari J., Heating behaviour of plastic gears, in Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tools, 2012, pp. 323–328.

[3] Bihari J., Kisméretű műanyag fogaskerekekre ható külső hatások vizsgálata, GÉP. 68, 3, pp. 15–18, 2017.

[4] Bihari, J. – Kamondi, L.: Kis méretű műanyag fogaskerekek vizsgálata, GÉP 62:(7-8), pp: 21 – 24, 2011

[5] Marada I., Kisméretű műanyag fogaskerekek speciális tervezési kérdéseinek kutatása, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, 2026.

[6] Erney Gy.: Fogaskerekek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.17

OKTATÁSI CÉLÚ MOBIL ROBOT PLATFORM FEJLESZTÉSÉNEK TAPASZTALATAI

EXPERIENCES IN DEVELOPING A MOBILE ROBOT PLATFORM FOR EDUCATION

Mikolás János[*], *Konkoly István Junior*[**], *Dr. Bartók Roland*[***], *Hus Sándor*[****], *Dr. Háry András*[*****]

ABSTRACT

This paper presents a mentor–student project developing a hoverboard-based educational mobile robot. Such a product integrates the basics of several professional fields, including mechanics, electronics, mechatronics, and partly the vehicle development, so it is a valuable area of knowledge growth. The practice-oriented nature of the development allows the acquisition of practical skills in addition to professional knowledge. The project is a good example of the cooperation between technician education and the university. The achieved functionality can be extended with autonomous functions in the next stage of the project.

1. BEVEZETÉS

A mobil robot építése jól összekapcsolja a gépészeti tervezést, az elektronikát és a programozást. A ZSZC Ganz Ábrahám Technikumban végzett mentor-diák fejlesztés célja egy továbbépíthető oktatási platform létrehozása. A projekt során együttműködés jött létre a Miskolci Egyetemmel. A cikk célja részletesen bemutatni a kifejlesztett megoldást, azzal a szándékkal, hogy más intézmények is hasznosíthassák a konstrukciót.

A mobil robot, mint termék választását, a szakmai szempontok mellett az intenzív ipari fejlődés is indokolta. A robotika és a mobil megoldások előnyeit integráló eszközök napjainkban ugrásszerű fejlődésen mennek keresztül. Számos elemzés (lásd például [1], [2], [3]) is rámutatott ezen eszközök jelentőségére és használati sokrétűségére. A kapcsolódó kutatások különösen a mobil robotok irányítási technológiáinak fejlődését emelik ki, ma már közel teljesmértékű autonómia is megvalósul egyes termékeken.

A mobil robotok területe az oktatásban is egyre nagyobb teret nyer. A különböző robotikai laborok már jó ideje jelen vannak az egyetemi és a középfokú, de akár az általános iskolai oktatásban is világszerte. A helyzetváltoztatásra képes eszközök egy magasabb műszaki szintet képviselnek, ezeknél a termékeknél szükséges a helyzetfelismerő képesség, a mozgás-irányítás, a folyamatos visszacsatolás, az akadálykikerülés ismerete is. A mobil robotika oktatásban való hasznosításával több szerző is foglalkozott, rámutatva ezeknek az eszközöknek a hasznosságára a tanulók komplex robotikai tudásának építése során [4], [5], [6], [7].

A jelen cikk elsősorban nem módszertani, hanem technikai oldalról mutatja be a kifejlesztett mobil robotot. Az elkészült rendszer jelenleg vezetékes joystickkal irányítható. A következő cél a személy követése kamerával, a haladási út ellenőrzése lézeres távolságérzékelővel. A jelen cikk a működő kézi vezérlés megoldásait és az autonóm bővítés műszaki tervét ismerteti, kitérve a projekt oktatási tapasztalataira is.



1. ábra A meglévő platform külső formája (saját fotók alapján készített AI-illusztráció)

2. A MEGVALÓSÍTOTT PLATFORM

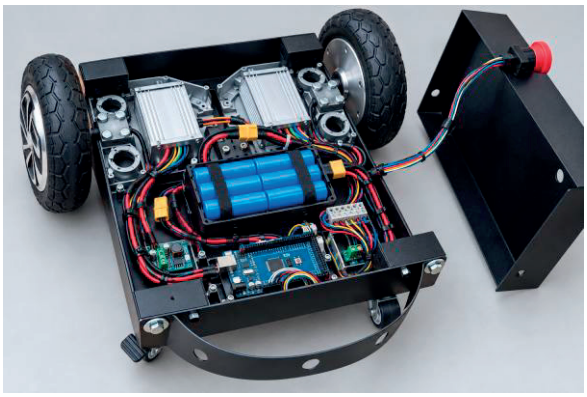
A jármű két külön vezérelt hoverboard-kerékre épül. A lemezház fogadja az akkumulátort, a két motorvezérlőt és az Arduino Mega egységet; a támasztókerekek stabil alátámasztást adnak, ezért a platform nem igényel aktív egyensúlyozást. Elöl íves ütköző, a fedélen vészleállító gomb található. A belső felépítést a 2. ábra szemlélteti; az illusztráció rendezettebb kábelezést mutat.

A joystick két potenciométere 0.5 V közötti jelet szolgáltat. Az Arduino A0 bemenete az előreirányú parancsot, A1 bemenete a kormányzást olvassa. A 10 bites átalakítás 0-1023 közötti értéket ad; a program a középhelyzetet 512-nek veszi, körülötte 20 egységes holtzónával.

Az előremenet csak az A0 érték 532 fölé emelkedésekor engedélyezett. A program ezt a

* *mentor tanár, ZSZC Ganz Ábrahám Technikum*
** *tanuló, ZSZC Ganz Ábrahám Technikum*
*** *tanársegéd, Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet*
**** *ügyvezető, Zalaegerszegi Duális Ágazati Képzőközpont*
***** *vezérigazgató, ZalaZONE Ipari Park Zrt.*

tartományt 0-255 közötti PWM-paranccsá alakítja. Középhelyzetben és hátrahúzott joysticknál a parancs nulla: a jelenlegi változat nem valósít meg hátramenetet vagy helyben fordulást.



2. ábra Belső elrendezési illusztráció a meglévő alkatrészekkel

Egyenes előremenetnél a két kimenet azonos. Jobbra kormányzáskor a jobb oldali parancs arányosan csökken, teljes kitérésnél nullára; ekkor a bal kerék hajt az előretolással arányosan. Balra kormányzásnál ennek tükörképe történik. A részleges kitérés tehát fokozatos ívmenetet ad, nem egyszerű be- és kikapcsolást.

3. JELILLESZTÉS ÉS TAPASZTALATOK

A bal motor PWM-je a 11-es, a jobb motoré a 13-as digitális kimeneten jelenik meg. A motorvezérlők analóg 0-5 V-os parancsbemenetéhez mindkét csatornán ellenállás–kondenzátor aluláteresztő szűrőt alkalmaztunk. A PWM kitöltési tényezőjét a szűrő közelítő egyenfeszültséggé alakítja:

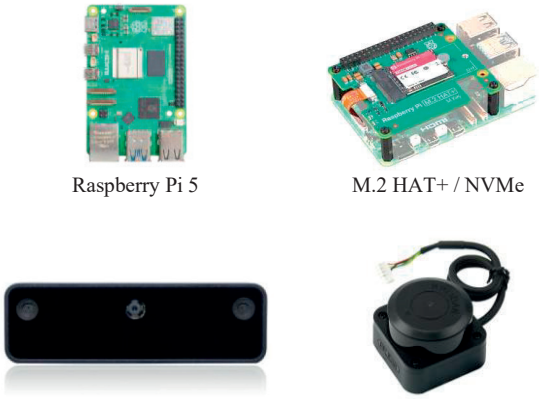
$$Uki \approx 5 \cdot D / 255\ [V],\ D = 0 \ldots 255.$$

Ez parancsfeszültség, nem mért keréksebesség. A tényleges mozgást a vezérlő karakterisztikája, a terhelés és a két hajtás különbsége is befolyásolja. A működő próbák igazolják a vezetékes irányíthatóságot; számszerű sebesség-, hullámosság- és fékútmérés még nem áll rendelkezésre.

A szűrő időállandója $\tau = R \cdot C$. A nagyobb időállandó csökkenti a hullámosságot, de késlelteti a parancsváltozást és a nullára állást. A véglegesítéshez mindkét PWM frekvenciáját, a motorvezérlő bemeneti terhelését és a szűrt feszültség lefutását oszcilloszkóppal kell ellenőrizni. A közös referenciaföld kialakítása, továbbá a jelvezetékek zavartűrő vezetése is lényeges.

4. A BŐVÍTÉS ESZKÖZEI

A Raspberry Pi 5, az NVMe SSD és az OAK-D Lite már beszerzett eszközök [8] [9]; a platformba integrálásuk a következő fejlesztési lépés. A Pi a képfeldolgozást és a mozgásdöntést végzi, az Arduino megtartja a meglévő PWM–RC kimeneti illesztést. A LiDAR beszerzése tervezett.



3. ábra A bővítés eszközei: Pi 5, M.2 HAT+ és NVMe-szemléltetés, OAK-D Lite, RPLIDAR C1 Gyártói/forgalmazói képek [1–4]; az SSD-fotó illusztratív.

4.1. Kamera és kedvező árú LiDAR

Az OAK-D Lite RGB-képe az ember detektálásához, sztereó mélységadata a követési távolság becsléséhez használható. A kamerára kompatibilis, előtanított személydetektáló modellt töltünk; a beüzemelés önálló DepthAI példával kezdődik, majd ROS2-illesztést kap. Az RGB-fókuszt a jellemző követési távolságon rögzítjük [10].

Az eredetileg felvetett A2M12 helyett az RPLIDAR C1 fejlesztőkészletet javasoljuk. A kompakt, robotporszívók érzékelőihez hasonló szerepű 2D lézerszkenner 360°-os mérési síkot, tipikusan 10 Hz-es körpásztázást és legfeljebb 12 m-es, felületfüggő hatótávot ad. A DFRobot kínálatában 69 USD irányáron szerepel, USB-adapterrel; szállítás és adó növelheti a bekerülési költséget [11].

A C1 mellett szól a dokumentált protokoll és a gyártói sllidar_ros2 csomag. Így nem kell ismeretlen, bontott robotporszívó-modul bekötését visszafejteni. A készlet USB-adapterrel kapcsolódik a Pi-hez, és /scan távolságadatot szolgáltat [12].

4.2. Tervezett szoftverkörnyezet

Az SSD-re Ubuntu Server 24.04 LTS ARM64 rendszert és ROS2 Jazzy környezetet telepítünk; ez támogatott operációsrendszer–architektúra párosítás [13]. A DepthAI és a hozzá illeszkedő depthai-ros driver adja a kameraadatokat, a sllidar_ros2 a lézerszkennert. A felügyelethez RViz2-t, a saját követési és soros modulhoz Python/rclpy-t használunk; a működő csomagverziókat rögzítjük.

A program külön kezeli a célkiválasztást, a követést, az akadályvizsgálatot és az üzemmódváltást. A kamera a személy helyzetét méri, a LiDAR a haladási sávban lévő tárgyakat ellenőrzi. A lézerszkenner önmagában nem azonosítja a követendő embert.

Kezdetben 1,5 m követési távolságot és legfeljebb 0,2 m/s haladást célzunk. A személy távolsághibája az előremeneti parancsot, oldalirányú eltérése a kormányzást módosítja. Akadálynál vagy célvesztéskor megállunk; az automatikus kikerülés későbbi feladat.

5. MECHANIKAI ÉS VEZÉRLÉSI INTEGRÁCIÓ



4. ábra Tervezett kamerás–LiDAR-os kivitel (látványterv)

A kamerához csavarozott, háromszögmerevített alumíniumprofil-tartót és állítható dőlésszögű adaptert készítünk. A kezdeti beépítési magasság 0,6-0,8 m; végleges értékét látómezőpróbák döntik el. Az USB-kábel a profilon rögzítve, tehermentesítéssel fut. A tartó nem akadályozhatja a vészleállító elérését vagy a fedél szerelését.

A LiDAR külön, vízszintes kis konzolt kap. Mérési síkjának a burkolat fölé kell kerülnie; az oszlop okozta takarást fel kell mérni. A Pi–SSD egység szigetelt távtartókra, védett és szellőző helyre kerül. Az akkumulátorról megfelelő bemeneti tartományú DC-DC átalakító táplálja, külön biztosított ágon; a kamera és a LiDAR indulási áramát is figyelembe vesszük.

A Pi USB-s soros kapcsolaton adja át a mozgásparancsot az Arduinónak. Az új firmware kézi és automatikus módot választ, ellenőrzi a parancsot, majd a meglévő két PWM–RC csatornán vezérli a motorokat. A LiDAR és a kamera tehát a Pi-n keresztül kapcsolódik a hajtáshoz, nem közvetlenül a motorvezérlőre.

Az első automatikus változat a meglévő, csak előremeneti és ívmeneti mozgást használja. Nagy irányeltérésnél megáll és kezelői beavatkozást kér. A kétirányú vagy helyben forduló hajtás külön hardveres és programozási ellenőrzést igényel.

6. ELLENŐRZÉS ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉS

A firmware-t induláskor tiltott hajtással, üzenetsorszámmal és kommunikációs időkorláttal bővítjük. Kiinduló beállítás a 20 Hz-es parancsküldés és 250 ms után nullázás; a tényleges megállási időbe az RC-szűrő késése és a kifutás is beleszámít. Független hajtástiltás, kézi felülbírálás és érzékelőhiba esetén megállás szükséges.

A tesztsorrend: asztali szenzorpróba, felemelt kerekes parancsteszt, lassú követés, végül akadály-, célvesztési és kábelkihúzási próbák. Mérjük a parancsfeszültséget, a megállási távolságot és a követési hibát. Később slam_toolbox és Nav2 tervezett. Ezek odometriát és koordinátatranszformációkat igényelnek; a PWM-parancs nem helyettesíti a kerékmozgás visszamérését [7].

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatott eszköz illeszkedik a mobil robotika intenzív fejlődési trendjeibe, egyúttal ezen megoldások egyre fontosabb oktatási célú irányaihoz.

A fejlesztés aktuális állása működő, vezetékes joystickkal irányított mobil platform. A tanulók az analóg mintavételezést, a differenciális kormányzást és a PWM-jellillesztést valós eszközön alkalmazzák. A következő mérföldkő a Pi-kamera integráció és a lassú személykövetés; az autonóm funkciók jelenleg tervek.

A cikkben részletesen bemutatásra került az eszköz műszaki felépítése és elemei, az alkalmazott megoldások működése és jellemzői. Cél volt olyan részletességű leírást adni, amelyre építve további hasonló fejlesztések valósíthatók meg.

Külön kutatásként vizsgálható a kialakított mobil robot oktatásban való használati módszertana, az egyes részegységekhez, illetve a rendszer egészéhez kapcsolható műszaki tudás és gyakorlati készségek átadásának folyamata.

8. SUMMARY

The device presented in the paper fits into the intensive development trends of mobile robotics, and at the same time into the increasingly important educational directions of these solutions.

The current state of development is a working, wired joystick-controlled mobile platform. The students apply analog sampling, differential steering, and PWM signal matching on a real-world device. The next milestone is Pi-camera integration and slow people tracking; autonomous functions are also planned.

In the paper, the technical structure and elements of the device, the operation and characteristics of the applied solutions were presented in detail. The aim was to provide a detailed description on which further similar developments can be realized.

The methodology of the use of the mobile robot in education and the process of transferring technical knowledge and practical skills related to the individual components and the system as a whole can be examined as separate research.

9. IRODALOM

[1] Kwe, N. B., & Priyadarshini, R. (2024). Emerging trends in mobile robots. *Robotics and smart autonomous systems*, 77-117.

[2] Cognominal, M., Patronymic, K., & Wańkowicz, A. (2021). Evolving field of autonomous mobile robotics: Technological advances and applications. *Fusion of Multidisciplinary Research, An International Journal*, *2*(2), 189-200.

[3] Raj, R., & Kos, A. (2022). A comprehensive study of mobile robot: History, developments, applications, and future research perspectives. *Applied Sciences*, *12*(14), 6951.

[4] Demetriou, G. A. (2011). Mobile robotics in education and research. *Mobile robots-current trends*, *27*, 48.

[5] Mitnik, R., Nussbaum, M., & Soto, A. (2008). An autonomous educational mobile robot mediator. *Autonomous Robots*, *25*(4), 367-382.

[6] Jojoa, E. M. J., Bravo, E. C., & Cortes, E. B. B. (2009). Tool for experimenting with concepts of mobile robotics as applied to children's education. *IEEE Transactions on Education*, *53*(1), 88-95.

[7] Crnokic, B., Grubisic, M., & Volaric, T. (2017). Different applications of mobile robots in education. *arXiv preprint arXiv:1710.03064*.

[8] RASPBERRY PI: Raspberry Pi 5. Product brief. raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/

[9] RASPBERRY PI: SSD Kit. raspberrypi.com/products/ssd-kit/

[10] LUXONIS: OAK-D Lite; DepthAI ROS. shop.luxonis.com/products/oak-d-lite-1; docs.luxonis.com/software-v3/depthai/ros

[11] DFROBOT: RPLIDAR C1, DFR1138. dfrobot.com/product-2803.html

[12] SLAMTEC: sllidar_ros2. github.com/Slamtec/sllidar_ros2

[13] OPEN ROBOTICS: ROS 2 Jazzy Jalisco Released (2024).openrobotics.org/blog/2024/5/ros-jazzy-jalisco-released

[14] NAV2: Setting Up Odometry. docs.nav2.org/rolling/configuration_and_development/first_time_robot_setup_guide/odom/setup_odom/

Az online források hozzáférése: 2026. október 15.
A program saját fejlesztés: Cshaba_Joy.ino.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.18

EGYEDI TERHELŐ MODUL KONCEPCIONÁLIS TERVEZÉSE LINEÁRIS AKTUÁTOROK SZÁMÁRA

CONCEPTIONAL DESIGN OF A UNIQUE LOAD MODULE FOR LINEAR ACTUATORS

Mózer András[*]*, Dr. Farkas Zsolt József*[**]

ABSTRACT

Linear actuators are used in nearly every modern production line. They are capable of creating precise and fast movements, while not taking up as much space as a conventional, purely mechanical drivetrain. Pneumatic actuators can be used in special environments, such as explosion-prone industries, medical and food production lines. Hydraulic systems have high power density, thus they can be found in heavy machineries. These systems can be analysed in place, creating the most precise but an expensive and complex process. For this time the system is also unable to take part in the production, generating additional revenue losses. A separate load module is used to analyse linear actuators outside of production environments. The benefit of such modules includes lower overall costs, being able to carry out these studies in other locations than the production facilities and to create additional load-cases, thus future proofing the system. This paper introduces the conceptual design of a special load module, created for these specific purposes.

1. BEVEZETÉS

A modern gyártósorokon a magas fokon és precízen vezérelhető aktuátorok alapozzák meg a termelékeny és versenyképes gyártást. Az aktuátorok kritikus szerepére való tekintettel, ezen rendszerek kiesése jelentős veszteségeket hoz magával [1]. Ez a kiemelt fontosság okozza az aktuátorok teljeskörű vizsgálatára való igényt. Mivel a helyben történő vizsgálat sokszor nem megvalósítható, így célszerű külön vizsgálóberendezések kiépítése. Ebben az esetben a rendszerrel szemben támasztott legfontosabb kritérium, hogy a valós felhasználási környezetet és az ott jelentkező terhelési eseteket a lehető legjobban közelítse.

Már a tervezési folyamat során célszerű a tervezett berendezést a valós környezethez igazítani. Ennek az elérésében jelentős potenciált mutat a Digital Twin (DT) modellek felhasználása [2]. A korszerű számítógéppel segített folyamatok közvetlenül integrálhatók a DT modellek készítésébe. A számítógépes tervezőrendszerekkel létrehozott modellek direkt bemenetként szolgálhatnak a fizikai építőelemeken alapuló modellezési folyamatoknak [3].

A műszaki gyakorlatban több különböző típusú és jellegű terhelést különböztethetünk meg [4]. A vizsgálóberendezések és terhelő modulok kialakításának egyszerűsége sok esetben azt eredményezi, hogy ezekből a terhelésekből csak néhány valósítható meg. Jellemzően ezek időben és irányukban állandó terhelések. Ezen berendezések előnye az egyszerűségük és a vizsgálatok könnyű kivitelezhetősége. Kellő validálás után a kapott eredmények akár közvetlenül hasznosíthatók. Jelen cikk egy olyan komplex terhelő modul tervezését mutatja be, mely képes akár időben, így a lineáris aktuátor lökete mentén változó nagyságú és irányú terhelések létrehozására is. Ezzel ugyan növelve a vizsgáló berendezés komplexitását, de az így megvalósítható terhelés profilok jobban megközelítik a valóságos terheléseket.

Az előzetes vizsgálatokkal lehetőségünk nyílik az aktuátorok rendszerszintű optimalizálására. Ennek során az ismert terhelési ciklusok alapján a működéshez megválaszthatók azok az üzemi paraméterek, amik biztosítják a rendszer energiahatékony működését.

A berendezés képes az optimálási folyamatokban való részvétel mellett különböző működési elvű aktuátorok vizsgálatára és azok sajátosságainak meghatározására. Az oktatási gyakorlatban sok esetben terheletlenül történik a lineáris aktuátorok bemutatása és vizsgálata, esetleg egy fojtáson keresztül befolyásolva a pneumatikus és hidraulikus lineáris aktuátorok viselkedését. Jelen vizsgáló berendezés képes a teljes löket mentén dinamikusan fellépő terhelések kialakítására, így az oktatásban is pontosabban bemutathatók a valós üzemi körülmények hatásai.

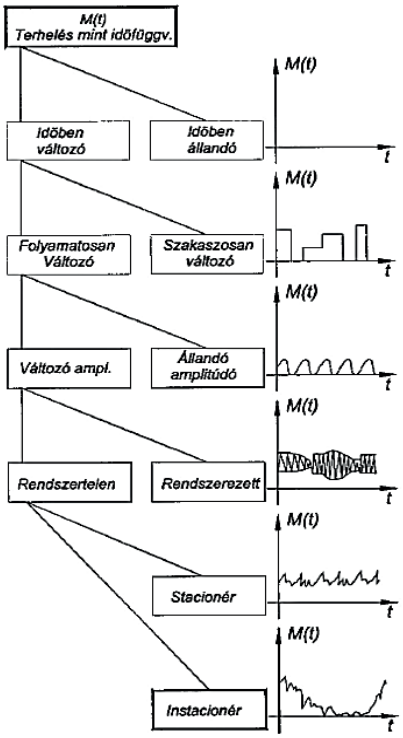
Egyszerű, csak egy működési elvet kihasználó aktuátorok mellett, komplex hibrid megoldások is vizsgálhatók. Ezeknél nem csak az energiahatékonyság, hanem az egymást kiegészítő funkciók megjelenése is előnyös lehet, például egy hibrid architektúrába beépítve javítható a pneumatikus munkahengerek pozícionálási pontossága [5].

* *tanszéki mérnök, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék*
** *adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék*

2. A TERHELŐ MODUL SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE

2.1. A terhelési profilok megválasztása

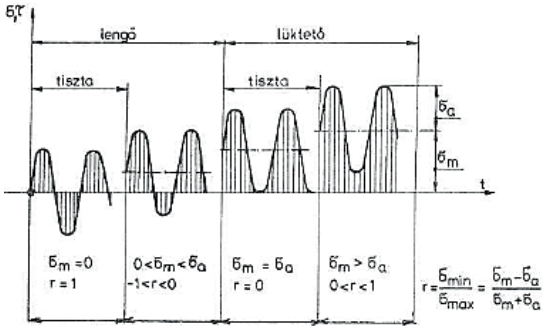
A kutatás célja a lehető legtöbb és leginkább különböző terhelés együttes megvalósítása volt a teljes mozgási tartományon belül.



1.ábra A lehetséges terhelések [4]

Az 1. ábra összefoglalja a lehetséges terheléseket, de csak időfüggésük alapján. Az aktuátorok szempontjából a terhelések időfüggése helyett a löket során adott pozíciónál megjelenő terhelés nagysága a mérvadó. Ezek csoportosítása megfelel az 1. ábrán látottaknak. A terhelőmodullal szemben támasztott másik fő követelmény, hogy ezek a terhelések irányuk szerint is változhassanak.

Ezen terhelések hatására az egyes gépelemekben különböző feszültségek lépnek fel (2.ábra.). Hasonlóan a feszültségekhez, az ismétlődő terhelések esetén is meghatározható egy középérték és egy amplitúdó.



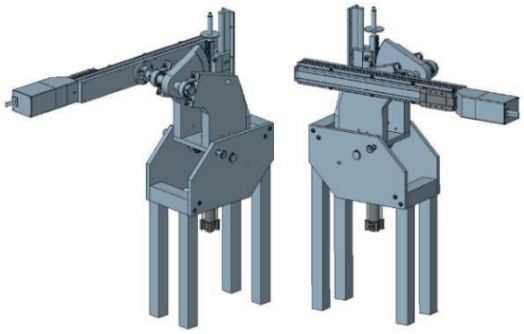
2. ábra Ismétlődő terhelések okozta feszültségek [6]

A terhelések és hatásukra ébredő feszültségek középértékei és amplitúdói egymáshoz való viszonyulása alapján megkülönböztethetünk lengő, tiszta lengő, lüktető és tiszta lüktető terheléseket illetve feszültségeket. A rendszerezéshez a műszaki gyakorlatban 2. ábrán látható aszimmetria tényező (r) használata a járatos.

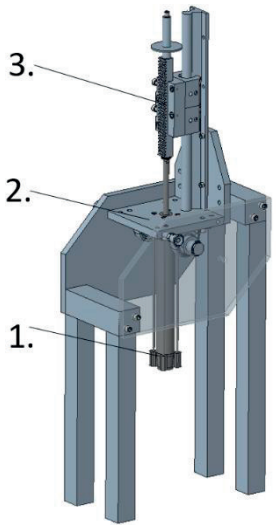
A komplex terheléseket használó vizsgálóberendezések esetén a terhelés középértékét legegyszerűbben egy súlyterhelés szolgáltatja. Ezzel alacsonyabb rendű terhelések, például egy időben állandó terhelés is megvalósítható. A terhelésamplitúdót egy vezérelhető nagyságú erő adja. Jelen terhelő modul esetén ez egy változtatható erőkarral rendelkező, így változó nagyságú nyomatékot kifejtő alegység, mely egy áttételen keresztül erőként fejti ki hatását.

2.2. A terhelő modul felépítése

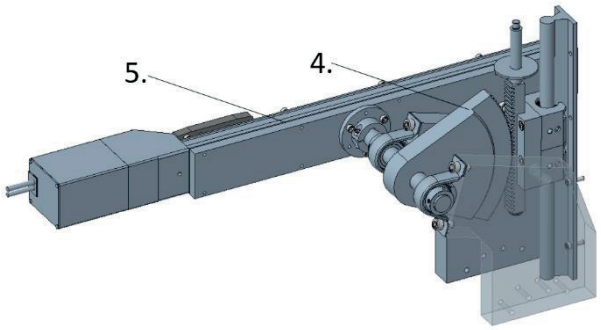
A 3.ábra szemlélteti a terhelő modul felépítését. Jelen esetben a beépített aktuátor egy pneumatikus munkahenger (4.ábra 1.). A pneumatikus munkahengerek ugyan az egyszerűbb felépítésű lineáris aktuátorok közé tartoznak, de az általuk használt sűrített levegő összenyomhatósága miatt működésük pontos megértése további vizsgálatokat igényel. A berendezés két fő részre bontható. az első a terhelés középértékét szolgáltató rész (4.ábra). A második, vezérelhető egység a terhelés amplitúdóját adja. (5.ábra).



3.ábra A terhelő modul

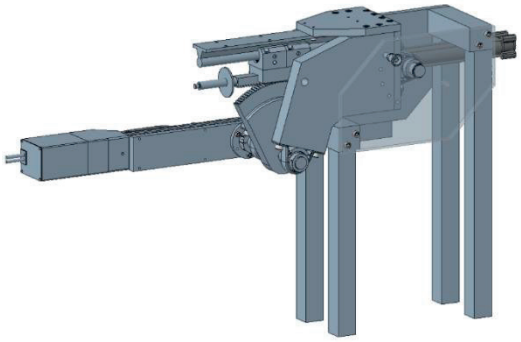


4.ábra A terhelés középértékét megvalósító egység



5.ábra A terhelés amplitúdóját megvalósító egység

A terhelés középértékét a pneumatikus hengerrel egytengelyűen felszerelt súlytartóra helyezett különböző méretű hitelesített súlyok adják. A munkahenger (4.ábra 1.) egy billenthető asztalhoz van rögzítve (4.ábra 2.), így különböző beépítési helyzetek is megvalósíthatók. Szélső esetben az asztal (4.ábra 2.) teljesen átfordítható és a munkahenger az eredeti függőleges helyzethez képest 180 fokkal elforgatva is vizsgálható. A munkahengert és a súlytartót egy fogasléc köti össze. Mozgásukat egy lineáris vezeték segíti, így kihajlás ellen kellően védett a rendszer, akár döntött helyzetben is.



6.ábra A terhelő modul döntött állapotban

A döntött állapot (6. ábra) kiemelet pozíciója a teljesen vízszintes helyzet. A függőleges és vízszintes helyzetek között diszkrét szöghelyzetekben állítható a berendezés egy rugós rögzítőtüske segítségével. A különböző szöghelyzetekben mutatott eltérő viselkedések vizsgálata kiemelt szerepet tölt be a megfelelő üzemeltetési paraméterek megválasztásánál. Ilyen lehet az alkalmazott fojtások finomhangolása, amik a munkahengerek sebességszabályozást valósítják meg. A vizsgálóberendezés robosztus alapként szolgál a pneumatikus munkahengerekre jellemző eltérő fojtások (primer és szekunder ági) összehasonlításához, illetve azok jellegzetességeinek vizsgálatához. Ilyen lehet például a primer ági fojtás esetén megjelenő akadozó mozgás (stick-slip) jelensége.

A fogasléc alá beépíthető erőmérő cella biztosítja a terhelés visszaigazolhatóságát. A berendezés üzemeltethető csak súlyterheléssel is. Ebben az esetben a terhelés középértéke külön mérhető, így egy terhelési ciklus részeire bontva is vizsgálható. A munkahenger elmozdulását többek között induktív útadóval mérhetjük, illetve az egyes kamrákban megjelenő nyomásokat, térfogatáramokat és hőmérsékletet mérve a munkahenger pontos működési paraméterei is meghatározhatók.

1. táblázat A vizsgált munkahenger főbb paraméterei

Paraméter	Érték
Dugattyúátmérő	32 mm
Dugattyúrúd átmérő	12 mm
Löket	200 mm
Típus	SMC C96SDB32-200C

Az átmenő dugattyúrúddal rendelkező munkahengereket leszámítva minden munkahenger esetén a kifejtett nyomóerő nagyobb, mint a húzóerő. Ez azonos nyomásszintek esetén az eltérő nagyságú hatásos felületekből adódik.

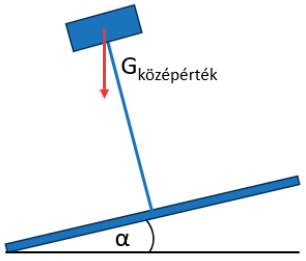
$$\frac{F_{nyomó}}{F_{húzó}} = \frac{\frac{D_{dugattyú}^2 \cdot \pi}{4}}{\frac{(D_{dugattyú}^2 - D_{dugattyúrúd}^2) \cdot \pi}{4}} \qquad (1)$$

Jelen berendezés esetén a változtatható terhelések miatt képesek vagyunk mindkét irányba a maximálisan kifejthető erőnek megfelelően terhelni a munkahengert.

A súlyterhelés mozgatása mellett a munkahenger egy fogaslécen (4.ábra 3.) keresztül meghajt egy fogasívet (5.ábra 4.). Utóbbihoz rögzítve található egy elektromos lineáris hajtás (5.ábra 5.), melynek kocsijára súlyok szerelhetők. Az itt elhelyezett súlyok folyamatos pozícionálásával hozható létre egy időben, így az aktuátor lökete mentén változó nyomaték (8.ábra), ami az összterhelés megváltozását okozza a munkahengeren.

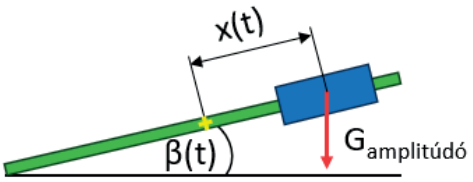
2. táblázat
Az elektromos lineáris hajtás főbb paraméterei

Paraméter	Érték
Löket	450 mm
Max. mozgatható tömeg vízszintes mozgásnál	30 kg
Max. mozgatható tömeg függőleges mozgásnál	5 kg
Típus	SMC LEFS32S3-450



7.ábra A terhelés középértékének származtatása

$$F_{középérték} = G_{középérték} \cdot cos\alpha \qquad (2)$$



8.ábra A terhelés amplitúdójának száramztatása

$$r(t) = x(t) \cdot cos\beta(t) \tag{3}$$

$$M(t) = G_{amplitúdó} \cdot r(t) \tag{4}$$

Ezzel a munkahengerre jutó teljes terhelés a következőképpen adódik.

$$F_{terhelő}(t) = F_{középérték} + \frac{M(t)}{r_{fogasív}} \tag{5}$$

A löket során az elektromos lineáris hajtás szöge folyamatosan változik (8.ábra), ezt a rajta elhelyezett tömeg pozícionálásával kell kompenzálni állandó nyomaték eléréséhez. Ugyanígy az indítás során a terhelő modul vezérelhető részének tehetetlenségi nyomatéka miatt megjelenő erőtöbbletet is lehetséges ellensúlyozni a megfelelő elhelyezkedés megválasztásával, mivel az elektromos lineáris hajtás képes a munkahengerre vetítve nyomó és húzó irányú terhelést is létrehozni.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk során egy olyan komplex terhelési eseteket is megvalósítani képes terhelő modult mutattunk be, mely képes a helyszíni vizsgálatokat teljeskörűen kiváltani. A vizsgálatok során a valós üzemi környezetben megjelenő terhelések mellett a berendezés képes akár teljesen új terhelési ciklusokat is létrehozni, ezzel segítve a jövőbeni tervezési folyamatokat. Ezek célszerűen tervezés alatt lévő gépek termékfejlesztési folyamatába illeszkedő terhelések. Mindez a DT modellekkel kiegészítve a konkurens termékfejlesztés egyik meghatározó eleme lehet.

A berendezés a változatos terhelésprofilok létrehozásával aktív szerepet tölthet be a különböző rendszeroptimalizálási folyamatokban. Az energiahatékony üzemeltetési paraméterek meghatározása mellett az élettartam vizsgálatok, dinamikus működési állapotok, például indítási folyamatok vizsgálatának, sőt akár tömítés vizsgálatok alapját is szolgáltathatja a berendezés. Mivel az üzemi paraméterek meghatározása sok esetben empirikus úton történik, így a vizsgálóberendezés a DT technológiával és mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásával képes a rendszer Pareto-optimumát meghatározni. Kimenetként pedig az üzemi paraméterek mellett a lineáris aktuátor konkrét vezérlése is meghatározható.

A vizsgálható üzem közbeni jelenségek közé tartoznak például a pneumatikus és hidraulikus munkahengerek eltérő sebességszabályozási stratégiái a különböző fojtásokon keresztül, az indításkor megjelenő tapadási súrlódás okozta többleterő-szükséglet, adott körülmények melletti akadozó mozgás (stick-slip). Elektromos aktuátorok esetén pedig az indítás során és a löket mentén fellépő dinamikus terhelések okozta nagyobb áramfelvétel pontos vizsgálatát is lehetővé teszi a berendezés.

Ugyan a jelen cikkben csak egy pneumatikus munkahenger beépítésével kerül bemutatásra a vizsgáló berendezés, de hidraulikus vagy elektromos elven működő lineáris aktuátor vizsgálatára is van lehetőség. A különálló lineáris aktuátorok mellett hibrid architektúrák is beépíthetők. Ezen architektúrák vizsgálatához és optimális üzemeltetési paramétereinek meghatározásához a DT modellek prediktív MI-val felruházva képesek a legmodernebb ipari kívánalmaknak is megfelelni. A MI nyújtotta lehetőségeket nem csak a vizsgált lineáris aktuátorok kapcsán alkalmazhatjuk, hanem már magánál a vizsgálóberendezésnél is. Az egyedi követelmények által meghatározott új terhelési profilok automatikus lekövetéséhez és a vizsgálóberendezés pontos vezérlésének meghatározásához is kulcsszerepet tölthet be egy robosztus MI-án alapuló predikciós algoritmus. Ezzel egy változatos felhasználású, az oktatásba és a kutatásba egyaránt beépíthető berendezés koncepcionális terveit hoztuk létre.

4. IRODALOM

[1] M. BEVILACQUA, M. BRAGLIA: *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection.*, Reliability Engineering & System Safety, Volume 70, Issue 1, 2000, ISSN 0951-8320, https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8

[2] H. ZHANG, Y. LI, D. XUE, X. TONG, B. GAO, J. YU, *Digital twin technology facilitates precision improvement in complex product assembly: A progressive deduction method of data-driven tolerance allocation*, Advanced Engineering Informatics, Volume 62, Part C, 2024, 102790, ISSN 1474-0346, https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102790

[3] https://www.mathworks.com/products/simscape.html elérés dátuma: 2026.10.07.

[4] TÓTH S., MOLNÁR L., BISZTRAY S., MAROSFALVI J.: *Gépelemek 1.,* Műegyetemi Kiadó, 2007

[5] MÓZER A., FARKAS Zs.: *Analysis of an electro-pneumatic hybrid lifting system*, EXPRESS 2024, 14th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency, Subotica, SERBIA, April 04-06 2024, ISBN-978-86-82912-00-2

[6] Tóth Laboncz J.: *Gépészeti szerkezetek szilárdságtani méretezésének alapjai,* Piros Napló Média Kft, 2006

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.19

MAGYARORSZÁGI TERVEZŐISKOLÁK LEGUTÓBBI TERVEZÉSMÓDSZERTANI KUTATÁSAI

LATEST RESEARCH TRENDS ON THE DESIGN METHODOLOGY OF HUNGARIAN DESIGN SCHOOLS

Rohály Áron, Dr. Takács Ágnes**, Dr. Jálics Károly****

ABSTRACT

This study aims to provide a structured review of recent trends in Hungarian design methodology and to present the latest activities of the two most significant design schools. In the examined research studies, the classical methodological elements of the methods proposed by the authors are mainly linked to algorithmizing, databased solutions or computer-aided support. This is not limited to CAD-CAE modelling and simulation, but it also supports additional elements of the digitalised engineering workflow. In this article, the presented research results in the field of design methodology share common bases, however they differ in terms of which phases and which type of computer-aided methods of the design process they support. This paper develops a unified comparative framework for analysing the examined methods, which contributes to a developed CAD-CAE decision-support method.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban az egyre kifinomultabb gépészmérnöki folyamatok egyre összetettebb termékek létrehozását teszik lehetővé, azonban mindez egyre szigorúbb követelményeket von maga után. A fejlesztés korai fázisában az egymásnak ellentmondó költség, ciklusidő és minőségi kritériumok közötti kompromisszum megtalálásában, a lépések rendszerezésében és a döntéshozatal dokumentálásában a tervezésmódszertan nagy jelentőséggel bír. Többek között a digitalizáció, a számítógépes CAD-CAE támogatás és az optimalizálás azok a kiemelkedő területek, amelyek a tervezőmérnök munkáját a tervezés kezdeti szakaszában is támogatják.

Magyarországon jelentős szerepe és hagyománya van a tervezésmódszertan kutatásának, ebben kiemelt szerep jut a Budapesti Műszaki Egyetem és a Miskolci Egyetem tervezőiskoláinak és azok kutatási eredményeinek. Az ezekhez kapcsolódó kutatási hagyományok eltérőek, ugyanakkor kapcsolódnak is egymáshoz. A tanulmány az utóbbi évek tervezésmódszertani vonatkozású kutatásaira fókuszál a két tervezőiskola esetében.

A cikk a vizsgált munkákat a számítógépes támogatás tervezési fázisokban betöltött szerepének elemzése alapján egységes összehasonlító keretbe foglalja az ezekben található módszertani elemeket. Az összehasonlítás szempontjai a tervezési fázis, a támogatás típusa, a digitalizáltsági szint, a módszertan és a digitális mérnöki munkafolyamatba való integrálhatóság. A tanulmány azt is bemutatja, hogyan jelennek meg a klasszikus tervezésmódszertani elemek mellett a modernebb digitális eszközök.

Ez a támogatás a CAD-CAE eszközökkel segített modellezés és szimuláció mellett jelenthet többféle formát, például adatbázisok létrehozását, tudásbázis építést, elemkönyvtárak felépítését, optimalizálási eljárásokat vagy akár teljes életciklusra kiterjedő információk nyilvántartását.

A tanulmány azonosítja a fő kutatási irányokat és kitér arra is, hogy ezek a tervezés melyik fázisában adaptálhatók. Ezekből több összehasonlító táblázat is készült. A vizsgálat kitér arra is, hogy a különböző matematikai, digitalizált vagy számítógéppel segített támogatási formáknak mi a közös alapja, eltérő szintje vagy iránya.

2. MÉRNÖKI TERVEZÉSMÓDSZERTAN KUTATÁSI HÁTTERE

A mérnöki tervezés egy szervezett és dokumentált döntéshozatal, amely során az egyszerre jelenlévő különböző célokat és korlátokat logikusan kell összeegyeztetni és dokumentációval alátámasztani. A tervezői tevékenységek a feladat tisztázása után feloszthatók koncepcionális, konstrukciós és részlettervezési tevékenységekre. Ezeknek a fázisoknak az elvégzése során a tervezésmódszertan segíti a mérnököket. Ez a műszaki rendszerek fejlesztésének cselekvési terve, ami a tervezéstudományból és a megszerzett gyakorlati tapasztalatokból építkezik és rugalmasan igazítható az adott feladathoz [1].

A tervezésmódszertan fejlődése elsősorban a 2. világháború után gyorsult fel, kiemelkedő kutatók munkája révén, mint például Pahl és Beitz, Roth, Hubka és Eder, Koller, Altshuller, Kesselring, vagy Lindemann. Az idők folyamán különböző módszertani irányok fejlődtek ki, mint a rendszerszemlélet, az értékelemzés, vagy a szisztematikus tervezés.

Napjainkban egyre nagyobb az igény a szisztematikus tervezésre, mert növekszik a komplexitás és a variánsok száma, nőnek a minőségi elvárások, ugyanakkor az idő- és erőforrás korlátok egyre szigorúbbak és folyamatosan csökkennek a fejlesztési ciklusidők is. Ezek egymással

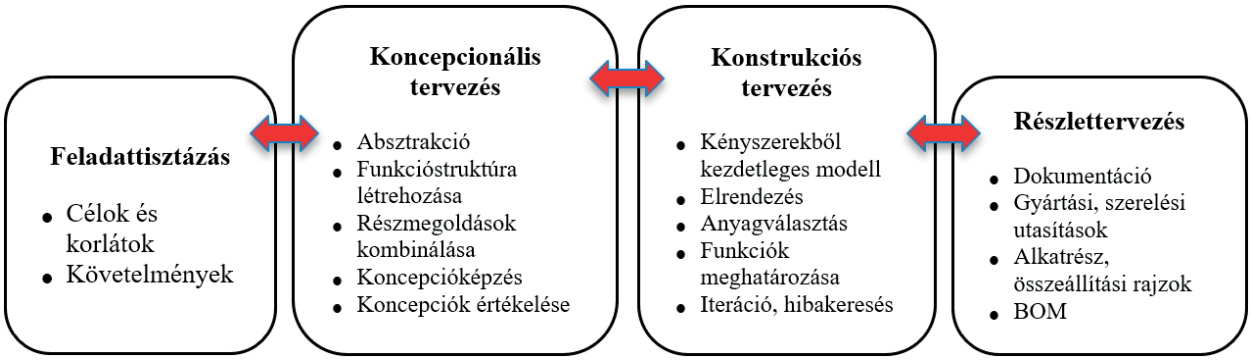
** PhD hallgató, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézete*
*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézete*
**** egyetemi docens, intézetigazgató, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézete*

szemben ellentmondásos elvárások, feloldásukhoz rendszerszintű szemlélet szükséges.

A megoldásváltozatok előállítása a részmegoldások rendszerszintű összeállítását jelenti, amikhez már számítógépes és matematikai módszereket is igénybe vesznek. Ennek eredménye számos megoldásváltozat, amelyek közül a koncepcionális tervezés során ki kell választani azt a változatot, amelyik az adott elvárásoknak várhatóan a legjobban meg fog felelni. A kiválasztás módja az értékelés, melynek során különféle összehasonlító eljárásokkal történik a megoldás értékelése. A preferenciák kiválasztása a pontosan rögzített vállalati célokból, a piaci igényekből megállapított termékkövetelményekből és a termék várható életciklusából vezethető le, amit mindig dokumentálni kell. Ezek képezik a specifikációk alapját.

A mérnöki munkafolyamat a feladattisztázási, koncepcionális, konstrukciós és részlettervezési fázisból és azok ütemezéséből áll. A cél, hogy a lépések időzíthetők és kontrollálhatók legyenek, ami szükséges a projektmenedzsmenthez és a mérnöki döntések auditálhatóságához, illetve ahhoz, hogy a hibákat még korai szakaszban feltárjuk. A különböző szakaszok közötti folyamat része a kétirányú iteráció, ami visszacsatolást jelent például a prototípustesztekből és szimulációból származó adatok és a folyamat korábbi szakaszai között. Ennek révén a terv folyamatosan módosul és egyre pontosabbá válik.

Az 1. ábra szemlélteti a feladattisztázás, a koncepcionális és konstrukciós tervezés, illetve a részlettervezés közötti munkafolyamatot. Az iterációs lépések bármelyik tervezési fázis között megjelenhetnek, de nem mindig szükséges az elvégzésük.



1. ábra. A tervezés egyszerűsített munkafolyamata Pahl és Beitz munkája alapján [1]

A koncepcionális tervezés fő lépései az absztrakció, funkcióstruktúra képzés, részmegoldások kombinációinak képzése, végül a koncepcióképzés. A koncepcionális fázis kimenete a különböző kiválasztott és pontozott koncepciók és azok funkcióstruktúrája, a kiválasztás kritériumai és súlyozásai, a követelménylista, a kockázatértékelési lista, illetve az ellenőrzési terv. Ezek célja, hogy növeljük a koncepciók minőségét.

A konstrukciós tervezés feladata a működési elvekből olyan elrendezési terv kialakítása, amely teljesíti a műszaki és gazdasági elvárásokat. Ennek az eszközei az ellenőrzőlisták, szabályok, elvek és útmutatók. A konstrukciós tervezés folyamata során a koncepcióból kiindulva először a kritikus követelményeket és a térbeli kényszereket azonosítjuk. Ezután kezdetleges modell készül a fő funkcióhordozó elemekre, majd ezekhez előzetes méretarányos elrendezés és anyagválasztás történik. Ezt követi a főfunkciók és a segédfunkciók részletes kidolgozása, a műszaki és gazdasági értékelés, optimalizálás, hibakeresés. Végül az eredményeket rögzíteni szükséges és el kell készíteni a gyártási és szerelési dokumentumokat. A lépések iteratívak, mert az elrendezés, a fő méretek és az anyagok minden iterációban változhatnak. A változásokat mindig ellenőrizni és rögzíteni kell.

A részlettervezési folyamat során befejezzük a műszaki termékek megvalósításához szükséges végleges műszaki dokumentációt. Rögzítésre kerül az összes egyedi alkatrész különböző tulajdonsága, gyártási módszere, működési eljárása, a végső költségek és végül minden újra ellenőrzésre kerül. Ennek a szakasznak az egyik legfontosabb része a gyártáshoz szükséges specifikációk kidolgozása, beleértve a részletes alkatrészrajzokat, összeszerelési rajzokat és a megfelelő alkatrészlistákat is [1].

3. KIVÁLASZTOTT KUTATÁSI MUNKÁK MÓDSZERTANI ÁTTEKINTÉSE

A cikk egy olyan irodalmi áttekintés, ami öt tervezésmódszertani témában végzett kutatás eredményeit hasonlítja össze. A vizsgálat Piros Attila, Trautmann Laura, Gotthard Viktor, Dömötör Csaba és Szabó Kristóf kutatásait tekinti át. A források kiválasztása során fontos szempont volt a budapesti és a miskolci tervezőiskolák tervezésmódszertani kutatási eredményeinek megismerése továbbá, hogy ezek az eredmények a mérnöki tervezési folyamathoz hogyan és melyik fázisban illeszkednek. Lényeges kérdés volt ezen felül, hogy a vizsgált kutatásokban felhasznált számítógépes alkalmazások segíthetik-e a későbbi CAD-CAE döntéstámogatási kutatás módszertani megalapozását. A klasszikus tervezésmódszertani hátteret Pahl és Beitz könyve [1] adja, valamint Roth, Hubka és Eder, Koller, Altshuller, Kesselring vagy Lindemann munkái. Az elemzés áttekinti a fő

módszertani elemeket a tervezési folyamat főbb fázisaiban, a számítógéppel támogatható megoldásokat, a különböző CAD-CAE eszközök fő előfordulási helyeit és a témához kapcsolódó lehetséges alkalmazási területeket. Ezek az azonosított módszertani trendek az összehasonlítási szempontok alapján meg is jelennek az adott munkáknál a következő fejezet táblázataiban.

Piros Attila [2] úgy ismerteti a fuzzy módszert, mint a tervezési eljárások fejlesztésének egyik lehetséges új módját. A cél a fuzzy módszer kiértékelési fázisra történő kiterjesztése, a tagsági függvények alakjának fejlesztése, egy egyszerűbb összegzési eljárás kidolgozása és ezek ipari alkalmazhatóságának igazolása valós műszaki feladatokon. Az új kidolgozott eszköz a kiértékelés egyszerűsítésére szolgáló korrigált fuzzy átlag (CFM). A módszer elsődlegesen a részlettervezés fázisához kapcsolódik. Ez számítógépes tervezési környezetben is ad egy gyorsan alkalmazható, hatékony és tervezői szempontból kontrollálható eljárást. További elemei a tagsági függvények, súlyozás, fuzzifikáció és defuzzifikáció, melyek segítségével meghatározható a kiértékelés eredménye. A megoldás előnye, hogy képes kezelni és számszerűsíteni a bizonytalan eseteket és az emberi gondolkodáshoz közeli objektív, szubjektív és kevert követelményeket a tervezési környezetben is, amikor a követelmény már nem értelmezhető tisztán számszerűen. A fuzzy módszer az iparban még nem terjedt el széles körben, de a szerző több valós műszaki és ipari példát is bemutat.

Trautmann Laura [3] kutatása a termék vizuális jellemzőinek és ezen jellemzők által a felhasználóból kiváltott érzelmi hatás összekapcsolására összpontosított. A mintázatok generálását több iparágban is használják, azonban a parametrizálás nem érzelem alapon történik. Trautmann úgy véli, hogy a színek, formák, vonalak, mintázatok stb. hangulati hatása parametrizálható, szabályokba rendezhető, fizikai jellemzőkből levezethető, mérhető és modellezhető. A minták és az általuk kiváltott érzelmek közötti kapcsolatok kezelésére fuzzy módszeren alapuló szabályrendszert és érzelemalapú tagsági függvényeket használ. A szerző kidolgozta az EmPatGen (Emotional Pattern Generator) érzelemalapú fuzzy szabályrendszerrel támogatott parametrikus mintázat generálási rendszert. Ez követelményekre bontja a mintát, ezután fuzzy módszerrel összeköti, majd legenerálja. A kimenet 2D minták formájában jön létre defuzzifikáció segítségével Mamdani következtetési rendszerrel. A módszer elsősorban a koncepcionális tervezéshez kapcsolódik. A kutatás során több szoftvert is használnak egymással összekapcsolva, például MATLAB, PTCCreo, GIMP. A termékek egyedi igényekre történő fejlesztéséhez már alkalmas a modell, de ipari gyártási folyamat szintjén megvalósuló projektek vagy automatizálások elvégzéséhez további fejlesztések szükségesek.

Gotthard Viktor [4] munkája többek között a moduláris felépítésű gyártósorok tervezésének elméletét és gyakorlatát ismerteti. Gotthard megállapította, hogy az egyedi gyártósorokra és célgépekre nincs részletesen kidolgozott moduláris fejlesztési módszer, ezért a kutatás célja olyan eszközök és eljárások kidolgozása, amik lehetővé teszik és támogatják az építőelemekből felépülő egyedi gyártósorok gyors összeválogatását. A vizsgálat ipari problémája abból adódik, hogy a tömegtermelési igények moduláris termékeket és modulárisan összekapcsolható gyártástechnológiai lépéseket tesznek szükségessé. Ezekhez moduláris szerkezeti felépítésű gyártógépekre van szükség. A különböző módszerek együttes alkalmazásával informatikai tervezést támogató rendszert hoz létre. A kutatás fókusza a hierarchikus moduláris tervező program (MTP) létrehozása. Ez egy olyan rendszer, amely építőelemeket, alegységeket és felhasználói követelményeket kapcsol össze az ezek kezelésére kifejlesztett segédszoftverrel több adatbázison keresztül. A program összekapcsolja az ajánlatadási, specifikációs, tervezési és kivitelezési fázist. Képes BOM generálására, SAP adatok kezelésére, CAD modellek tárolására és összeállítási modell létrehozására, specifikációs adatbázis és elemkönyvtárak használatára is. A kidolgozott módszer támogatja a szimultán tervezést, amivel az ipari berendezés bizonyos részeinek kivitelezése már akkor megkezdődhet, amikor más részei még pontosan nincsenek megtervezve. Az elemkészlet és az elemek paraméterei egy komplex elektronikus adatbázisban tárolhatók, kezelésüket egy célprogram támogatja. Ezáltal a paraméterek értékei és a modulok rugalmasan változtathatók a piaci igények szerint. A folyamat és a program alkalmas egyedi gyártósorok, célgépek kivitelezésére és ezek költség- és átfutási idejének becslésére is. A kidolgozott program leginkább a konstrukciós tervezési fázishoz kapcsolódik.

Dömötör Csaba [5] kutatása a természeti analógiákra épített adatbázisra, annak statisztikai elemzésére, illetve a koncepcionális tervezési alkalmazásokra összpontosít. A kutatás kiindulópontja a természeti megfigyelésekből származó mérnöki tudás megszerzése és hasznosítása. A természet fontos inspirációs forrás is lehet a mérnök számára, aminek a megoldásai tanulhatók és fejleszthetők. A kutatás célja, hogy kifejlesszen egy katalógust, ami széleskörűen összegyűjti a tervezéshez használható különböző természeti analógiákat és megoldásokat. A kutatás áttekinti a tervezésmódszertan irodalmát, amiből arra a következtetésre jut, hogy a TRIZ-módszer kapcsolható össze leginkább a természeti alapú analógia kereséssel és az ebből szerkesztett adatbázissal. A TRIZ-módszer (Altshuller) alapgondolata, hogy egy speciális konstrukciós feladatnak vagy egy ahhoz hasonló problémának valahol már született megoldása. Ezek a megoldások az ellentmondások kreatív feloldásából születnek. A kutatás rendszerezi és csoportosítja a természetben is megtalálható hatáselveket, azok alkalmazási módjait és analógiáit, majd ezekből katalógust készít. Ennek a kezeléséhez Microsoft Access programot használ. A különböző CAD-CAE eszközöket nem használja közvetlenül a módszer kidolgozása során. A katalógus használható keresésre, szűrésre, címkézésre, csoportosításra, lekérdezésre. A módszer az adatbázis- és katalógus építéssel leginkább a koncepcionális tervezési fázishoz kapcsolódik.

Szabó Kristóf [6] kutatása a generatív tervezési módszerek és algoritmusok feltárását, a különféle gyártási technológiákkal gyártható alkatrészek tervezését

részletezi. A kutatás a generatív tervezést a tervezésmódszertan és a különböző szoftveres megoldások egy új lépcsőfokaként és kombinációjaként kezeli, mivel ezzel már a mérnöki folyamat korai fázisában is több ezer variáció előállítható. A tervezés olyan folyamat, amely során a korlátozott megoldástér mellett egy műszakilag és pénzügyileg optimális eredményt kell létrehozni. A generatív tervezési folyamatot párhuzamos megoldáskeresési folyamatként határozza meg, ami elsősorban a diszkurzív és a matematikai szemléletet kapcsolja össze. Ennek a folyamatnak a szakaszai a funkcionális peremfeltételek meghatározása, a geometriai modell megalkotása, a szimulációs modell létrehozása, a megoldások generálása, a kiértékelés és a kiválasztás. Ma már léteznek számítógéppel segített CAD optimalizálási beépülő modulok is a generatív tervezési folyamatokhoz. A kidolgozott új leírásmód bevezeti az X konstrukciós tér kapcsolati mátrixot, G generált kapcsolati mátrixot, M megoldásmátrixot, F_g generált funkcióstruktúra-mátrixot, g(k) és g(sz) generálási kötöttség és generálási szabadság mutatókat, γ_i generáltsági fok paramétert, $b_i(r)$ és $b_i(v)$ biztonsági tényezőket. Ezeket az iparban is elterjedt, matematikai alapú SIMP topológiai optimalizálási módszer segítségével lehet alkalmazni az optimalizált geometria meghatározására.

Az áttekintett kutatások alapja a közös klasszikus tervezésmódszertani művek, de eltérő a módszertanuk fókusza, a számítógépes támogatás módja, a tervezési fázishoz kapcsolódó CAD-CAE eszközök és az alkalmazhatóság lehetőségei. Az összehasonlítás szempontjai a módszertan, a számítógépes támogatás, a CAD-CAE eszközök és az alkalmazhatóság. A következő fejezetben egyes kutatásoknál azonosított tulajdonságok táblázatos formában kerülnek összefoglalásra. Ennek a táblázatos elemzésnek az eredményei hozzájárulnak a későbbiekben kifejlesztésre kerülő CAD-CAE döntéstámogatási módszer fejlesztéséhez.

4. BEMUTATOTT MÓDSZEREK ELEMZÉSE

Ez a fejezet összehasonlítja különböző szempontok szerint a korábban ismertetett kutatásokat. Az alábbi táblázatokban azt lehet látni, hogy a vizsgált munkák a tervezési folyamat melyik fázisában alkalmaznak matematikai, adatbázis vagy számítógépes támogatást, mi a fő módszertan, milyen a CAD-CAE támogatás és milyen az ipari alkalmazás lehetősége. A tervezést segítő módszerek eltérő mértékben szerepelnek a koncepcionális, konstrukciós és részlettervezési szakaszokban. A számítógép használata elsősorban a koncepcionális és konstrukciós fázisokban van. A részlettervezésről inkább csak a háttérben történik említés. A CAD-CAE szoftverelemek bizonyos esetekben inkább csak megvalósítható lehetőségként jelennek meg.

Az 1. táblázat az alkalmazott módszert és a támogatott tervezési fázist szemlélteti. Látható, hogy az egyes modellek elsősorban melyik tervezési fázishoz kapcsolódnak és a kapcsolódó tervezési fázisban milyen tervezésmódszertani irányt képviselnek.

1. táblázat. Alkalmazott fő tervezési módszertan és támogatott tervezési szakasz összehasonlító áttekintése

Forrás	Alkalmazott fő tervezési módszertan	Támogatott tervezési fázis
Piros Attila	fuzzy módszer és kiértékelés, CFM	részlettervezés
Trautmann Laura	érzelemalapú parametrikus mintázatok, EmPatGen	koncepcionális
Gotthard Viktor	moduláris gyártósor tervezése, MTP	konstrukciós
Dömötör Csaba	természeti analógiák adatbázisa, TRIZ	koncepcionális
Szabó Kristóf	generatív tervezés, topológiai optimalizálás, SIMP	konstrukciós

Az 1. táblázat alapján Piros Attila fuzzy módszere és CFM eljárásai a részlettervezéshez, Trautmann Laura érzelemalapú parametrikus mintázatgenerálása és Dömötör Csaba természeti analógiákra épülő adatbázis építése a koncepcionális tervezéshez kapcsolódik. Gotthard Viktor moduláris gyártósortervezése, illetve Szabó Kristóf generatív tervezési és topológia optimalizálási módszere pedig a konstrukciós tervezéshez kapcsolható.

A 2. táblázat a számítógépes támogatás típusát és a használt eszközeit foglalja össze: bemutatja, hogy a modellek milyen típusú szoftveres, digitalizált vagy CAD-CAE eszközt használnak a tervezés támogatásához.

2. táblázat. Számítógépes támogatás típusa és az alkalmazott eszközök összehasonlító áttekintése

Forrás	Számítógépestámogatás típusa	Alkalmazott eszköz
Piros Attila	fuzzy-alapú számítási és kiértékelési támogatás	CFM, tagsági függvények, MATLAB programkódok
Trautmann Laura	érzelemalapú parametrikus mintázatgenerálás fuzzy módszerrel	EmPatGen, MATLAB, PTCCreo, GIMP, Mamdani rendszer
Gotthard Viktor	elemkönyvtár- és célprogram-alapú tervezéstámogatás	MTP, EKR, SA, SA-EKR mátrix, SAP kapcsolat, BOM és CAD generálás
Dömötör Csaba	adatbázis- és katalógus-alapú megoldáskeresés	Microsoft szoftver csomag, Microsoft Access
Szabó Kristóf	generatív tervezés és topológiai optimalizálás	CAD beépülő modulok, SIMP, mátrixok és paraméterek

A 2. táblázatban látható, hogy Piros Attila kutatásában fuzzy kiértékelés és tagsági függvények, illetve MATLAB programkódok, Trautmann Lauránál EmPatGen, MATLAB, PTCCreo, GIMP és Mamdani rendszer, Gotthard Viktor esetében MTP, EKR, SA, SA-EKR mátrix, SAP kapcsolat, BOM és CAD generálás, Dömötör Csaba munkájában Microsoft Access, illetve Szabó Kristóf tekintetében CAD beépülő modulok, SIMP, mátrixok és paraméterek jelennek meg.

A 3. táblázat a használt CAD-CAE eszközöket és az ezek által támogatott tervezési szakaszokat ismerteti. Az egyes modellekben különböző mértékben jelenik meg ezeknek az eszközöknek a használata és a támogatott tervezési fázisok is különbözőek.

3. táblázat. CAD-CAE eszközök és támogatott tervezési fázis összehasonlító áttekintése

Forrás	CAD-CAE eszközök	Támogatott tervezési fázis
Piros Attila	CFM, MATLAB, digital mock-up	részlettervezés
Trautmann Laura	EmPatGen, MATLAB, PTCCreo, GIMP	koncepcionális
Gotthard Viktor	MTP, SAP, BOM és CAD modellek generálása	konstrukciós
Dömötör Csaba	Microsoft Access	koncepcionális
Szabó Kristóf	SIMP, optimalizálási CAD-CAE beépülő modulok	konstrukciós

A 3. táblázat szerint Piros Attilánál CFM, MATLAB és digital mock-up, Trautmann Laura esetében EmPatGen, MATLAB, PTCCreo és GIMP, Gotthard Viktor munkájában MTP, SAP, BOM és CAD modellek generálása, Dömötör Csaba kutatásában Microsoft Access, illetve Szabó Kristófnál SIMP és optimalizáláshoz használható CAD-CAE beépülő modulok szerepelnek.

Az 4. táblázat az ipari alkalmazhatóságot és a fejlesztési lehetőségeket mutatja be. Alacsony az alkalmazhatósága azoknak, amik elsősorban elméleti, módszertani vagy koncepcionális modellekkel dolgoznak és további fejlesztés kell az ipari alkalmazásukhoz. Közepes szintűek azok a modellek, amik használnak szoftvert vagy adatbázist is. A munka ipari alkalmazhatóságú magas, ha az adott kutatás már az iparhoz, mérnöki munkafolyamathoz vagy a vállalati rendszerhez is szorosan kapcsolódik. Piros Attila módszere valós műszaki és ipari példákon ellenőrzött, de az ipari elterjedése még korlátozott. Trautmann Laura elemzése a formák és mintázatok tervezését támogatja, de további fejlesztés szükséges a gyártáshoz és automatizáláshoz. Gotthard Viktor tanulmánya a célgépek tervezéséről szól. Dömötör Csaba módszertana a koncepcionális tervezési fázist támogatja, Szabó Kristóf kutatása pedig a generatív tervezést és topológiai optimalizálást.

4. táblázat. Ipari alkalmazhatóság és fejlesztés lehetőségei

Forrás	Ipari alkalmazhatóság	Fejlesztés lehetőségei
Piros Attila	fuzzy módszer alkalmazása valós műszaki és ipari példákon	módszer ipari elterjedtsége korlátozott
Trautmann Laura	egyedi termékek tervezése, formák, dekorációk és mintázatok tervezése	ipari gyártáshoz és automatizált projektekhez további fejlesztés szükséges
Gotthard Viktor	egyedi gyártósorok, célgépek és modulok tervezése, ajánlatadás és költségbecslés támogatása	speciális modulcsoportok bővítése a folyamatban, további fejlesztés emberi tényező csökkentéséhez
Dömötör Csaba	koncepcionális tervezési fázis támogatása a mérnöki munkafolyamatban	katalógus bővítése, stabilitás és a nyílt hozzáférés megoldása
Szabó Kristóf	generatív tervezés és topológiai optimalizálás, műszaki és gazdasági szempontok értékelése	kifáradási és élettartam számítások és a rangsor robusztusságának fejlesztése szükséges

A bemutatott táblázatok jól definiálják, hogy a vizsgált modellek a tervezésmódszertan melyik területén alkalmazhatók nagy hasznossággal.

5. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány a budapesti és a miskolci tervezőiskolák tervezésmódszertani kutatási eredményeit elemzi. Az elemzés arra keresi a választ, hogy mi a módszertan fókusza, milyen a számítógépes támogatás típusa, melyik a CAD-CAE eszközökkel leginkább támogatott tervezési fázis, mi a digitalizáltság típusa és milyen mértékű a módszer ipari alkalmazhatósága.

A vizsgált kutatómunkák közös jellemzője az olyan klasszikus tervezésmódszertani művekre építő szisztematikus tervezés, mint Pahl és Beitz, Roth, Hubka és Eder, Koller, Altshuller, Kesselring vagy Lindemann. Az elemzésben részt vevő kutatások további közös elemei a követelmények megismerése, a funkcióstruktúra létrehozása, a megoldásváltozatok képzése, kiértékelése és kiválasztása. Az eltérések elsősorban a támogatott tervezési fázisban és a digitális módszer típusában tapasztalhatók.

A vizsgálat során másféle módszertant, többféle szakaszban és különböző támogatási formában használnak.

Az összehasonlítás alapján a fő különbségek úgy azonosíthatók, hogy az egyes kutatások melyik tervezési fázist segítik, illetve milyen típusú digitális és számítógépes támogatást alkalmaznak. Ezek a módszerek a tervezési fázis több szakaszában is megjelennek a klasszikus tervezésmódszertani elemek mellett is. A kutatások alapján a számítógépes támogatás nemcsak a közvetlen CAD-CAE modellezést és szimulációt jelentheti. Adatbázisokkal, algoritmusokkal, parametrizálással és más módszerekkel is támogatható a tervezési folyamat, ezért külön kell vizsgálni a digitalizáltság és a CAD-CAE integráció jellemzőit és mértékét.

A kutatásokban azonosítható több egymás mellett használt módszer is, nincs egyetlen domináns magyar tervezésmódszertani irány. A klasszikus módszertan használata kiegészül a meglévő munkafolyamat számítógépes támogatásával is. Az öt vizsgált kutatás nem mutat egységes módszertani fejlődési irányt, hanem inkább egymással párhuzamos és különböző tervezési problémákra specializált megoldásokat dolgoztak ki.

A kutatás további célja az összehasonlítás bővítése más magyar tervezőiskolák kutatási eredményeivel is, illetve egy parametrikus CAD-CAE döntéstámogatási rendszer megalkotása. Ennek a későbbi keretrendszernek a kidolgozásához hasznosak lehetnek az összegyűjtött trendek, módszerek és kutatási irányok.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány részletesen áttekinti az utóbbi évek néhány tervezésmódszertani témájú magyarországi kutatási eredményét.

A tanulmányozott kutatómunkáknak közös tervezésmódszertani alapjai vannak, de a számítógépes támogatás eszközrendszerét eltérő módszerekkel és különböző tervezési fázisokban használják. Ez a támogatás a CAD-CAE modellezés és szimuláció mellett tudásbázis létrehozását, elemkönyvtárak felépítését, optimalizálási eljárásokat vagy akár az egész életciklusra kiterjedő nyomon követést is jelenthet. A magyar tervezésmódszertani munkákban jelen vannak a klasszikus módszertani alapok, de kiegészülnek több számítógéppel támogatott folyamattal.

A kutatási témák fókuszai Piros Attila kutatásában a fuzzy kiértékelés, Trautmann Lauránál az érzelemalapú parametrikus mintázatgenerálás, Gotthard Viktor esetében a moduláris gyártósortervezés, Dömötör Csaba munkájában a természeti analógiák adatbázis-alapú kezelése, Szabó Kristóf tekintetében pedig a generatív tervezés és topológiai optimalizálás.

A cikk azonosítja a kutatások közös és eltérő számítógépes támogatási módszereit. Ezekből több összefoglaló táblázat is készült. Ezek az eredmények megfelelő kutatási alapot adhatnak későbbi CAD-CAE alapú tervezésmódszertani eszközök kutatásához.

7. SUMMARY

The study provides a detailed review of several recent Hungarian research results in the field of engineering design methodology.

The examined research works have common foundations in engineering design methodology, but these use different methods and different types of computer-aided supporting tools and in different phases of the design process. Besides CAD-CAE modelling and simulation, this support can mean the creation of knowledge bases, development of component libraries, optimization procedures, and even lifecycle tracking. Classical methodological foundations are present in the Hungarian design methodology research works, but they are complemented by several computer-aided processes.

The main research topics are fuzzy evaluation in the work of Attila Piros, emotion-based parametric pattern generation in the research of Laura Trautmann, modular production-line design in the work of Viktor Gotthard, databased management of natural analogies in the research of Csaba Dömötör, and generative design and topology optimization in the work of Kristóf Szabó.

The paper identifies the common and different computer-aided support methods used in the examined research works. Several summary tables were created from these results. These results can provide a proper research basis for future research on CAD-CAE-based engineering design methodology tools.

8. IRODALOM

[1] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, K.-H. Grote, *Engineering Design: A Systematic Approach*, 3rd ed. London, U.K.: Springer, 2007, https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2

[2] Attila Piros, *Fuzzy alapú kiértékelő módszer alkalmazása a konstrukciós tervezésben,* PhD. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary, 2012

[3] Laura Trautmann, *Érzelem-alapú geometrikus mintázat fejlesztése,* PhD. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary, 2021

[4] Viktor Gotthard, *Moduláris felépítésű gyártósorok tervezésének elmélete és gyakorlata*, PhD. értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Hungary, 2008

[5] Csaba Dömötör, *Természeti analógiák adatbázisa, statisztikai elemzése és alkalmazási módszerei a koncepcionális tervezésben*, PhD. értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc, Hungary, 2014

[6] Kristóf Szabó, *Generatív tervezési módszerek és algoritmusok feltárása különféle gyártási technológiákkal gyártható alkatrészek tervezéséhez,* PhD. értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc, Hungary, 2026

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.20

VOLT EGYSZER EGY STÚDIÓ

ONCE UPON A TIME THERE WAS A STUDIO

Dr. Siposs István[*]

1953 és 2000 között egy hangstúdió működött a Nehézipari Műszaki Egyetemen, későbbi nevén Miskolci Egyetemen. A rádióstúdiót a hallgatók építették és működtették, feladata, hivatása a kollégiumokban lakó hallgatók szórakoztatása volt. A vezetékes hálózaton keresztül sugárzott rádió aranykorában minden kollégiumi szobában külön hangszóró közvetítette a hallgatók saját készítésű adásait. A stúdiós csapat tagjai önkéntesen, szabadidejüket feláldozva, ellenszolgáltatás nélkül készítették a műsorokat, építették a technikát és formálták az adásstruktúrát. Az E/4-es kollégium 19-es szobájában kialakított stúdió nemcsak szórakoztatást nyújtott, hanem a campus egyik legkülönlegesebb, generációkon átívelő öntevékeny hallgatói közösségét is megteremtette. Az alapító tagok közé tartozott az akkori hallgató Vida András, később a csapat tanárvezetője volt éveken keresztül az akkor ifjú tanársegéd, Dr. Siposs István, hajdani gépelemesek.

A stúdiósok nagyon jó, összetartó csapatot alkottak, az oktatáson túli idejüket együtt, a stúdió falai között töltötték. Híreket sugároztak, kulturális műsorokat készítettek és közvetítettek. Az összetartást bizonyítja, hogy a közösségben számos életre szóló barátság, házasság is született. Az egykori stúdiósok közül egy nagyobb csapat a rádió megszűnését követően máig kapcsolatot tart, amelynek bázisa a 2000-ben Szolnokon létrehozott NME Nosztalgiastúdió.

A Nosztalgiastúdió tagjainak kezdeményezésére 2026 június 7-én egy stúdiótalálkozó keretében emléktáblát helyeztek el az E/4-es kollégium bejáratánál.



1. ábra Felavatott emléktábla a Miskolci Egyetem E/4-es kollégium bejáratánál.

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

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.21

SZEMÉLYRE SZABOTT KOPONYAORTÉZIS TERVEZÉSE ÉS ADDITÍV GYÁRTÁSA

DESIGN AND ADDITIVE MANUFACTURING OF A PERSONALIZED CRANIAL ORTHOSIS

Spekker Dorina, Dr. Bihari Zoltán***

ABSTRACT

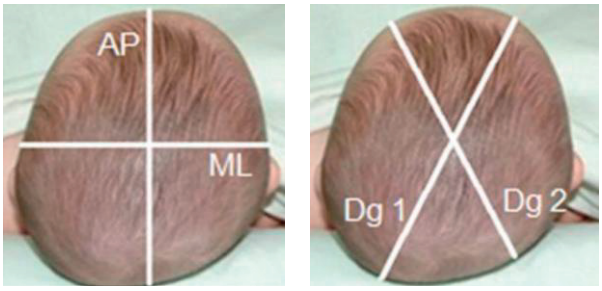
The article presents the process of designing and additively manufacturing a personalized cranial orthosis for the treatment of cranial deformities in infants. The head shape was digitized using optical 3D scanning, followed by point cloud processing and geometric correction using a reverse engineering approach. The effects of two different scanning resolutions, 0.5 and 1 mm, were also analyzed. Based on the corrected geometry, a 3D orthosis model was developed according to the anatomical characteristics and therapeutic requirements. During the design process, the aspects of fit, corrective function, ventilation, fixation, manufacturability, and safety were all taken into consideration. The prototype of the completed orthosis was successfully manufactured using the SLS process with the involvement of an external industrial partner, Rehab Észak Ltd. The presented workflow demonstrates that 3D scanning, digital design, and additive manufacturing can be effectively applied to the production of medical devices with customized geometries.

Keywords: *cranial orthosis, cranial deformity, 3D scanning, reverse engineering.*

1. BEVEZETÉS, EGÉSZSÉGÜGYI HÁTTÉR

A gyógyászati segédeszközök egyik fontos tulajdonsága, hogy sok esetben nem tömeggyártott, teljesen azonos termékekre van szükség, hanem az adott ember anatómiai sajátosságaihoz kell igazodni. Ez különösen igaz az ortézisekre, amelyek feladata lehet egy testrész rögzítése, tehermentesítése vagy korrigálása. [1,2]

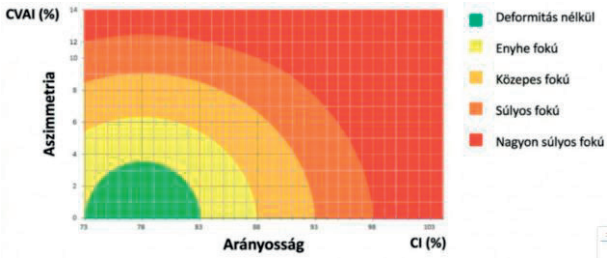
A csecsemők koponyája az első életidőszakban még alakítható, ezért külső erők hatására deformálódhat [3,4]. A fejalak számszerű leírására a cranial index (CI) és a cranial vault asymmetry index (CVAI) szolgál (1. ábra). A CI a koponya szélességének és hosszának arányából, a CVAI pedig a két átló különbségéből határozható meg. Ezek a mérőszámok a deformitás típusának és súlyosságának megítélésében is használhatók [5].



$$CI = \frac{ML\ (szélesség)}{AP\ (hossz)} \cdot 100 \qquad CVAI = \frac{Dg_{hosszabb}}{Dg_{rövidebb}} \cdot 100$$

1. ábra.
A fejdeformitási index mérése és paraméterei [5]

A CI és a CVAI értékek (és kombinációjuk) alapján megállapítható a deformitás típusa és súlyossági foka (2. ábra).



2. ábra. CVAI és CI értékek összefüggése [5]

A sisakterápia lényege, hogy a növekvő koponyának ott biztosítson helyet, ahol korrekció szükséges, miközben az egészségesebb területeken korlátozza a további növekedést. A szakirodalmi adatok alapján a kezelés eredményességében az életkor és a kezelés időtartama is fontos tényező [5,6]. A feladat megvalósítása ezért nem egyszerűen egy „sisak” elkészítését jelenti, hanem olyan egyedi geometria kialakítását, amely a kívánt növekedési irányt támogatja.

** egészségügyi mérnök MSc, Miskolci Egyetem*
*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet*

2. MŰSZAKI HÁTTÉR

A műszaki megvalósítás alapvető módszere a reverse engineering gyakorlati megvalósítása. Az eljárás lényege, hogy egy meglévő fizikai alakzatból digitális modell készül, majd ebből tervezési és gyártási folyamat indul. A koponyaortézis esetében ez azért különösen hasznos, mert a kiinduló geometria nem egy szabványos forma, hanem egy adott gyermek fejének alakja. A hagyományos gipszlenyomat csecsemők és kisgyermekek esetén nem jöhet szóba, e helyett optikai 3D szkennelés eljárással közvetlenül állítjuk elő a digitális háromdimenziós felületmodellt. A 3D szkennelés, a digitális tervezés és a 3D nyomtatás együtt olyan munkafolyamatot alkot, amelynél a fizikai és a digitális modell között megmarad a folyamatos kapcsolat [7].

Általánosságban is elmondható, hogy az additív gyártás előnye elsősorban nem a nagy darabszámú tömeggyártásban, hanem a kis sorozatú és egyedi termékek gazdaságos megvalósításában rejlik [8]. Áttekintve a különböző 3D nyomtatási eljárásokat és anyagokat, külön kitérve a biokompatibilis polimerekre, a sok lehetséges választás közül napjainkban a gyakorlatban a PA12 polimert és szelektív lézerszinterezést (SLS) alkalmazzák ezen ortézis gyártására. A választást az anyag mechanikai tulajdonságai, kopásállósága és a gyártási technológia geometriai szabadsága indokolja.

3. SZKENNELÉSI ELJÁRÁS

Az eljárás bemutatása érdekében – vizsgálati alany hiányában – egy enyhe *dolichocephaliát*, vagyis csónakfejűséget mutató polisztirol fej-bábu digitalizálását végeztük el (3. ábra).



3. ábra. Digitalizálandó alany (saját felvétel)

A folyamat során egy EinScanPro HD szkennerrel (4. ábra) két különböző felbontásban készítettünk 3D modellt a **Miskolci Egyetem Gép- és Termék-tervezési Intézet**ében.



4. ábra. Az alkalmazott szkenner (saját felvétel)

A fejforma digitalizálásánál a valóságban van egy korántsem elhanyagolható anomália. Nevezetesen, hogy a haj a strukturált fény mintázatát zavarja, sőt a megfelelő koponyageometriát is torzítja. Ezért élő páciens esetén a hajat egy direkt a szkenneléshez kifejlesztett sapka vagy kendő simítja le. A bábu esetében erre nem volt szükség. A tárgyasztalon elhelyezett úgynevezett markerek segítették a térbeli tájékozódást, miközben a bábu arcának jellegzetes pontjai elegendőek voltak ahhoz, hogy a szkenner a térben megfelelően tájékozódjon.

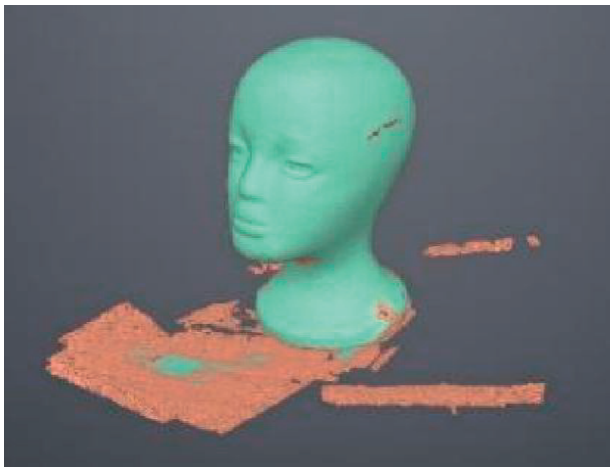
A szkennelést két különböző felbontással végeztük, 0,5 és 1 mm-t állítva be a készüléken. Érdekes tapasztalat volt, ugyanannak a fejformának az STL állománya 0,5 mm-es felbontásnál 61 MB, 1 mm-es felbontásnál viszont csak 11 MB lett. Ez jól mutatja, hogy a felbontás kiválasztása nem pusztán pontossági kérdés: az adat mérete a későbbi feldolgozás sebességére is hatással van.

1. táblázat. Szkennelési paraméterek

Szempont	0,5 mm	1 mm
Szkennelési felbontás	0,5 mm	1 mm
STL-adatméret	61 MB	11 MB
Fő következmény	részletesebb, nagyobb állomány	kisebb, könnyebben kezelhető állomány

A következő lépés a pontfelhő feldolgozása, a hiányzó részek javítása és a felesleges adatok eltávolítása volt. A nyers pontfelhőből háromszöghálót kellett létrehozni. A feldolgozás során a szoftver adta lehetőségeket kihasználva zajszűrés és simítás is történt (5. ábra). Ügyelni kellett arra, hogy a korrekció ne tüntesse el azokat a geometriai részleteket, amelyek a későbbi illeszkedéshez szükségesek. A mérési adatokból használható geometria előállítása ugyanúgy igen precíz mérnöki feladat, mint a későbbiek során maga a sisak megtervezése. A nyak egy része eltávolításra került, mert az ortézis szempontjából lényegtelen geometriai információkat tartalmazott. A felület lezárása után az STL kiterjesztésű állományt testként tudtuk beolvasni a munka következő fázisát jelentő CAD/CAM

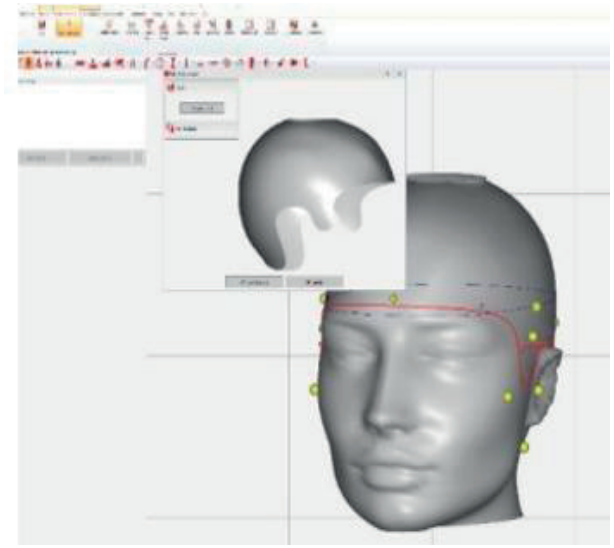
szoftvercsomagba. Valamennyi posztprocesszáló funkciót a scannerhez tartozó szoftvercsomag biztosította.



5. ábra. Nyers pontfelhő (saját felvétel)

4. HÉJSZERKEZET KIALAKÍTÁSA

A folyamat eredményeképpen kapott STL állományt a Rodin 4D Neo moduljában alakítottuk tovább (6. ábra). A deformált fejrészt a másik, egészséges oldalhoz igazítva szimmetrikussá korrigáltuk, majd kialakítottuk a sisak héjszerkezetét. A további tervezéshez a Rodin 4D Cube modul szolgált.



6. ábra. A szkennelt fej korrekciójának lépései (saját felvétel).

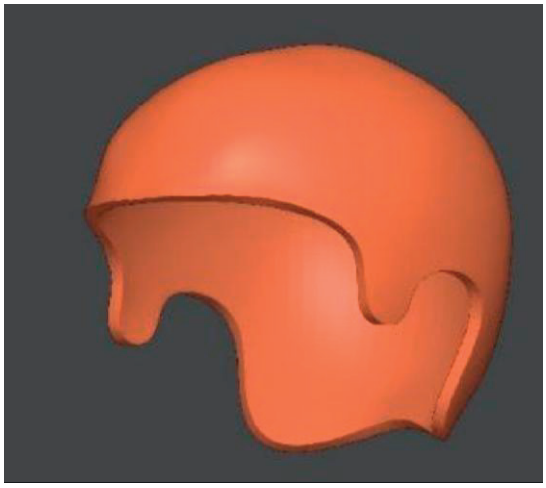
A sisak tervezésénél egyszerre kellett figyelni az illeszkedésre, a korrekciós működésre, a szellőzésre, a rögzítésre, a gyárthatóságra és a gyermek szempontjából fontos biztonsági részletekre. A teljes folyamat a Rehab Észak Kft. székhelyén, az ott dolgozó mérnökök és szakemberek támogatásával valósult meg. A sisak 3D modellje két részben készült, és a tervezés során a későbbi összefogást biztosító elemeket, valamint a belső perforált szerkezetet is ki kellett alakítani.

A Rodin 4D Neo modul egyik nagy előnye, hogy megmarad a fej alakjának módosítása, mint funkció, amit a későbbi tervezési lépésekben ki is kell, illetve lehet használni. A szkennelt felületet szoftveres simító eljárásnak vetettük alá.

A sisak működési elve, hogy a deformált résznél légrést hagyunk, míg a többi, fejjel érintkező felületen tökéletes érintkezést hozzunk létre. Így a fej növekedése a kívánt irányba történhet.

A végleges sisak belső felületén egy cserélhető bélés található, azért hogy a kezelés során ne kelljen minden növekedési fázisban új külső prototípust készíteni. Így csak a bélést kell cserélni a fej növekedése során. Ezt a tervezés során figyelembe kell venni a végleges geometria kialakításakor, amely egy úgynevezett offset eljárással történik a legvastagabb bélésanyagból, mint paraméterből kiindulva. Ez a belső réteg továbbá biztosítja a kényelmes viseletet, valamint megakadályozza a bőr esetleges irritációját.

A kontúr kialakításánál az volt a cél, hogy a sisak bélése minél nagyobb felületen érintkezzen a fejjel, ugyanakkor ne zavarja a szemöldököt, a mimikai izmokat, a fület, illetve a tarkó mozgását. Ezután a Rodin 4D Cube modulban folytatódott a tervezés. A héjszerkezetből 10 mm-es falvastagsággal testet hoztunk létre (7. ábra).



7. ábra. Test alkotása, falvastagság megadásával

A tervezés következő lépéseként be kellett építeni a rögzítést, a szellőzést és az esetleges esztétikai elemeket is. A sisak belső és külső héja között kialakított tér a levegő áramlását segíti. A sisakot végül két részre osztottuk, és a két fél összekapcsolásához ún. stiftek kerültek megtervezésre. A nyomtatási zsugorodás miatt 0,15%-os tűréssel számoltunk. A folyamat utolsó fázisában az élek lekerekítése történt meg, ezáltal a gyermek számára biztonságosabb és kényelmesebb felületet kialakítva.

5. ADDITÍV GYÁRTÁS ÉS A KÉSZ ORTÉZIS

A kész ortézis gyártásához PA12 polimert és EOS FORMIGA P 110 Velocis SLS berendezést alkalmaztunk a Rehab Észak Kft.-nél. A két fél-sisak egy nyomtatási szakaszban elkészült. Az SLS technológia során a por alapanyagot rétegenként terítik, majd lézersugárral alakul ki a kívánt keresztmetszet. Az eljárás egyik előnye, hogy nem szükséges külön támaszanyag, így összetett geometria alakzat is előállítható. A kész termék felületén a tervezett perforált szerkezet is jól látható (8. ábra).



8. ábra.
Az elkészült, SLS-sel gyártott sisakortézis (saját felvétel)

Az elkészült sisak a korábban említett belső, cserélhető szivacsréteggel egészül ki. A perforált kialakítás a kényelmet, a tömeg csökkentését és a szellőzést is szolgálja. A gyártási részben megadott adat szerint az SLS technológiával a tervezett mérethez képest körülbelül ±0,1% pontosság érhető el.

6. ÖSSZEGZÉS

A cikk végigköveti a gyakorlati reverse engineering folyamatot egy, a gyógyászatban alkalmazott ortézis tervezése közben. A fejforma digitalizálása, a pontfelhő feldolgozása, a deformitás korrekciója, a sisakhéj megtervezése, a funkcionális és esztétikai elemek kialakítása, majd a PA12 alapanyagú SLS-gyártás együtt egy teljes munkafolyamatot alkot.

A tervezési szakaszban kiderült, hogy a sisak geometriai kialakítása nem választható el a terápiás működéstől. A megfelelő kontakt, a deformált résznél hagyott tér, a fül és a mimikai területek elkerülése, valamint a szellőzés mind egyszerre jelentek meg tervezési feltételként.

Összességében elmondható, hogy a 3D szkennelés és az additív gyártás jól használható olyan gyógyászati segédeszköz esetén, amelynél az egyedi anatómiai illeszkedés alapkövetelmény. A technológia önmagában azonban teljesen nem automatizálható: szükség van megfelelő felbontású szkennelésre, geometriai feldolgozásra, egészségügyi szempontok figyelembevételére és gyártható konstrukcióra is. A munka egyik tanulsága, hogy a jó végeredmény a különböző területek – egészségügy, gépészet, digitális tervezés és gyártás – együttműködéséből jön létre.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk köszönet mondani Mihalik Gábor gépészmérnöknek (Rehab Észak Kft.), akitől a munka során rengeteg segítséget és szakmai tanácsot kaptunk. Továbbá köszönet illeti a Rehab Észak Kft. valamennyi munkatársát, többek között Honti Ádámot és Macsár Miklóst, akik szintén készségesen segítettek a munka [9] megvalósításában.

8. IRODALOM

[1] EÜM-RENDELET (2007): 14/2007. (III. 14.) *EüM rendelet a gyógyászati segédeszközökről.*

[2] MSZ EN ISO 9999/2022. *Segédeszközök. Osztályozás és terminológia.*

[3] UNNITHAN, A.; ORLANDO, D.: *Plagiocephaly.* National Library of Medicine, 2023.

[4] JUNG, B. K.; YUN, I. S.: *Diagnosis and treatment of positional plagiocephaly*. Archives of Craniofacial Surgery, 2020.

[5] LIPINA, R. et al.: *A cranial asymmetry and cranial index related study*, 2015.

[6] HASHEMI, H. et al.: *Cranial remolding orthosis for children with deformational skull deformities: A systematic review on the factors affecting success and duration of treatment.* World Neurosurgery X, 23, 2024.

[7] AMEERSING LUXIMON, Y. L.: *New technologies—3D scanning, 3D design, and 3D printing.* In: Handbook of Footwear Design and Manufacture, 2021.

[8] PAPP, O.. *Minden, amit a 3D-nyomtatásról tudni kell.* CNC Media, 2020.

[9] SPEKKER D.: *Korszerű additív gyártástechnológiák a gyógyászati segédeszközök terén*, Diplomamunka, Miskolci Egyetem Egészségtudományi Kar, 2026.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.22

ALKATRÉSZ TERVEZÉSE ÉS FEJLESZTÉSE SZIMULÁCIÓVEZÉRELT MÓDSZEREKKEL

PART DESIGN AND DEVELOPMENT USING SIMULATION-DRIVEN METHODS

*Szabó Kristóf**

ABSTRACT

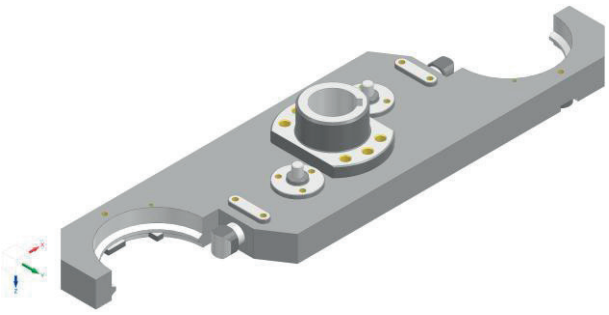
Engineering design aims to develop an optimal solution to a given technical problem. Optimization techniques are widely integrated into CAD systems, including topology optimization and the more recent generative design process, which offer effective solutions across an increasing number of industrial application areas. This article aims to present the main characteristics of computer-aided design processes and demonstrate their effectiveness through a case study.

1. BEVEZETÉS

A gyártóeszközök terén egyre nagyobb törekvés a környezetbarát üzemeltetés. Műszaki berendezések esetén a tömegcsökkentés elsődleges célja az alapanyag költség csökkentése, azonban mozgó alkatrészek esetén a működtetéshez szükséges energiaigény is csökkenhet.

1.1. A fejlesztendő alkatrész

A tanulmány egy automata szerszámellátó egység manipulátor kar fejlesztésével foglalkozik.



1. ábra A szerszámcserélő kar összeállítási modellje

Az 1. ábrán látható a szerszámcserélő kar 3D modellje, amelynek kialakítása a módszeres géptervezés szemléletét képviseli. [1-3] Az alkatrész tervezésére vonatkozó peremfeltételek alapján a szerszámbefogó típusa „HSK-A 100” és a két szerszámtengely közötti távolság 400 mm. Ehhez a kialakításhoz mechanikus működtetésű csapos reteszelő egység tartozik. Az kar befoglaló mérete hosszúság, szélesség és magasság sorrendben 540 mm, 140 mm és 29 mm. Az alkatrész alapanyaga DIN 1.0503 C45 közepes széntartalmú, nagy szilárdságú acél. Az alapanyag sűrűsége $\rho = 7{,}85$ g/cm^3, jellemző mechanikai tulajdonságai alapján a folyáshatár $Rp_{0.2} = 340$ MPa, a szakítószilárdság $Rm = 630$ MPa és a nyúlás $A = 16$ %. Az anyag rugalmassági modulusa $E = 206000$ MPa és a Poisson-tényezője $\nu = 0{,}3$. Csúsztató rugalmassági modulusa $G = 80000$ MPa. A konstrukció tömege $m_0 = 9{,}265$ kg és térfogata $V_0 = 1176770{,}7$ mm^3.

1.2. A fejlesztés módszere és folyamata

A fejlesztési feladat a topológiai optimalizálás (TO) és a generatív tervezés (GD) felhasználásával került megoldásra. A generatív tervezés (GD) a topológiai optimalizálásra (TO) épül, amely szimulációalapú módszerekkel olyan tervezési megoldásokat állít elő, amelyek megfelelnek az előre meghatározott követelményeknek és célkitűzéseknek. [4–6] A generatív tervezési munkafolyamat CAE-eljárásként integrálható a párhuzamos tervezési folyamatba. A hagyományos tervezési technikák esetén felhasználó által vezérelt iterációkra van szükség a koncepció végleges kidolgozásáig. Ezzel ellentétben a (TO) és a (GD) lényegesen gyorsabb és célirányosabb eredményeket biztosíthat. [7–8]

2. ESETTANULMÁNY

A cikkben bemutatott tanulmány a Siemens NX 2506 szoftver topológiai optimáló és generatív tervezési moduljában került megoldásra.

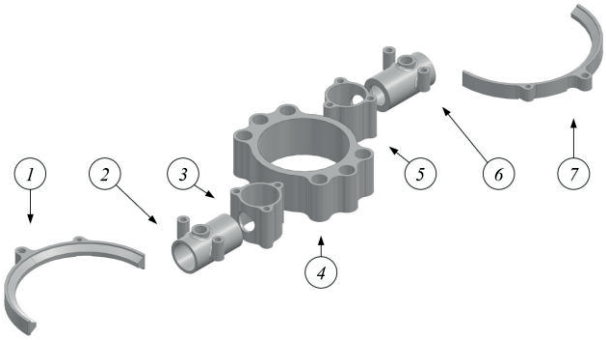
2.1. Tervezési térfogat

A folyamat első lépése a tervezési térfogat definiálása. Ez a térrész egy zárt térfogat, amely korlátozza az optimálás során fellépő anyagterjedést. Ezt a geometriai peremfeltételt jellemzően az alkatrész beépítettsége és a szomszédos komponensek helyzete határozzák meg. Az esettanulmányában az optimált alkatrész kiterjedése nem haladhatja meg az eredeti alkatrész geometriai méreteit.

* *mesteroktató, Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet*

2.2. Konstrukciós térfogatok

A tervezési tartományt konstrukciós geometriákkal kell kiegészíteni, amely anyagmegtartó vagy anyagkizáró feltételt biztosítanak a szimulációs modellben.



2. ábra A szerszámváltó kar konstrukciós térfogatai

A 2. ábrán látható a szerszámváltó kar anyagmegtartó konstrukciós térfogatai. Az alkatrész funkciói által megkövetelt csatlakozó felületeinek létrehozása során ügyelni kell a minimális anyaghasználatra, ezáltal hagyva helyet az optimált anyageloszlásnak. Az egymással szorosan összekapcsolódó funkciókat ajánlott azonos konstrukciós térfogatokba rendezni. A kialakított anyagmegkötések alapján új és informatív jellemzők származtathatók egy topológia optimált alkatrész számára. A korlátozásokból fakadó mérőszám a $g_{i(k)}$ generálási kötöttség, amely százalékos formában megadja a $V_{i(k)}$ konstrukciós terek által megkötött térfogatot a kiinduló V_0 tervezési térfogathoz képest:

$$g_{i(k)} = \left[\frac{V_{i(k)}}{V_0}\right] \cdot 100 \qquad (1)$$

A másik fontos jellemző a $g_{i(sz)}$ generálási szabadság, amely a $g_{i(k)}$ generálási kötöttség inverze:

$$g_{i(sz)} = \left[1 - \frac{V_{i(k)}}{V_0}\right] \cdot 100 \qquad (2)$$

A $g_{i(sz)}$ generálási szabadság százalékos formában megadja a $V_{i(k)}$ konstrukciós terek által megkötött térfogat függvényében a fennmaradt, a szoftver által szabadon generálható V_0 tervezési térfogatot.

2.3 Kényszerek

A különféle kényszerek az alkatrész szabadsági fokainak lekötésére szolgálnak, amelyeket a valós beszerelési állapot és működés mintájára kell megválasztani. Az alkatrész rögzítési pontjai a 2. ábrán látható 4-es számú elemen helyezkednek el. A hat darab furat palástfelületén a csap kényszer (Pinned Constraint) került alkalmazásra. A két homlokfelület fix kényszert hordoz.

2.4 Terhelések

Egy szerszám csereperiódusának mozgásviszonya körpályán való gyorsulásból, egyenletes körmozgásból és lassulásból áll. A terhelések maximuma a szakaszváltások pillanatában értelmezhető, ahol a centrifugális erő maximális értéket vesz fel és jelen van a szögszebesség változásáért felelős kerületi erő is. Az erők felületen megoszló terhelések, amelyek a szerszámbefogó (I), a radiális (II) és axiális (III) rögzítőcsapok, valamint a biztosító rugó (IV) kontakt felületein ébrednek. Az erők nagysága FEM analízis segítségével került meghatározásra, amelynek eredményét az 1. táblázat foglalja össze. Az (I) az 1-es konstrukciós térfogat kúpos felületén, a (II) a 2-es konstrukciós térfogat furatának palástfelületén, a (III) a 3-as konstrukciós térfogat furatának palástfelületén és a (IV) a 2-es test belső homlokfelületén hat. Az alkatrész tengelyszimmetrikus, amelynek forgástengelye a Z vektor, így az 5., 6. és 7. testre ható erők követik a szimmetria kényszerét és az X, Y irányú értékek előjelváltást kapnak.

1. táblázat A terhelések iránya és nagysága

Felület	Irány	Nagyság
I	x	-108,8
	y	-155,7
	z	-43; 312,3
II	x	-
	y	-0,5; 156,3
	z	1,4
III	x	-0,1; 33,1
	y	-0,1; 0,1
	z	-
IV	x	20
	y	-
	z	-

Az 1. táblázatban feltüntetett terheléseken túl a gravitációs erő felvétele szükséges, amelynek iránya a +Z vektor.

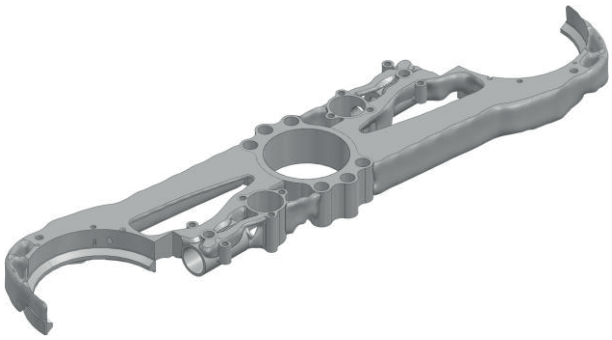
2.5 Megoldások generálása

A következőkben az esettanulmány a beállítások variálásával végez megoldáskeresést, amely jellemzően a geometriai kényszerekre vonatkozik. Ezek a feltételek vonatkoznak a különféle eljárásoknak megfelelő gyárthatóságra, amelyek a legnagyobb mértékben befolyásolják a generált forma milyenségét. A variációk túlzott sokaságának elkerülése miatt a keresési utat racionalizálni kell.

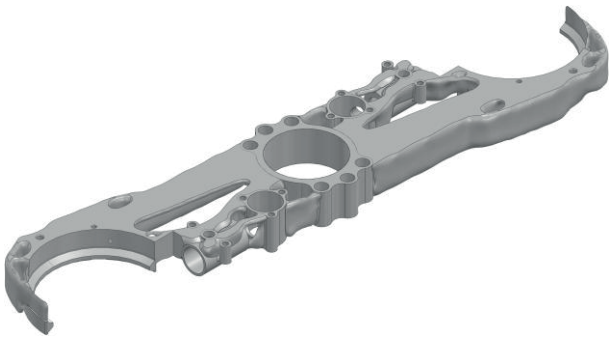
2. táblázat A megoldások generálásának variációja

Technológia	Anyag	Jel
öntés	C45	M1
	Al 7075-T6	M2
forgácsolás	C45	M3
	Al 7075-T6	M4
additív	C45	M5
	Al 7075-T6	M6

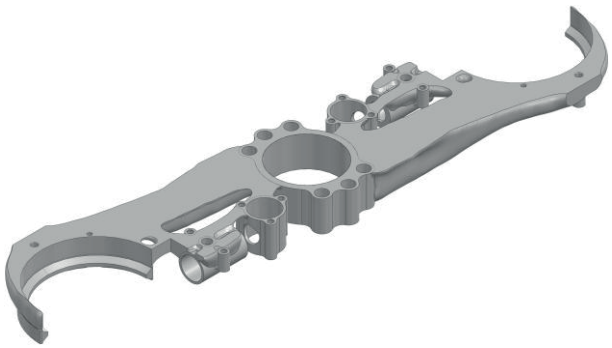
A 2. táblázat összefoglalja a generálni kívánt megoldásokat, amelyek különféle gyártási eljárásból fakadó geometriai megkötéssel vannak ellátva, amit a különböző alapanyagok felhasználása variál.



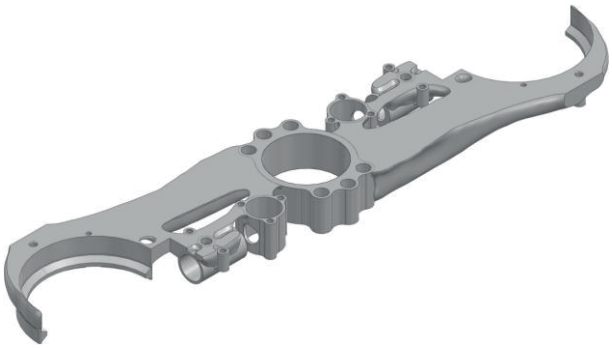
3. ábra M1 megoldás



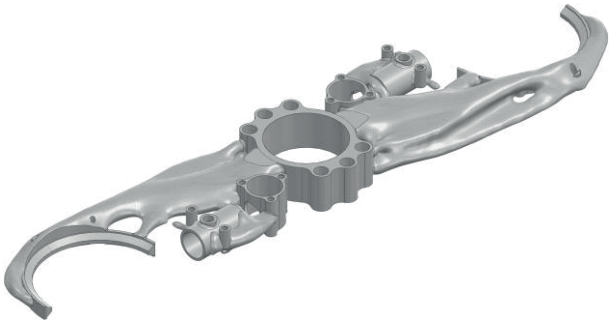
4. ábra M2 megoldás



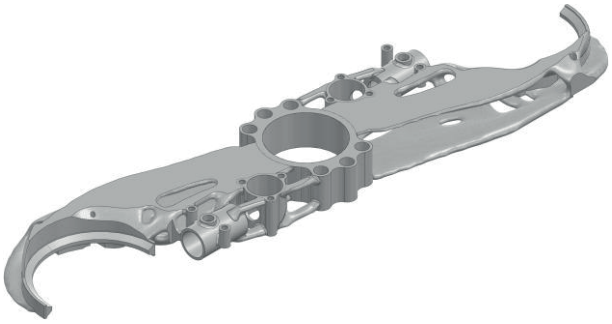
5. ábra M3 megoldás



6. ábra M4 megoldás



7. ábra M5 megoldás



8. ábra M6 megoldás

2.6 Szelektálás

A feltárt megoldások kiértékelésére az egydimenziós értékelemzési módszerek közül a Rang módszer került alkalmazásra, amely során az egyes konstrukciók rangsorolásra kerülnek egy-egy értékelési szempont alapján. A C1 értékelési szempont a relatív biztonság, amely megmutatja a generálás előtt megadott σ_{meg} megengedett feszültségérték és a generált konstrukcióban kialakuló $\sigma_{i(max)}$ maximális feszültség különbségét.

$$b_{i(r)} = \frac{\sigma_{meg}}{\sigma_{i(max)}} \geq 1 \qquad (3)$$

A különbség megmutatja, hogy terhelhetőség szempontjából mekkora tartalék van a rendszerben. A C2 értékelési szempont a tömegre vonatkozik A generált alkatrész az alapján kerül pontozásra, hogy százalékban

kifejezve, milyen mértékű $m_{i(cs)}$ tömegcsökkentést sikerült elérni az m_0 eredeti alkatrész tömegéhez képest.

$$m_{i(cs)} = \left[1 - \frac{m_{i(g)}}{m_0}\right] \cdot 100 \qquad (4)$$

A C3 értékelési szempont az anyagtakarékosságra vonatkozik, amely a $V_{i(g)}$ generált megoldás térfogatát az eredeti alkatrész V_0 térfogatához viszonyítva százalékos formában megmutatja, hogy milyen mértékű volt az $a_{i(cs)}$ anyagtakarékosság.

$$a_{i(cs)} = \left[1 - \frac{V_i}{V_0}\right] \cdot 100 \qquad (5)$$

A C4 értékelési szempont a mozgatáshoz szükséges energiabevitelre vonatkozik, amely az alkatrész forgási energiájából számítható.

$$E_f = \frac{m \cdot r^2 \cdot \omega^2}{2} = \frac{\theta \cdot \omega^2}{2} \qquad (6)$$

Az értékelési szempontok meghatározása után értékelésre kerülnek az egyes megoldások. A rangsor csökkenő jósági sorrendben került meghatározásra. Az egyes értékelő szempontok alapján kialakult rangsorokat összegezve kiválasztható a legjobb megoldás, amelyet a 3. táblázat mutat be.

3. táblázat A Rang módszer összesített eredményei

	C1	C2	C3	C4	∑
M1	3	4	2	5	14
M2	5	2	3	3	13
M3	2	5	4	6	17
M4	1	3	5	2	11
M5	6	6	6	4	22
M6	4	1	1	1	7

A 3. táblázat összesítése alapján az M6 megoldás rendelkezik a legkevesebb pontszámal, ebből adódóan az M6 tekinthető a legjobb konstrukciónak. Az M6 megoldás $b_{6(r)} = 4{,}2$ relatív biztonság mellett $m_{6(cs)} = 92{,}3$ % tömegcsökkentés és a6(cs) = 77,6 % anyagtakarékosságot ért el az eredti alkatrészhez képest. A mozgatásához szükséges energiaigény alapján $E_{f(cs)} = 98{,}62$ % csökkentést sikerült elérni az optimálás segítségével.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk rámutatott, hogy egy gyártóeszköz automatikus szerszámellátó egységének optimalizálása pozitív műszaki jellemzőket eredményez. A cikk egy esettanulmány segítségével mutatta be a topológiai optimalizáláson alapuló generatív tervezés munkafázisait. Az előállított megoldások négy értékelő szempont alapján a Rang módszer segítségével kerültek összehasonlításra, amely alapján előállt a legjobb megoldás. A tanulmány rávilágított arra, hogy megfelelő optimalizálási technikák alkalmazásával megfelelő szilárdsági viszonyok mellett anyagot és energiát lehet megtakarítani.

4. SUMMARY

The article demonstrated that optimizing the automatic tool supply unit of a manufacturing machine can lead to positive technical outcomes. A case study was used to present the stages of a generative design process based on topology optimization. The generated design solutions were compared using the Rank Method based on four evaluation criteria, which enabled the selection of the best-performing solution. The study highlighted that the application of appropriate optimization techniques can reduce material consumption and energy requirements while maintaining adequate structural strength.

5. IRODALOM

[1] TAKÁCS Gy., ZSIGA Z., SZABÓNÉ M. I., HEGEDŰS Gy.: Gyártóeszközök módszeres tervezése, Nemzeti Tankönyvkiadó, Miskolc, 2011

[2] NÉMETHNÉ ERDŐDI K.: Terméktervezési módszerek minőségügyi fejlesztése. PhD értekezés. NymE – CJDI. pp. 20-29, 2009

[3] BERCSEY T.; HORVÁTH I.: A korszerű géptervezés feltételei, módszerei és eszközrendszere, GÉP, Vol. 37., No 11., 1985

[4] All3DP: The best generative design software of 2022. https://all3dp.com

[5] ZHANG Y., WANG Z., ZHANG Y., GOMES S., BERNARD A.: Bioinspired generative design for support structure generation and optimization in additive manufacturing (AM). CIRP Ann 69(1):117–120., 2020

[6] BAGASSI S., LUCCHI F., DE CRESCENZIO F., PERSIANI F.: Generative design: advanced design optimization processes for aeronautical applications. In: 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS, 2016

[7] SHEA K., AISH R., GOURTOVAIA M.: Towards integrated performance-driven generative design tools. Autom Constr 14(2):253–264., 2005

[8] KARLBERG M., LÖFSTRAND M., SANDBERG S., LUNDIN M.: State of the art in simulation-driven design. International Journal of Product Development 18:68–87., 2013, https://doi.org/10.1504/IJPD.2013.052166

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.23

A TERMÉKTERVEZÉSI FOLYAMAT VERSENYKÉPESSÉGI KÉRDÉSEI

COMPETITIVENESS ASPECTS OF PRODUCT DESIGN PROCESS

Szabó Roland[*]*, Fehér Bálint*[**]*, Dr. Háry András*[***]*, Dr. Tóth Csilla*[****]

ABSTRACT

The methodology of product design, and in a broader sense, Product Engineering has undergone significant development in the recent period. The paper approaches the field from the point of view of the competitive aspects of product design. It discusses how the actual industrial challenges appear in the product design. An outline is given on a multi-aspect, practically used measurement method to measure the performance of the process.

1. BEVEZETÉS

A termékmérnöki szakterület (*Product Engineering*) felöleli a teljes folyamatot, egy új termék ipari igényének megfogalmazásától a koncepció felállításán, a részletes mérnöki tervezésen, méretezésen és szimuláción át a gyártásba kerülésig. Bár az elmúlt évtizedek technológiai fejlődése alapjaiban korszerűsítette a mérnöki eszköztárat, az ugrásszerűen növekvő műszaki komplexitás, a szigorodó környezetvédelmi előírások és a rövidülő piacra kerülési idő (*Time-to-Market*) korábban soha nem látott integrációs és folyamatmenedzsment kihívások elé állítják a vállalatokat.

A 20. század közepéig a terméktervezés jelentős részben a mérnökök egyéni tapasztalatára és gyakorlati tudására épült. Az 1960-as évektől kezdve azonban a gépek és berendezések jóval összetettebbé váltak, melynek következtében szükségessé vált, hogy a mérnökök tudatosan megtervezzék és egységesítsék a tervezési folyamatot is (Wynn és Clarkson, 2018). A korai elméletalkotók, köztük Asimow (1962) és Hall (1962), felismerték a fejlesztés kettős jellegét: egyrészt van egy több lépésből álló folyamat az ötlettől a gyártásig, másrészt az egyes szakaszokon belül folytonos és ismétlődő problémamegoldás zajlik. Ezt a fokozatosságot írta le Evans (1959), álláspontja szerint a mérnök lépésről-lépésre, iterálva haladva hangolja össze az egymástól függő műszaki adatokat a kívánt eredmény eléréséig. Az 1970-es években a német tervezésmódszertan szakemberei logikus lépésekbe rendezték a tervezést. Négy fő szakaszra osztották a munkát: a követelmények tisztázása, a koncepció meghatározása, az elrendezés kidolgozása, majd a részletes műszaki rajzok elkészítése. Ezt a módszert rögzítették az olyan mérnöki irányelvek is a későbbiekben, mint a VDI 2221, amely a műszaki termékek és rendszerek tervezési és fejlesztési folyamatát írja le. Bár ez a módszer rendet és átláthatóságot adott, a mindennapi ipari gyakorlatban gyakran túl merevnek bizonyult a gyorsan változó piaci igények kezelésére (Tomiyama et al., 2009; Wynn és Clarkson, 2018). Az 1980-as években aztán az éleződő piaci verseny és a japán autóipar hatékony (*Lean*) működése rámutatott a hagyományos megközelítések korlátaira. A korábbi gyakorlatban élesen elkülönült egymástól a tervezés és a gyártás folyamata, a szakterületek között korlátozott kommunikáció valósult csak meg (*Over the Wall*). Ezzel szemben a párhuzamos tervezés (*Concurrent Engineering*) lényege, hogy a gyártási és összeszerelési szempontokat már a folyamat elején figyelembe veszik, ezzel jelentősen csökkent a piacra kerülési idő és a drága újratervezések száma. A késői hibák megelőzésére terjedt el Cooper (1990) Stage-Gate kapurendszere, amely szigorú felülvizsgálatokhoz köti a továbblépést. Az ezredforduló után a szoftverek gyors fejlődésének következtében egyre inkább háttérbe szorultak a lineáris folyamatok. A szigorú lépések helyett előtérbe kerültek a szoftveriparból átvett, rövid ciklusokra és gyors visszajelzésekre épülő módszerek, melynek következtében a tervezési folyamat mára egy komplex, egymással szorosan összefüggő rendszerré fejlődött.

Napjainkban a tervezési folyamatmodellek fejlődése egy olyan pontra ért, ahol a tágabb fejlesztési környezetek (*Design Thinking*, rendszerszemlélet), a folyamatmodellek és az analitikus mérnöki módszertanok (*DfX, Lean*) együttes alkalmazása teremti meg a versenyképesség alapját (Stewart et al., 2020).

2. A TERMÉKTERVEZÉS KIEMELT MÓDSZERTANI ELEMEI NAPJAINKBAN

2.1. Modellalapú rendszermérnökség és mechatronikai integráció

A mai ipari termékek döntő többsége mechanikai elemek, elektronika és vezérlőszoftverek együttműködéséből áll. A korábbi fejlesztési

* *fejlesztő mérnök, TC-Zone Mérnöki Kft.*
** *mérnök hallgató, Széchenyi István Egyetem*
*** *ügyvezető, TC-Zone Mérnöki Kft.*
**** *stratégiai vezető, ZalaZONE Menedzsment és Kutató Kft.*

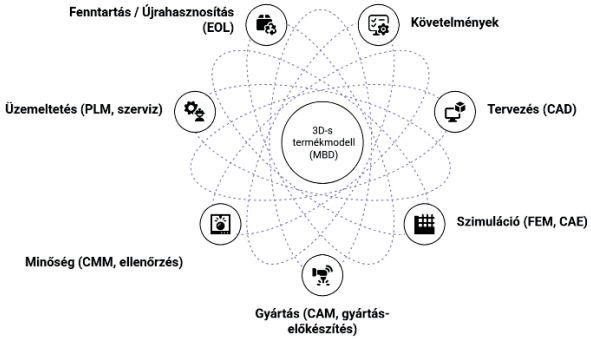
gyakorlatban az egyes termékblokkok jobbára egymástól független dokumentumokra és leírásokra támaszkodtak, ami az információk elvesztéséhez, félreértésekhez és tervezési, szerelési hibákhoz vezetett. A modellalapú rendszermérnökség (*Model-Based Systems Engineering* – MBSE) ezzel szemben egyetlen, központi digitális modellre helyezi a hangsúlyt, amely leírja a teljes rendszer követelményeit, szerkezetét, viselkedését a termék teljes életciklusán keresztül (INCOSE, 2014; Akundi és Lopez, 2021). A szabványos modellező nyelvek (*SysML* és ennek célzott kiterjesztései) közös kommunikációs alapot teremtenek a különböző szakágak között. Ezáltal az alkatrészek közötti kapcsolatok és a műszaki követelmények már a korai fázisban átláthatóvá válnak, kiküszöbölve az adatvesztést, megelőzve a költséges késői módosításokat.

2.2. Gyárthatóság, szerelhetőség és megbízhatóság tervezése

A terméktervezés másik alapvető területe a gyártási, üzemeltetési és biztonsági szempontok korai érvényesítése a tervezés során. A gyártás- és szereléshelyes tervezés *(Design for Manufacturing and Assembly – DFMA)* célja az alkatrészek számának csökkentése, a termékszerkezet egyszerűsítése és az összeszerelési idő csökkentése, ezáltal a költséghatékonyság növelése (Boothroyd et al., 2011; Juniani et al., 2022). Ezt egészíti ki a megbízhatóságközpontú *tervezés (Design for Reliability – DFR)*, amely a korábbi tapasztalatok és a hibamód-elemzés *(Failure Mode and Effects Analysis – FMEA)* segítségével feltárja a kritikus gyenge pontokat. A digitális végeselemes szimulációk *(Finite Element Methods – FEM)* alkalmazásával a mérnökök már a fizikai prototípusok legyártása előtt kellően pontosan ellenőrizni tudják a szerkezeti terhelhetőséget és a biztonsági tényezőket.

2.3. Digitális termékdefiníció és életciklus-menedzsment

A terméktervezés harmadik fontos pillérét napjainkban az adatok teljes életútra kiterjedő kezelése képezi a termékéletciklus-menedzsment *(Product Lifecycle Management – PLM)* keretében. Ennek technológiai alapja a modellalapú termékdefiníció *(Model-Based Definition – MBD)*, amely részben vagy egészben felváltja a hagyományos, nehezen kezelhető 2D-s, papíralapú rajzokat (Alemanni et al., 2011; Corallo et al., 2022). Az MBD megközelítésében a 3D-s CAD-modell tartalmazza a fő termékgyártási információkat is. Ez az átfogó modell szolgál a vállalat „egyetlen hiteles adatforrásaként” (Single Source of Truth), amely a tervezéstől a gyártáson és a minőségellenőrzésen át egészen a karbantartásig kíséri a terméket. Ez a folytonos digitális szál (Digital Thread) jelentősen lerövidíti az átfutási időt és csökkenti az adatvesztés lehetőségét a vállalati részlegek között.

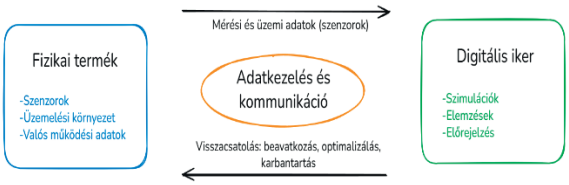


1. ábra: A modellalapú termékdefiníció és a digitális szál kapcsolata a termék életciklusa során

3. FEJLŐDÉSI IRÁNYOK ÉS TERVEZÉSI KIHÍVÁSOK

3.1. Adatvezérelt tervezés és digitális ikrek

Bár egy termék teljes életciklusa során rengeteg adat képződik, a hagyományos gyakorlatban a virtuális modellek és a már legyártott termékek között nem valósult meg közvetlen adatkapcsolat. Ennek feloldására egyre szélesebb körben terjed el a digitális ikrek (Digital Twin) alkalmazása, amely akár valós idejű, kétirányú kapcsolatot tud teremteni a fizikai termék és annak digitális megfelelője között. A digitális iker lehetővé teszi, hogy a korábbi termékgenerációk valós használatbeli tapasztalatai és a működési adatok közvetlenül visszajussanak az új koncepciók megalkotásába. A részlettervezés során a valós terhelési és környezeti adatok növelik a szimulációk pontosságát, a virtuális ellenőrzés (virtual verification) révén pedig a konstrukciós hibák még a sorozatgyártás előtt felismerhetők és javíthatók. Ez drasztikusan csökkenti a legyártott prototípusok számát, mérsékli a költségeket, és felgyorsítja a piacra kerülési időt (Tao et al., 2018).



2. ábra: A digitális iker adatkapcsolata a fizikai termékkel és a virtuális modellel

3.2. Mesterséges intelligencia és mély generatív modellek

A terméktervezés másik meghatározó iránya a mesterséges intelligenciára épülő tervezés térnyerése. A korábbi, kötött szabályrendszerekre épülő megoldásokkal szemben a mély generatív modellek (Deep Generative Models – DGMs), képesek nagy adathalmazokból önállóan, új szerkezeti megoldásokat létrehozni. Ezek az algoritmusok kiemelkedő hatékonysággal támogatják az anyageloszlás

optimalizálását, az áramlási formák kialakítását és az új anyagszerkezetek tervezését. Bár a terület előtt még sok kihívás áll - mint például a minőségi mérnöki adathalmazok hiánya, a fizikai gyárthatóság garantálása és a kreatív újdonság biztosítása -, az algoritmusok már ma is másodpercek alatt tárnak fel olyan optimális megoldásokat, amelyek manuális úton nehezen lennének elérhetők (Regenwetter et al., 2022).

3.3. Fenntartható és körforgásos terméktervezés

A növekvő nyersanyaghiány és a klímavédelmi előírások miatt a fenntarthatóság alapvető versenytényezővé vált, amely megköveteli a hagyományos, lineáris ipari modell meghaladását. A körforgásos tervezés (Circular Design) a termékek életciklusát két fő stratégia mentén szervezi át: az erőforráshurkok lassításával (slowing loops) és zárásával (closing loops). Előbbi a termékek élettartamának tudatos meghosszabbítását jelenti tartós konstrukciók, egyszerűbb javíthatóság, moduláris bővíthetőség és rekonstrukciós lehetőség révén, míg utóbbi az anyagok teljes körű újrahasznosítását célozza meg a szétszerelésre tervezés (Design for Disassembly) segítségével. Ez az irányzat szorosan összekapcsolódik az új üzleti modellekkel (mint a termékbérlés vagy a funkcióalapú szolgáltatások), biztosítva a gazdasági megtérülést és a környezeti terhelés csökkentését (Bocken et al., 2016).

4. GYAKORLATI SZEMPONTOK

4.1. A termékek tervezési ideje, mint kulcstényező

Egyes termékek tervezési ideje nagymértékben eltérhet, még látszólagos hasonlóságok ellenére is. A tervezési időt befolyásolja a termék összetettsége és környezetének fejlettségi állapota.

Egy termék összetettsége számos tényezőből fakadhat: méret, komplexitás, termék funkciói, stb. A tervezés során fokozott figyelmet kell fordítani a kereskedelmi forgalomban kapható építőelemek (lemezek, profilok stb.) méreteire, ennek alapján pedig tervezési töréspontokat kell kialakítani, ahol különféle megoldásokkal szükséges biztosítani az elemek csatlakozását. A méretből adódó tervezési többletidő mellett a hardverigény növekedése is fontos szempont, ugyanis a számítógép felszereltségétől függően, bizonyos modellméret felett a szoftver töltési ideje drasztikusan meg tud emelkedni, amely közvetlenül hatással van a teljes tervezési időre. A termék bonyolultságának növekedése is jelentős befolyásoló tényező, ugyanis a kritikus, bonyolult mechanikai elemek kivitelezése több időt vehet igénybe, valamint egyes esetekben további egyeztetésekre is szükség lehet a megrendelővel, és előfordulhat, hogy már meglévő elemeket kell optimalizálni, újratervezni a modellen.

A termék környezetének fejlettségi állapota különösen komplex rendszerek tervezésekor releváns, ahol több tervező párhuzamosan dolgozik a projekt különböző elemein. Időmegtakarítás céljából felmerülhet egy termék tervezésének megkezdése már akkor is, amikor még a termék környezete sincs végleges állapotban, ekkor viszont a csatlakozási pontok, külső méretek változása a tervezés későbbi fázisaiban is előfordulhat. Az így történő módosítások a kész modellt és gyártási rajzokat is érinthetik, ezzel kifejezetten negatívan befolyásolva a teljes tervezési időt.

4.2. AI eszközök a tervezési idő csökkentésére

A tervező szoftverekben ma már számos AI funkció rendelkezésre áll a legújabb verzióknál, úgymint a beépített AI funkciók, valamint az AI asszisztensek.

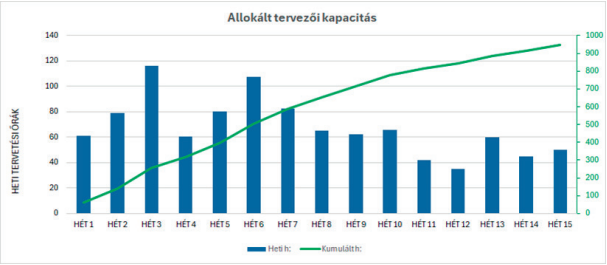
A beépített AI-támogatott funkciók gyakran integrált elemei a szoftvernek, egyszerűségüknek köszönhetően a korábban időigényes feladategységek „pár kattintásos” műveletekké válnak, viszont ehhez fontos a funkciók megfelelő ismerete, és az ennek megfelelő tervezés, már a kezdetektől. A beépített funkciók többek között alkalmasak hibás méretvonalak és kényszerek automatikus javítására, és kötőelemek optimális kiosztására; ezzel – különösen nagyméretű termékek esetén – jelentős tervezési időt spórolhatunk meg.

Az AI asszisztensek az újabb szoftververziókban érhetők el, a publikusan elérhető mesterséges intelligencia eszközökkel szemben nagy előnyük, hogy látják a termékmodellt és annak minden részegységét, ezáltal hatékonyabb válaszok megalkotására képesek.

5. A TERMÉKTERVEZÉSI FOLYAMAT MÉRÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

5.1. A kapacitás rendelkezésre állása

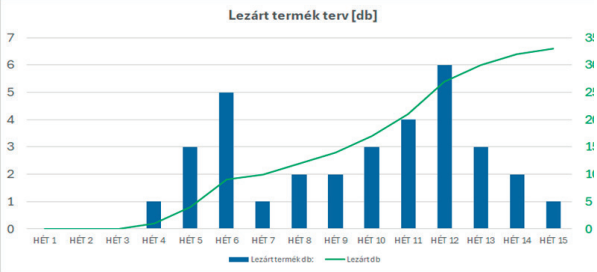
A terméktervezési folyamat alapvető mérőszáma a rendelkezésre álló kapacitás, amely függ a futó egyéb projektektől, a váratlan eseményektől, a terv korrekciós igényektől és természetesen a vevői elvárástól.



3. ábra: A tervezés allokált kapacitásának mérése (példa)

5.2. A tervezési kimenet monitorozása

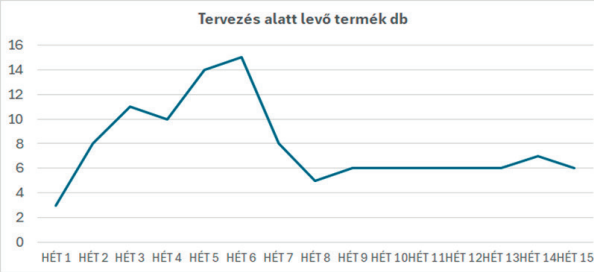
A tervezés kimenete az elkészült terv dokumentáció (pl. alkatrészrajzok), melynek monitorozása akár a lezárt tervek darabszáma vagy egyéb, a vevő által meghatározott mértékegység (pl. termék kg) is lehet.



4. ábra: A tervezési output mérése (példa)

5.3. A tervezési folyamat értékelése

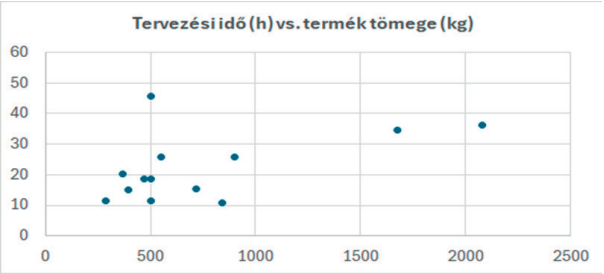
A tervezési folyamat egy projekten belül is egy "pipeline", amely egyszerre több, párhuzamosan futó tervezési munkát tartalmaz. A nyitott vs. lezárt tervezések mindenkori aránya jól mutatja a teljes folyamat "mozgékonyságát".



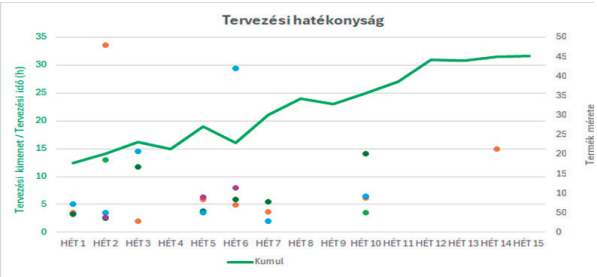
5. ábra: A tervezési pipeline mérése (példa)

5.4. A tervezés hatékonysági mérése

A tervezési folyamatnak lehetnek olyan belső indikátorai, amelyek már a hatékonyság felé mutatnak. Ennek egy formája az átfogó képet mutató tervezési idő vs. viszonyítási szám áttekintés. Az effektív hatékonyság pedig az egységnyi időre jutó outputot monitorozza (pl. tervezett darab vagy kg).



6. ábra: Átfogó tervezési hatékonyság mérése (példa)



7. ábra: Effektív tervezési hatékonyság mérése (példa)

6. MEGÁLLAPÍTÁSOK, GYAKORLATI JAVASLATOK

A tervezési folyamat mérésére tehát a többszempontú monitorozás nyújthat eszközt, amely dashboard jelleggel mutatja a teljes folyamat teljesítményét. Mint alapvető versenyképességi tényező. a tervezési hatékonyság javítására több lehetőség is van.

Ismételhetőségre, módosíthatóságra való törekvés: A tervezési folyamat kezdete során érdemes tisztázni azokat a kritikus méreteket, amelyek változhatnak a folyamat során. Ha ennek megfelelően építjük a modellt, kevésbé lesz időigényes egy esetleges módosítás. Amennyiben több hasonló termék tervezése szükséges, akkor az első termék kiváló alapul szolgálhat a későbbiekben. Ha a termékek közötti változásokat összegezzük, és ennek megfelelően alakítjuk ki a modell alapjait, akkor a következő termékek tervezési idejét drasztikusan csökkenteni tudjuk. A terméken belül szintén törekedni kell a lehető legkevesebb eltérő alkatrészre.

Szimmetriatengelyek felismerése és alkalmazása: Amennyiben a termék valamely tengelyre szimmetrikus, ennek megfelelően elég az egyik oldalt megtervezni, ezzel tovább csökkentve a tervezési időt.

Termék felbontása alegységekre: Nagyobb méretű termékeknél előfordulhatnak ismétlődő alegységek (pl. ajtó), ezeket alösszeállításként érdemes kezelni, így a szükséges módosításokat elegendő elvégezni egy alegységen.

Peremfeltételek letisztázása a tervezési folyamat megkezdésekor: A tervezés megkezdése előtt minél alaposabban szükséges dokumentálni a termék peremfeltételeit, ezzel elkerülhetők későbbi félreértések, javítások.

7. HOGYAN TUDJA TÁMOGATNI A TERMÉKTERVEZÉS VERSENYKÉPESSÉGÉT A KÖRNYEZŐ INNOVÁCIÓS ÖKOSZISZTÉMA?

7.1. A terméktervezés komplexitása és a tudásbázisok integrációja

A terméktervezés versenyképessége napjainkban nem kizárólag a vállalat belső mérnöki kompetenciáitól és a tervezési folyamat hatékonyságától függ, hanem attól is, hogy a szervezet mennyire képes hozzáférni a külső tudásforrásokhoz, és azokat saját innovációs tevékenységébe integrálni. A termékek növekvő műszaki komplexitása, a technológiai fejlődés gyorsulása és a piaci igények változékonysága fokozza a különböző szakterületek és szervezetek közötti együttműködés jelentőségét. Adner (2017) az innovációs ökoszisztémát egymástól kölcsönösen függő szereplők és tevékenységek rendszereként értelmezi, amelyben a versenyképes értékteremtés feltétele az egyes hozzájárulások összehangolása. E megközelítés alapján a terméktervezés eredményessége és hatékonysága a

vállalati képességek mellett az ökoszisztéma tudásbázisainak elérhetőségétől is függ.

A termékmérnöki tevékenység fejlődésével a terméktervezés a hagyományos konstrukciós feladatokon túlmutató, több tudományterületet integráló folyamattá vált. A műszaki megvalósíthatóság mellett a gazdaságossági, gyárthatósági, fenntarthatósági és piaci szempontok összehangolása is egyre meghatározóbb.

7.2. A terméktervezést támogató innovációs ökoszisztéma modellje

A komplexitás kezeléséhez különböző típusú tudások összehangolására van szükség. A ZalaZONE Technológiai Park innovációs ökoszisztémájának modelljét (Tóth-Háry, 2024) alapul véve három, egymással összekapcsolódó tudásbázist különíthetünk el: az ipari tudást, a tudományos hátteret és a lokalizált, helyi tudást. Ezek nem egymástól elszigetelt erőforrások, hanem az ipari és tudományos együttműködés, valamint a helyi kompetenciák integrációjának alapjai. A modell a Triple Helix megközelítéssel hozható összefüggésbe, amely az egyetemek, az ipar és a kormányzati szereplők közötti interakciókat tekinti az innováció fontos forrásának (Etzkowitz & Leydesdorff, 2000).



8. ábra: Innovációs ökoszisztéma keretmodell

Az ipari tudásbázis a vállalatoknál, fejlesztőközpontokban felhalmozott tapasztalatokat, technológiai ismereteket és piaci követelményeket foglalja magában. A tudományos háttér az egyetemek, kutatólaboratóriumok és -csoportok eredményeire, kompetenciáira és technológiai fejlesztéseire épül. A lokalizált tudás a térségben rendelkezésre álló erőforrásokhoz, kompetenciákhoz és tapasztalatokhoz kötődik. E három tudásbázis összekapcsolása lehetővé teszi, hogy a tudományos eredmények ipari alkalmazásokká váljanak, a vállalati problémák kutatási kérdéseket generáljanak, a helyi kompetenciák pedig támogassák a megoldások gyakorlati bevezetését.

7.3. Specialisták, generalisták és tudásalapú együttműködések a terméktervezés során

A terméktervezés eredményességében meghatározó a specialisták és generalisták kompetenciáinak összehangolása. A specialisták egy-egy technológiai terület mély ismeretével járulnak hozzá a részproblémák megoldásához, míg a generalisták a különböző szakterületek, műszaki követelmények és üzleti célok integrációját segítik. A két kompetenciatípus együtt teszi lehetővé, hogy a részterületeken kidolgozott megoldások a teljes termék szintjén is koherens rendszert alkossanak. A keresztfunkcionális integráció és a tudásmenedzsment kapcsolatát vizsgáló kutatások rámutatnak e képességek termékfejlesztési jelentőségére (Sherman et al., 2005).

Az innovációs ökoszisztéma kiterjeszti ezt az integrációt a szervezeti határokon túlra. Az egyetemek és kutatóintézetek tudományos és technológiai kompetenciákat, a vállalatok ipari tapasztalatot és piaci ismereteket, a helyi szereplők pedig sajátos erőforrásokat és kapcsolati hálókat biztosíthatnak. A beszállítók és fejlesztési partnerek tudásának bevonása új megoldásokat eredményezhet, ugyanakkor a külső ismeretek hasznosítása tudatos koordinációt igényel (Rosell et al., 2017). A technológiai parkok innovációs szerepe ezért nem pusztán a szereplők fizikai közelségében, hanem a közöttük kialakuló érdemi tudásáramlásban ragadható meg (Albahari et al., 2023).

A tudásalapú együttműködés csökkentheti a fejlesztési bizonytalanságot, elősegítheti a prototípusok tesztelését és javíthatja az erőforrások kihasználását. Az ökoszisztéma versenyképességi hozzájárulása ezért a partnerkapcsolatok minőségétől, a tudás befogadásának képességétől és a közös fejlesztési célok összehangolásától függ.

A korábbiakban tárgyalt mérési szempontok a külső tudás hasznosulásával is kiegészíthetők. Vizsgálható például a közös fejlesztések aránya, a prototípus-iterációk száma, a tervezési módosítások gyakorisága, valamint az új termék piacra kerüléséhez szükséges idő. Ezek a mutatók segíthetnek feltárni, hogy az ökoszisztéma kapcsolatai milyen mértékben járulnak hozzá a terméktervezés hatékonyságához.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A saját termékek, önálló termékfejlesztés vagy csupán a nagyobb termékfejlesztési szegmens irányába történő törekvés a vállalati piacképességi törekvések fontos eleme. Ennek egyik megfontolása az az értéklánc-ugrás, amely a saját termék (vagy résztermék), illetve az ehhez kapcsolódó erőforrások és terméktervezési kompetencia megjelenésével jár együtt. Ez a fajta stratégiai irány azonban két oldalról is nyomás alatt van; egyrészt a saját termék piaci pozícionálása, másrészt a terméktervezés, mint alkotó tevékenység belső hatékonysága.

A terméktervezést a Product Engineering szakterületen belül elhelyezve, és a termékmérnökség aktuális fejlődési

trendjeit értve, kirajzolhatók a tervezés versenyképességi keretei is. A cikk bemutat egy iparban kipróbált és sikeresen alkalmazott többszempontú indikátor rendszert. A terméktervezés versenyképességének tárgyalása nem nélkülözheti a terület beágyazását a környezetbe, amelynek innovációs ökoszisztéma-fókuszú elhelyezése zárja a témát.

9. SUMMARY

Striving for own products, independent product development or just towards the larger product development segment is an important element of the company marketability efforts. One of the considerations related to this is the value chain leap that accompanies the appearance of own product (or sub-product) and the related resources and product design competence. However, this kind of strategic direction is under pressure from two sides; on the one hand, the market positioning of the own product, and on the other hand, the internal efficiency of product design as a creative activity.

By placing product design within the field of Product Engineering and understanding the current development trends of product engineering, the competitiveness framework of design can also be drawn. The paper presents a multi-criteria indicator system that has been tried and successfully applied in the industry. The discussion of the product design competitiveness of cannot be without embedding the area in the environment, represented by the innovation ecosystems.

10. IRODALOM

[1] Adner, R. (2017). Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy. Journal of Management, 43(1), 39–58. https://doi.org/10.1177/0149206316678451

[2] Akundi, A., & Lopez, V. (2021). A review on application of Model Based Systems Engineering to manufacturing and production engineering systems. Procedia Computer Science, 185, 101-108. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.05.011

[3] Albahari, A., Barge-Gil, A., Pérez-Canto, S., & Landoni, P. (2023). The effect of science and technology parks on tenant firms: A literature review. The Journal of Technology Transfer, 48, 1489–1531. https://doi.org/10.1007/s10961-022-09949-7

[4] Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. Journal of Industrial and Production Engineering, 33(5), 308-320. https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124

[5] Corallo, A., Del Vecchio, V., Lezzi, M., & Luperto, A. (2022). Model-Based Enterprise approach in the product lifecycle management: State-of-the-art and future research directions. Sustainability, 14(3), 1370. https://doi.org/10.3390/su14031370

[6] Etzkowitz, H., & Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: From National Systems and "Mode 2" to a Triple Helix of university–industry–government relations. Research Policy, 29(2), 109–123. https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4

[7] Juniani, A. I., Singgih, M. L., & Karningsih, P. D. (2022). Design for Manufacturing, Assembly, and Reliability: An integrated framework for product redesign and innovation. Designs, 6(5), 88. https://doi.org/10.3390/designs6050088

[8] Regenwetter, L., Nobari, A. H., & Ahmed, F. (2022). Deep Generative Models in engineering design: A review. ASME Journal of Mechanical Design, 144(7), 071704. https://doi.org/10.1115/1.4053859

[9] Rosell, D. T., Lakemond, N., & Melander, L. (2017). Integrating supplier knowledge in new product development projects: Decoupled and coupled approaches. Journal of Knowledge Management, 21(5), 1035–1052. https://doi.org/10.1108/JKM-10-2016-0438

[10] Sherman, J. D., Berkowitz, D., & Souder, W. E. (2005). New product development performance and the interaction of cross-functional integration and knowledge management. Journal of Product Innovation Management, 22(5), 399–411. https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2005.00137.x

[11] Stewart, S., Giambalvo, J., Vance, J., Faludi, J., & Hoffenson, S. (2020). A Product Development Approach Advisor for navigating common design methods, processes, and environments. Designs, 4(1), 4. https://doi.org/10.3390/designs4010004

[12] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(9-12), 3563-3576. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1

[13] Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 58(2), 543-565. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.003

[14] Tóth, Cs., Háry, A. (2024): A comprehensive model for innovation ecosystems. Triple Helix Journal, Special Issue, 1–22. https://doi.org/10.1163/21971927-bja10050

[15] Wynn, D. C., & Clarkson, P. J. (2018). Process models in design and development. Research in Engineering Design, 29(2), 161-202. https://doi.org/10.1007/s00163-017-0262-7

[16] Alemanni, M., Destefanis, F., & Vezzetti, E. (2011). Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 52(1-4), 1-14. https://doi.org/10.1007/s00170-010-2759-y

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.24

ANIZOTRÓP ANYAGMODELL ÉPÍTÉSE KORLÁTOZOTT ANYAGADATOKBÓL FDM-NYOMTATOTT PLA VIZSGÁLATÁHOZ

BUILDING AN ANISOTROPIC MATERIAL MODEL FROM LIMITED MATERIAL DATA FOR THE ANALYSIS OF FDM-PRINTED PLA

Szabó Sándor Imre, Dr. Bihari Zoltán***

ABSTRACT

Parts produced by material extrusion (FDM/FFF) are built layer by layer, resulting in direction-dependent mechanical behavior. Reliable finite element analysis therefore requires an anisotropic material model. In engineering practice, however, calibration data are often limited to a few directional material properties provided in the filament manufacturer's datasheet. This work investigates whether a usable anisotropic material model can be created from such limited data and for which loading cases it can be applied.

1. BEVEZETÉS

Az anyagextrúziós (FDM/FFF) eljárással készült alkatrészek rétegenként épülnek fel, ezért mechanikai tulajdonságaik az iránytól is függenek. A rétegen belüli szilárdságot elsősorban a folytonos szálak határozzák meg, míg a rétegek között csak részleges összeolvadás jön létre. Emiatt az erre merőleges keresztmetszetben a rétegek közötti kapcsolat általában gyengébb, mint a rétegen belüli anyagkapcsolat.

Az irodalomban többféle anyagmodellt alkalmaznak ennek a viselkedésnek a leírására. Gyakori a **transzverz izotróp anyagmodell**, amelyben az anyag egy adott síkban azonos tulajdonságokat mutat, míg az erre merőleges irányban eltérően viselkedik; ehhez gyakran a Tsai–Hill kritériumot használják [1]. Szintén elterjedt az **ortotróp anyagmodell**, amely három egymásra merőleges irányban különböző anyagtulajdonságokat enged meg [2], valamint a **Hill-féle anizotróp folyási kritérium**, amely a képlékeny folyás irányfüggését írja le [3, 4].

Ezek a modellek megfelelő egyezést mutathatnak a kísérleti eredményekkel, alkalmazásukhoz azonban általában részletes kísérleti anyagvizsgálatokra van szükség. Li és társai [3] például hét különböző anyagsíkban végzett mérések alapján határozták meg az ortotróp anyagállandókat és a Hill48 paramétereit. Az irányfüggő viselkedést ugyanakkor nem minden nyomtatási jellemző befolyásolja egyformán: a raszterszög (nyomtatott szálak iránya) hatása a rugalmas viselkedésre korlátozott, míg az építési irány meghatározó [5, 6].

A tervezési gyakorlatban az anizotróp anyagmodellekhez szükséges kísérleti vizsgálatok idő- és költségigényesek, ezért gyakran egyszerűsített, izotróp anyagmodellt alkalmaznak [5]. Sok esetben csak a filament gyártójának adatlapja áll rendelkezésre, amely csak néhány anyagjellemzőt tartalmaz. Ez felveti a kérdést, hogy ilyen korlátozott adatokból felépíthető-e olyan irányfüggő anyagmodell, amely végeselemes vizsgálatokhoz használható, és ha igen, milyen terhelési esetekben alkalmazható megbízhatóan.

A jelen munka ezt a kérdést vizsgálja. A felépített modell alapját a gyártói adatlap adatai adják, míg a hiányzó anyagállandókat irodalmi értékekből, számításokból és feltételezésekből határoztuk meg. Az így létrehozott anyagmodell **ortotróp rugalmasságot**, **Hill-féle folyási kritériumot** és **multilineáris izotróp keményedést** alkalmaz. A modellt szabványos szakítópróbatesten, öt különböző anyagorientációban vizsgáltuk. Fontos megjegyezni, hogy független kísérleti validációra nem volt lehetőség. Az eredményeket ugyanazon gyártói adatlap adataival vetettük össze, amelyből a modell kalibrálása is történt. Ezért a vizsgálat elsősorban azt mutatja meg, hogy a korlátozott adatokból felépített modell mennyire következetes, illetve milyen korlátai vannak az ilyen módon végzett kalibrálásnak.

2. AZ ANYAGMODELL

Az FDM eljárással nyomtatott PLA viselkedését egy három részből álló anyagmodellel írhatjuk le: **ortotróp, lineárisan rugalmas modellel**, **Hill-féle anizotróp folyási kritériummal** és **multilineáris izotróp keményedéssel**.

Az ortotróp modell azt feltételezi, hogy az anyagnak három egymásra merőleges, kitüntetett iránya van, amelyekben eltérő mechanikai tulajdonságokkal rendelkezhet. A modell ehhez kilenc független anyagállandót használ: három rugalmassági modulust, három Poisson-tényezőt és három csúsztató rugalmassági modulust. Az anyagkoordináta-

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

rendszerben az 1 és 2 tengely a nyomtatási síkban, a 3 tengely pedig a rétegrakás irányában fekszik.

A **képlékeny folyás** megindulását a Hill-kritérium [8] írja le. Ez a von Mises-féle folyási feltétel anizotróp anyagokra kiterjesztett változata, vagyis figyelembe veszi, hogy az anyag folyáshatára az egyes irányokban eltérhet (1).

$$F(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (1)$$

A számításhoz szükséges **együtthatók** a folyásszilárdsági arányokból (R_{11}, R_{22}, R_{33}, R_{12}, R_{13}, R_{23}) határozhatók meg. Ezek azt fejezik ki, hogy az egyes irányokban mért folyáshatárok hogyan viszonyulnak egy választott referenciairány folyáshatárához. Izotróp anyag esetén valamennyi arány egyenlő 1-gyel, így a Hill-kritérium a von Mises-féle kritérium speciális esetévé válik. A folyás megindulása után az anyag tovább keményedik, vagyis további képlékeny alakváltozás hatására növekszik a folyáshatára. Ezt a modellben **multilineáris izotróp keményedéssel** írjuk le. A keményedést a valós feszültség és a képlékeny alakváltozás közötti görbe adja meg. A Hill-kritérium ezt a referenciairányban megadott görbét a különböző irányok folyásszilárdsági arányainak megfelelően skálázza.

A vizsgált anyag a Polymaker PolyTerra™ PLA filament. A gyártói adatlap [10] az ISO 527 szabvány szerint mért értékeket közöl két fő irányban: a nyomtatási síkban (X–Y) és a rétegrakás irányában (Z). Mindkét irányra három jellemzőt ad meg: a rugalmassági modulust, a szakítószilárdságot és a szakadási nyúlást. A gyártó a mérési próbatestekre megadja a nyomtatás főbb paramétereit. Az anyagmodell teljes paraméterkészlete ennél jóval több anyagjellemzőt tartalmaz. Az **1. táblázat** a modellben alkalmazott paramétereket és azok értékeit foglalja össze.

1. táblázat A Hill-modell paraméterei

Paraméter	Érték
$E_1 = E_2$	1882 MPa
E_3	1870 MPa
$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	0,33
G_{12}	708 MPa
$G_{13} = G_{23}$	703 MPa
$R_{11} = R_{22} = R_{12} = R_{13} = R_{23}$	1
R_{33}	0,861

A rugalmassági modulusok közvetlenül a gyártói adatlapról származnak. Az irodalmi adatok alapján az FDM-mel nyomtatott PLA Poisson-tényezője megközelítőleg 0,33, és értéke a nyomtatási paraméterektől és a szálorientációtól gyakorlatilag független [6]. Ezért a modellben mindhárom irányban azonos, 0,33 értéket alkalmaztunk.

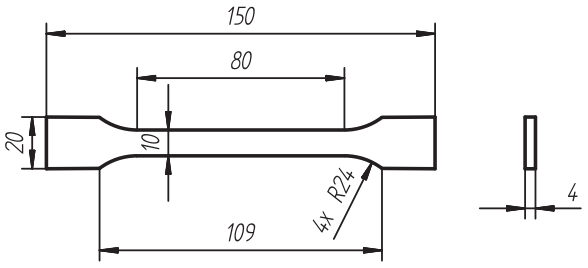
A **csúsztató rugalmassági modulus** (G) a mechanikából ismert összefüggéssel határozható meg. Ez az összefüggés szigorúan izotróp anyagra érvényes, ezért ortotróp anyag esetén csak közelítésként alkalmaztuk. Erre azért volt szükség, mert a vizsgált anyagra nem álltak rendelkezésre mért nyírási adatok.

A folyásszilárdsági arányok közül az R_{33} értékét a gyártói adatlap két fő anyagirányra megadott szakítószilárdságából határoztuk meg. Fontos azonban, hogy a Hill-kritérium valójában a folyáshatárok arányát igényli, a gyártói adatlap viszont folyáshatárt nem közöl. A szakítószilárdságok arányának használata akkor adna pontos eredményt, ha a keményedés mértéke a két irányban hasonló lenne. A vizsgált anyagnál ez a feltétel nem teljesül, amint azt az 5. fejezetben részletesebben bemutatjuk. Az R_{11} értéke definíció szerint 1, mivel a nyomtatási síkot választottuk referenciairánynak. Az R_{22}=1,0 érték abból a feltételezésből következik, hogy a nyomtatási síkban az anyag tulajdonságai azonosnak tekinthetők. A gyártói adatlap ugyanis a teljes nyomtatási síkra egyetlen értékkészletet ad meg, és nem különbözteti meg a síkon belüli raszterszögeket. Ezt a feltételezést a rugalmas viselkedés szempontjából az irodalmi eredmények is alátámasztják [4].

A többi, nyíráshoz kapcsolódó folyásszilárdsági arányra sem a gyártói adatlap, sem közvetlen mérési eredmény nem áll rendelkezésre. Ezért az alapmodellben ezeket izotrópnak, vagyis 1 értékűnek feltételeztük. Ennek a feltételezésnek a hatását az 5.2 fejezetben vizsgáljuk Li és társai [3] FDM PLA-n végzett mérései alapján. A gyártói adatlap a folyáshatárt sem közli. Ezért a modellben a folyáshatárt tapasztalat szerint a szakítószilárdság 80%-aként vettük fel.

3. A VÉGESELEMES MODELL

A vizsgálatot az **ISO 527-2 szabvány szerinti 1A típusú szakítópróbatesten** végeztük [9], amelynek geometriáját az 1. ábra mutatja. A próbatest teljes hossza 150 mm, a párhuzamos mérési szakasz hossza 80 mm, keresztmetszete 10 × 4 mm, az átmeneti lekerekítések sugara pedig 24 mm.



1. ábra. A szabványos próbatest

A modellt **húsz csomópontos, kvadratikus hexaéder elemekkel** (SOLID186) hálóztuk be. A háló összesen 12 320 elemet és 60 965 csomópontot tartalmazott. A másodrendű elemek alkalmazását a nagy képlékeny alakváltozás indokolta.

A vizsgálatot öt különböző anyagorientációban végeztük. Ezeket a húzás iránya és a rétegrakási irány által bezárt φ szög jellemzi: 0°, 22,5°, 45°, 67,5° és 90°. A φ=0° esetben a húzás a rétegrakási iránnyal párhuzamos, míg φ=90°-nál a terhelés a nyomtatási síkban történik. Az öt esetben ugyanazt a geometriát és hálót használtuk, csak az anyaghoz rendelt lokális koordináta-rendszer tájolása változott.

A próbatest megtámasztását a 3-2-1 kényszerezési elv szerint alakítottuk ki. Ez a módszer a test hat merevtest-szabadságfokát a szükséges minimális számú kényszerrel rögzíti. A teljes véglap befogását szándékosan elkerültük, mert az akadályozná a Poisson-hatásból eredő keresztirányú összehúzódást, és emiatt a befogás közelében mesterséges feszültségek alakulhatnának ki.

A terhelést a próbatest szemközti végén előírt elmozdulással adtuk meg. Az elmozdulás maximális értékét az adatlapban megadott szakadási nyúlás alapján határoztuk meg.

A gyártó ezt csak a két fő anyagirányra adja meg: a nyomtatási síkban 34,5%, a rétegrakási irányban pedig 2,51%. A köztes orientációkhoz tartozó értékeket ezért a két ismert érték között lineáris interpolációval határoztuk meg. Ez a megoldás feltételezésen alapul, mivel a Hill-kritérium a szilárdság irányfüggését írja le, a szakadási nyúlás szögfüggését azonban nem. A 80 mm hosszú párhuzamos szakasz alapján így az előírt elmozdulás 2,0 mm (φ=0°) és 27,6 mm (φ=90°) között változott. Statikus szerkezeti analízist alkalmaztunk, a nagy alakváltozás figyelembevételével és automatikus lépésvezérléssel.

4. EREDMÉNYEK

Az öt anyagorientációban végzett számítás eredményeit a 2. táblázat foglalja össze. A feszültséget a befogásnál ébredő reakcióerőből, a párhuzamos szakasz 40 mm²-es kezdeti keresztmetszetével számítottuk.

2. táblázat A számított feszültség értékek

φ [°]	Reakcióerő [N]	Számított feszültség [MPa]	Adatlap [MPa]
0	601,4	15,04	18
22,5	697,6	17,44	-
45	809,6	20,24	-
67,5	846,3	21,16	-
90	826,0	20,65	20,9

A táblázat alapján a számított feszültség az orientáció változásával nem monoton módon változik. A legnagyobb érték a **67,5°-os orientációnál** adódott.

5. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A nyomtatási síkban kapott eredmény jól egyezik a gyártói adatlap értékével. Ez várható, hiszen a referenciairány anyagjellemzői közvetlenül az adatlap adataira épülnek. Az egyezés ugyanakkor fontos visszajelzés arra, hogy a geometria, a hálózás és a peremfeltételek nem okoznak jelentős eltérést.

A rétegrakási irányban kapott alacsonyabb érték oka elsősorban a folyásszilárdsági arány meghatározásának módja. A Hill-kritérium a folyáshatárok arányát igényli, a gyártói adatlap azonban folyáshatárt nem közöl. Ezért az arányt a szakítószilárdságokból határoztuk meg. Ez a helyettesítés csak akkor lenne pontos, ha a keményedés mértéke a két irányban hasonló lenne. A vizsgált anyagnál azonban jelentős különbség van a szakadási nyúlásban.

A szakítószilárdságokból meghatározott arány ezért nem tükrözi pontosan a tényleges folyáshatár-viszonyt. Az ebből származó eltérés a biztonság javára téved, mivel a ténylegesnél kisebb szilárdságot eredményez. A folyáshatár meghatározásának a végeselemes eredmények pontosságára gyakorolt hatását más vizsgálatok is kimutatták [7].

A köztes orientációknál a szilárdság nem monoton módon változik a terhelés irányával. A számítás szerint a legnagyobb érték nem valamelyik fő anyagirányban, hanem egy köztes orientációnál (φ = 67,5°) jelentkezik.

Ez a viselkedés a Hill-kritérium szerkezetéből és annak zárt alakú szögfüggéséből következik. Ferde terhelésnél a normálfeszültségek különbségét tartalmazó tagok részben kiolthatják egymás hatását, miközben a nyírási tagok hozzájárulását a nyírási folyásszilárdsági arányok határozzák meg. Ezekre azonban nem állt rendelkezésre megbízható adat. A modellben ezért a nyíráshoz kapcsolódó folyásszilárdsági arányokat izotrópnak, azaz 1 értékűnek vettük. Ez a feltételezés nincs összhangban azzal, hogy az anyag a rétegrakási irányban gyengébb. A modell így húzásra figyelembe veszi a rétegek közötti gyengébb kapcsolatot, nyírásra viszont nem. Ez az FDM-re jellemző rétegközi kapcsolat miatt fizikailag nehezen indokolható.

Li és társai [3] FDM PLA-n végzett mérései nyírási folyásszilárdsági arányokra is adnak adatot. Ezek közvetlen átvétele azonban nem feltétlenül indokolt, mivel az általuk vizsgált anyag és a nyomtatási körülmények eltérnek a jelen vizsgálattól. Az eredmények ugyanakkor azt mutatják, hogy a ferde orientációk számított szilárdsága érzékeny a nyírási folyásszilárdsági arányokra. Ezért az 1 értékű izotróp feltételezés helyett egy irodalmi becslés alkalmazása indokolt lehet. Az eredmények alapján az adatlapból felépített modell alkalmazhatósága jól körülhatárolható. A nyomtatási síkban történő terhelés esetén a modell

megfelelően működik, míg a rétegrakási irányban a biztonság javára téved.

A fő anyagirányoktól eltérő terheléseknél azonban a modell nem feltétlenül konzervatív. A nyírási adatok hiánya és az ezekre alkalmazott izotróp feltételezés miatt a számítás a valóságosnál nagyobb szilárdságot is eredményezhet. Ez összetett geometriájú alkatrészek esetében gyakorlati jelentőségű korlát.

Ilyen esetekben a nyírási folyásszilárdsági arányok izotróp értéken tartása helyett legalább irodalmi becslés alkalmazása indokolt.

6. ÖSSZEGZÉS

A vizsgálat azt kereste, hogy a gyártói adatlap korlátozott adataiból felépíthető-e olyan irányfüggő anyagmodell, amely FDM eljárással nyomtatott PLA alkatrészek végeselemes vizsgálatához használható. A szükséges paraméterek egy része közvetlenül a gyártói adatlapból, a többi irodalmi adatokból, számításból vagy feltételezésből származik. A szabványos szakítópróbatesten, öt különböző anyagorientációban végzett vizsgálatok alapján a következő megállapítások tehetők:

- A nyomtatási síkban a modell jól közelíti a gyártói adatlap értékét; az eltérés 1,2%.
- A rétegrakási irányban 16,4%-kal kisebb szilárdságot ad, mert a folyáshatár hiányában a folyásszilárdsági arányt a szakítószilárdságokból kellett meghatározni. Ez a becslés a biztonság javára tér el.
- A fő anyagirányoktól eltérő terheléseknél a modell már nem minden esetben ad biztonságos becslést. Ennek oka, hogy a nyíráshoz kapcsolódó folyásszilárdsági arányokra nem állt rendelkezésre mérési adat, ezért azok izotróp értéken szerepelnek. Ez olyan szögfüggést eredményez, amely a paraméterkészlet belső ellentmondásából adódik, nem pedig a Hill-kritérium korlátja.

Az eredmények alapján az adatlapból felépített modell a fő anyagirányok menti terhelések vizsgálatára megfelelően alkalmazható.

Összetett terhelési állapotoknál azonban a nyírási jellemzők legalább becsült megadása szükséges. A modell továbbfejlesztéséhez irányonkénti szakító- és nyíróvizsgálatok elvégzése jelentheti a továbblépés lehetőségét.

7. IRODALOM

[1] ZHAO, Y., CHEN, Y., ZHOU, Y.: *Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials.* Materials & Design, 2019. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108089

[2] KUMAR S., M., CZEKANSKI, A.: *Development of constitutive material model of 3D printed structure via FDM*. Materials Today Communications, 15 (2018), 143–152. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2018.02.006

[3] LI, M., XU, Y., FANG, J.: *Orthotropic mechanical properties of PLA materials fabricated by fused deposition modeling*. Thin-Walled Structures, 199 (2024), 111800. DOI: 10.1016/j.tws.2024.111800

[4] RAVINDRABABU, S., GOVDELI, Y., WONG, Z. W., KAYACAN, E.: *Evaluation of the influence of build and print orientations of unmanned aerial vehicle parts fabricated using fused deposition modeling process*. Journal of Manufacturing Processes, 34 (2018), 659–666. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.07.007

[5] SHAHID, S., ANDREASSON, E., PETERSSON, V., GUKHOOL, W., KANG, Y., KAO-WALTER, S.: *Simplified Characterization of Anisotropic Yield Criteria for an Injection-Molded Polymer Material*. Polymers, 15 (2023) 23, 4520. DOI: 10.3390/polym15234520

[6] FERREIRA, R. T. L., AMATTE, I. C., DUTRA, T. A., BÜRGER, D.: *Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers*. Composites Part B: Engineering, 124 (2017), 88–100. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.05.013

[7] MAJEED, M., SILVA, R., FAYE, D. N., PEDROSA, P.: *Influence of Strain-Offset-Based Yield Definitions on the Accuracy of Finite Element Analysis of 3D-Printed PLA with Different Raster Orientations*. Polymers, 18 (2026) 2, 158. DOI: 10.3390/polym18020158

[8] HILL, R.: *A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals*. Proceedings of the Royal Society A, (1948), 281–297.

[9] ISO 527-2:2012 *Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.*

[10] Polymaker: *PolyTerra™ PLA — Technical Data Sheet, V5.*

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.25

A MÉRNÖK MINT DIGITÁLIS KARMESTER – TERVEZÉS A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA KORSZAKÁBAN

THE ENGINEER AS A DIGITAL CONDUCTOR – DESIGN IN THE AGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Dr. Szeghő Krisztina Katalin[*]

ABSTRACT

Artificial intelligence (AI) is increasingly used to support engineering design activities, while problem formulation, solution selection and verification remain essential. This paper examines how AI supports task clarification, the generation and selection of solutions, and verification-based feedback. Through these activities, it explores how the engineer's role may evolve as an increasing number of design tasks are supported by AI tools.

The digital conductor metaphor connects cognitive, methodological and organisational changes. The key challenge for the future of engineering design is not merely the application of AI tools, but the effective integration of human expertise and AI-based support.

1. BEVEZETÉS

A mérnöki tervezés a műszaki megoldások kidolgozása mellett a feladat értelmezését, az alternatívák értékelését és az eredmények ellenőrzését is magában foglalja. A mesterséges intelligencia (MI) e tevékenységek egyre több részfeladatát támogathatja, miközben a meghatározó szakmai döntések továbbra is a mérnöknél maradnak.

A cikk azt vizsgálja, hogyan változtatja meg az MI alkalmazása a tervezési folyamat egyes tevékenységeit, és hogy milyen hatással lehet a mérnök szerepére. A digitális karmester metafora ezt a szerepváltozást szemlélteti: a mérnök a közvetlen tervezői munka mellett egyre inkább a digitális eszközök és részfolyamatok összehangolását is végzi. Ehhez nélkülözhetetlen a mérnöki szaktudás, az alkalmazott eszközök korlátainak ismerete és az eredmények kritikus értékelése.

2. A TERVEZÉSI FOLYAMAT HÁROM MÓDSZERTANI SZEMPONTJA

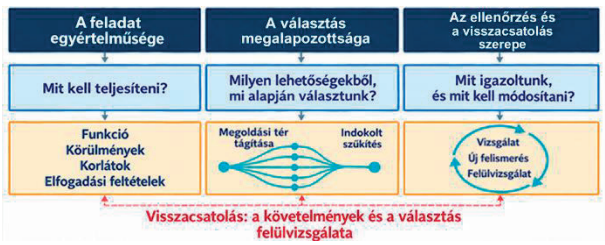
A Pahl–Beitz-féle rendszerezett tervezési megközelítés és a VDI 2221 a fejlesztést egymáshoz kapcsolódó, visszacsatolásokat is igénylő tevékenységekként kezeli [1, 2]. A módszertani keretet az adott feladathoz kell igazítani, miközben a korai döntések a további lehetőségeket is meghatározzák.

Az MI támogatási lehetőségeit három, a cikkben meghatározott, minden tervezési fázisban alkalmazható módszertani szempont (SZ1–SZ3) alapján vizsgáljuk..

SZ1 – A feladat egyértelműsége. A követelményjegyzék rögzíti a teljesítendő funkciót, a körülményeket, a korlátokat és az elfogadási feltételeket. A szempont azt vizsgálja, hogy ezek az adott részfeladathoz is egyértelműen meg vannak-e határozva. Ez szükséges kiindulópont, de önmagában nem garantál jó megoldást.

SZ2 – A választás megalapozottsága. A megoldások előállítása és kiválasztása összekapcsolódó, de különböző tevékenység. Az előállítás a vizsgálható lehetőségek körét tágítja; a kiválasztás a követelmények és az értékelési tudás alapján szűkít. A szempont azt vizsgálja, hogy érdemben eltérő lehetőségek közül, indokolt kritériumok és megfelelően alátámasztott adatok alapján történik-e a választás.

SZ3 – Az ellenőrzés és a visszacsatolás szerepe. A szempont azt vizsgálja, hogy a döntéseket megfelelő vizsgálatok támasztják-e alá, és azok eredményei visszahatnak-e a tervezésre. Az új felismerések alapján a tervet, szükség esetén a korábbi feltevéseket is módosítani kell. Az ellenőrzés így a további döntések információforrása.



1. ábra A tervezési folyamat három módszertani szempontja

Az 1. ábrán összefoglalt szempontok alapján minden új eszköz bevezetésekor megvizsgálható, mely tevékenység válik könnyebbé, és mely szakmai kötelezettség marad változatlan.

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

3. A TERVEZÉSI FÁZISOK AZ MI KORSZAKÁBAN

Az MI a követelményfeltárástól a részletes kidolgozásig támogathatja a tervezést [3]. Az alfejezetek e támogatás lehetőségeit és az eredmények szakmai elfogadásának feltételeit vizsgálják (2. ábra).



2. ábra. A mérnöki feladatok és az MI támogatási lehetőségi a tervezési folyamatban

3.1. Feladatértelmezés és követelmények

Az MI megbízói leírásokból, korábbi dokumentációkból és használati tapasztalatokból követelményjelölteket emelhet ki, valamint segíthet a hiányos, homályos vagy ellentmondásos megfogalmazások felismerésében [3]. A „könnyen karbantartható” igényhez például a hozzáférésre, a szükséges szerszámokra vagy a megengedett kiesési időre vonatkozó tisztázó kérdéseket rendelhet.

Meg kell különböztetni a dokumentált igényt, az abból levezetett követelményt és az egyeztetést igénylő feltevést. Az MI a hiányzó információkat hihető, de téves feltételezésekkel is pótolhatja, a tényleges használati körülményeket és kompromisszumokat azonban nem feltétlenül ismeri. A követelmények véglegesítése, a kötelező és mérlegelhető feltételek elkülönítése, valamint teljesítésük igazolási módjának meghatározása ezért mérnöki feladat marad. Az SZ1 alapján azt kell vizsgálni, hogy a követelmények egyértelműen meghatározzák-e a feladatot és teljesítésének elfogadási feltételeit.

3.2. Koncepcióalkotás és változatosság

Az MI működési elveket, funkciómegoldásokat és ezek kombinációit javasolhatja, valamint segíthet új keresési irányok feltárásában. A javaslatok azonban vizsgálható lehetőségek, nem igazolt konstrukciók. A gyors változatképzés önmagában nem jelenti a megoldási tér bővülését, mivel eltérő megfogalmazások azonos működési elvet is képviselhetnek.

Ma és munkatársai tizenkét tervezési problémán végzett összehasonlításában a gépi javaslatok kedvező megvalósíthatósági és hasznossági értékelést kaptak, míg a tömegesen gyűjtött emberi megoldások nagyobb újdonságot mutattak [4]. Ege és munkatársai egy fizikai prototípust létrehozó kísérletben a vizsgált modellnél tervezési fixációt is megfigyeltek [5]. Ezek az eredmények a vizsgált feladatokra vonatkoznak, és nem alapoznak meg általános következtetést az MI kreativitásáról.

A mérnök feladata a keresési tér kijelölése és az érdemben eltérő működési elvek feltárása. A túl korai részletezés szűkítheti a lehetőségeket. Az SZ2 alapján nem a változatok száma, hanem azok tényleges különbözősége meghatározó.

3.3. A megoldások kiválasztása

Az MI támogathatja az alternatívák összehasonlítását, a követelményekhez rendelhető tulajdonságok rendszerezését és a kompromisszumok feltárását. Az értékelési kritériumok meghatározása azonban szakmai feladat. A kizáró feltételeket el kell különíteni a mérlegelhető előnyöktől, mivel egy kötelező követelményt nem teljesítő megoldás kedvező összpontszámmal sem fogadható el. A moduláris gyártósorok tervezése is példázza a konstrukciós változatok módszeres értékelésének és kiválasztásának jelentőségét [6].

Az értékelés során különbséget kell tenni az igazolt tulajdonságok, a becslések és az MI által feltételezett előnyök között. Az eredmények bizonytalanságát és a rangsor érzékenységét is vizsgálni kell. Automatizált generáló–értékelő ciklusban különösen fontos, hogy a kritériumok valóban a tervezési célokat képviseljék, ne csupán könnyen számítható helyettesítő mutatókat.

A gyors változatképzés a kiválasztást teheti a folyamat szűk keresztmetszetévé. Az MI által készített rangsor ezért csak döntés-előkészítő eredmény, amelynek megalapozottságát és a választás indokait az SZ2 alapján ellenőrizni kell.

3.4. Megtervezés és kidolgozás

A megtervezés a kiválasztott működési elvet térbeli, szerkezeti és rendszerszintű kialakítássá alakítja, míg a részletes kidolgozás a méreteket, kapcsolatokat és dokumentációt pontosítja. Az MI támogathatja a részfeladatok felbontását, a számítások előkészítését és a dokumentáció feldolgozását, ellenőrzött eszköz-környezetben pedig egyes műveletek végrehajtását is.

Az MI által javasolt adatokat, a számítási eredményeket és az elfogadott tervadatokat meg kell különböztetni. Az anyagválasztás, a méretezés és a tűrések meghatározása mérnöki döntést igényel. A részmegoldások kölcsönhatásai mellett vizsgálni kell a szabványoknak való megfelelést, a gyárthatóságot, az összeszerelhetőséget, a karbantarthatóságot és a használhatóságot.

Ebben a fázisban az SZ1–SZ3 szempontok együttesen érvényesülnek: a követelmények egyértelműsége, a kialakítási döntések megalapozottsága és a részmegoldások ellenőrzése meghatározza a kidolgozás elfogadhatóságát. Az MI alkalmazásának előnye csak akkor érvényesül, ha nem növeli aránytalanul a felülvizsgálati ráfordítást.

3.5. Ellenőrzés és iteráció

Az MI támogathatja a vizsgálatok tervezését, a hibamódok feltárását és az eredmények követelményekkel való összevetését, de a megfelelőség megítélése mérnöki feladat marad. Az ISO 9000:2015 szerint a verifikáció a meghatározott követelmények, a validáció pedig a tervezett felhasználásra vonatkozó követelmények teljesülésének objektív bizonyítékkal történő megerősítése [7]. A kettő nem helyettesíti egymást.

A számítások vagy szimulációk sikeres lefutása önmagában nem igazolja a műszaki megfelelőséget. Az azonos feltevésekre épülő MI-modellek egyetértése sem tekinthető független bizonyítéknak; az ellenőrzés módját és elfogadási feltételeit az adott műszaki feladat alapján kell meghatározni.

Az iteráció akkor eredményes, ha új információval csökkenti a bizonytalanságot vagy megalapozza a korábbi döntések felülvizsgálatát. A vizsgálati eredményeket ezért az adott tervváltozathoz kell kapcsolni, szükség esetén a korábbi tervezési fázisokig visszalépve. Az SZ3 alapján meghatározó az ellenőrzés függetlensége és az eredmények visszacsatolása a tervezésbe.

4. AZ ÁTALAKULÁS HÁROM SZINTEN

A tervezési fázisok áttekintése után az átalakulás a mérnöki gondolkodás, a módszertan és a szervezeti működés szintjén összegezhető [8]. Míg az SZ1–SZ3 szempontok azt mutatják meg, mit kell az egyes döntéseknél vizsgálni, a három szint azt, hogy az átalakulás hol jelentkezik. A 3. ábra a hangsúlyok változását és az ehhez kapcsolódó szakmai feltételeket mutatja be.



3. ábra. Az MI-vel támogatott tervezés átalakulása

4.1. Kognitív szint

Az MI alkalmazása átrendezheti a mérnök figyelmét és gondolkodási tevékenységeit. Egyes részfeladatok automatizálásával több figyelem fordítható a probléma értelmezésére, az összefüggések felismerésére és a szakmai döntésekre. Ez azonban nem automatikus előny: a gyorsan keletkező javaslatok értékelése, a hiányzó adatok felismerése és a bizonytalan eredmények megítélése új kognitív terhelést is jelenthet.

A mérnöki ítélőképesség kialakulásában feltehetően továbbra is meghatározó a közvetlen tervezői tapasztalat. A saját számítások, modellezés és hibajavítás segíthetik a valószínűtlen eredmények felismerését. Nyitott kérdés, hogyan szerezhető meg ez a tapasztalat az automatizálás mellett; ennek képzési következményeit az 5.2. alfejezet tárgyalja.

4.2. Módszertani szint

A tervezési fázisok határai ellenőrzési kapuként szolgálhatnak, ahol megítélhető, hogy rendelkezésre áll-e elegendő bizonyíték a továbblépéshez. Az MI által gyorsított iteráció elmoshatja e határokat, de a gyorsabb módosítás önmagában nem igazolja a megoldás megfelelőségét.

Az ellenőrzési kapukat a feladat bizonytalanságához és a döntések következményeihez kell igazítani. A továbblépés feltételeinek és indokainak követhetőknek kell maradniuk, az SZ1–SZ3 szempontok alkalmazásával.

4.3. Szervezeti szint

Az MI-vel támogatott tervezésben az egymástól független részfeladatok eltérő alapfeltevésekre épülhetnek, ami rendszerszintű ellentmondásokhoz vezethet. Ezért közös, verziókövetett követelményjegyzékre, valamint a feltevések és döntések dokumentálására van szükség.

A nyomon követhetőségnek ki kell terjednie a bemeneti adatokra, az alkalmazott eszközökre és modellváltozatokra, valamint az eredmények elfogadásának indokaira. Nagyobb következményű döntéseknél független felülvizsgálat is indokolt lehet. Az MI alkalmazása nem ruházza át a szakmai felelősséget: az elfogadás továbbra is a felelős mérnökhöz és a szervezethez kapcsolódik.

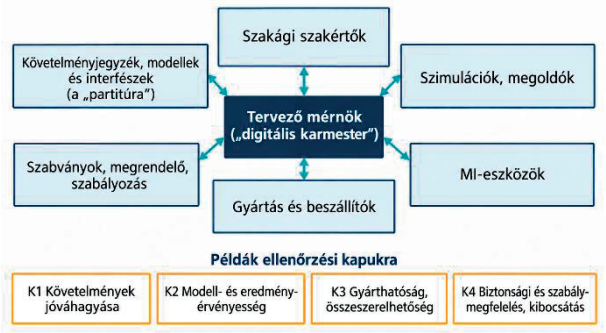
5. A MÉRNÖK MINT DIGITÁLIS KARMESTER – SZEREPVÁLTOZÁS ÉS KÖVETKEZMÉNYEK

5.1. A „digitális karmester” metaforája és korlátai

A karmester-metaforában a partitúrát a követelményjegyzék, a modellek és az interfészek együttese alkotja, míg a zenekarhoz a szakértők, a számítási és szimulációs eszközök, valamint az MI-rendszerek tartoznak. A mérnök összehangolja a részfeladatokat, meghatározza a kidolgozás és az ellenőrzés ütemét, értékeli az eredményeket, és dönt a tervezés további irányáról. Munkáját a szabványok, a megrendelői elvárások, a szabályozás, valamint a gyártási és beszállítói lehetőségek is meghatározzák.

A metafora lényege az összhang megteremtése. Az önmagukban megfelelő részmegoldások is hibás tervhez vezethetnek, ha eltérő követelményekre vagy össze nem illő feltevésekre épülnek. Ezért a koordinációnak biztosítania kell a részeredmények műszaki összhangját és az elfogadáshoz szükséges bizonyítékokat. Ennek eszközei az ellenőrzési kapuk: a követelmények jóváhagyása (K1), a modell- és eredményérvényesség

vizsgálata (K2), a gyárthatóság és az összeszerelhetőség ellenőrzése (K3), valamint a biztonsági és szabálymegfelelés igazolása (K4) (4. ábra).



4. ábra. A mérnök mint digitális karmester és az ellenőrzési kapuk példái

A metaforának ugyanakkor korlátai vannak. A mérnöknek ismernie kell az általa irányított eszközök működését és korlátait, az MI-rendszerek nem viselnek felelősséget a műszaki eredményért. A tervezési hibák nem mindig ismerhetők fel azonnal, ezért megfelelő vizsgálatokra van szükség. Végül a mérnök nem kizárólag koordinál: szükség esetén maga is számol, modellez és részmegoldásokat dolgoz ki. A karmester és a gyakorló tervező szerepe tehát nem választható szét élesen.

5.2. A mérnöki szerep átalakulása és következményei

A mérnöki szerep átalakulásában külön kell választani a tervezési műveletek végrehajtását és a hozzájuk kapcsolódó szakmai döntéseket. A követelmények rendszerezése, a változatok előállítása és a vizsgálati adatok feldolgozása részben automatizálható, míg a követelmények jóváhagyása, a megoldások kiválasztása és az eredmények elfogadása továbbra is mérnöki feladat. A közvetlen végrehajtás szerepe csökkenhet, miközben a részfolyamatok összehangolása és a döntések megalapozása felértékelődhet.

Az átalakulás a mérnökképzést is érinti. A rutinszerű feladatok automatizálása módosíthatja a pályakezdők tapasztalatszerzésének útját, ezért a műszaki alapok önálló gyakorlását az MI-eszközök alkalmazásával és kritikus értékelésével célszerű összekapcsolni. A hallgató például összevetheti saját modelljét az MI javaslatával, feltárhatja az eltérő feltevéseket, és megtervezheti a megfelelőség igazolásához szükséges vizsgálatokat. Így a megoldás mellett a mérnöki gondolkodás is értékelhető.

Az MI alkalmazásának eredményessége nem ítélhető meg kizárólag a feladatvégrehajtás gyorsaságából: az ellenőrzés, a javítás és a szakmai elfogadás ráfordításait is figyelembe kell venni. A digitális karmester szerepének értéke abban mutatkozhat meg, hogy az emberi szakértelem és a gépi támogatás összehangolása mennyiben javítja a teljes tervezési folyamat eredményességét.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az MI a tervezési folyamat több fázisában csökkentheti a közvetlen végrehajtás terhét, miközben a szakmai döntések és azok igazolása még mérnöki feladat marad. A cikkben alkalmazott SZ1–SZ3 szempontok alapján a támogatás értékét nem a változatképzés sebessége, hanem a feladat egyértelműsége, a választás megalapozottsága és az ellenőrzés eredményeinek visszacsatolása határozza meg.

A digitális karmester szerepe a tervezési részfolyamatok összehangolásában, a döntések megalapozásában és a műszaki megfelelőség igazolásában jelenik meg. Ehhez a mérnöki szaktudás és ítélőképesség megőrzése, a követelmények és döntések nyomon követhetősége, valamint a megfelelő ellenőrzési módszerek alkalmazása szükséges. A mérnökképzés feladata ezért az MI-eszközök használata mellett az önálló mérnöki gondolkodás és a kritikus értékelés fejlesztése.

7. IRODALOM

[1] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Engineering Design: A Systematic Approach. 3. kiadás, Springer, London, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2

[2] VDI 2221 Blatt 1:2019-11. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung.* VDI, Düsseldorf, 2019

[3] JONUSCHIES, I.; SIEWERT, L.; MICHAELSEN, E.; GERICKE, K.: *Mapping AI applications in design: support and activities across the product development process*. Proceedings of the Design Society, 5, 2025, pp. 2341–2350 https://doi.org/10.1017/pds.2025.10248

[4] MA, K.; GRANDI, D.; MCCOMB, C.; GOUCHER-LAMBERT, K.: *Conceptual Design Generation Using Large Language Models*. arXiv:2306.01779, Proceedings of the ASME IDETC-CIE 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.01779

[5] EGE, D. N.; VREB, H. H.; STUBBERUD, V.; BERG, M. F.; ELVERUM, C.; STEINERT, M.; VESTAD, H.: *ChatGPT as an inventor: eliciting the strengths and weaknesses of current large language models against humans in engineering design.* Artificial Intelligence for Engineering Design, 39, e6, 1–15, 2025. https://doi.org/10.1017/S0890060425000010

[6] GOTTHARD, V.; BERCSEY, T.: *Development of Modular Production Lines.* Periodica polytechnica-Mechanical Engineering 0324-6051 1587-379X 50 (2) pp. 125-145 2006.7

[7] ISO 9000:2015: *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary,* 3.8.12-13 szakasz. Intern. Org. for Standardization, Genf, 2015.

[8] SZEGHŐ, K.; GOTTHARD, V.: *MI-vel támogatott mérnöki tervezés.* Szakmai nap, Szekszárd, 2026.

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.26

GÖRGŐKÁROSODÁS HATÁSA A SZÁLLÍTÓSZALAG ÉS EGY PÁLYÁT TARTÓ RÁCSOS HÍDVÁZ VIZSGÁLATÁNÁL

EFFECTS OF DAMAGED STEEL-CASE ROLLERS ON THE DESIGN OF THE CONVEYOR BELT AND TRUSS BRIDGE STRUCTURE

Dr. Szirbik Sándor[*], *Dr. Virág Zoltán*[**]

ABSTRACT

This paper deals with effects of damaged steel-case rollers on a 3D bridge frame subjected to loadings due to the moving belt resting on conveyor idler sets roll, the underlying conveyor belt support frame, and the transported materials contained corrosive material to be moved during full-capacity transport. To design a conveyor belt, data on conveyor bridges is required, as well as calculations for resistances. The driving force on driving pulleys consists of many force components; however, some of them are required to make experimental measurements, such as for rotational resistances. Comparative tests were used on two same pieces of roller. The research objects were idlers, used in conveyor belt systems for bulk transportation. Measurement campaigns were conducted in phosphoric acid baths to save time. Neglecting maintenance can lead to breakdowns, causing unplanned downtime and productivity loss. Regular checks and repairs keep the system running smoothly and prevent costly interruptions.

1. BEVEZETÉS

Szállítószalag minden olyan berendezés, amelyen az anyag mozgatására végtelenített, hajlékony mozgó heveder szolgál. A szállítandó anyag a mozgó hevederen fekszik és azzal együtt mozog, így az anyag nem csúszik a szállítópályán, hanem hozzátapad és követi a heveder mozgását. Legszélesebb körben a gumihevederes szállítószalagokat ömlesztett, darabos anyagok vízszintes és ferde szállítására használják. A szállítószalagpályák hevedereinek görgőkön történő vezetésének megtervezésekor többféle szempontnak kell egyszerre megfelelni. Ehhez kapcsolódó mérnöki feladat lehet a pályákat tartó hídvázszerkezet méretezése vagy utólagos ellenőrzése. Feladat lehet még az esetleg már meglévő tartó valamilyen formában történő újrahasznosítása is, mely során a teherbíráson túlmenően a korábban másra méretezett alkotórészek hosszabb távú alkalmazhatóságának kérdése, például más jellegű, a korábban tervezettől eltérő állagú, kémhatású anyagok ömlesztett anyagszállítása során fellépő egyéb hatások vizsgálata a szerkezeti elemekre. Egy, korábban már használt és többször is radikálisan átalakított szerkezet hagyományos szilárdságtani számításokkal, azaz a nyomott rudak kihajlásának ellenőrzésével az [1] munka már foglalkozott, amelyben síkbeli rácsos tartóként, egyszerűsítve kezelt, bár végeselemes számításokból nyert terhelési paramétereket felhasználva, mégis döntően kézi számítások útján végzett ellenőrzés figyelembe vette a szállított anyag sűrűségének, keresztmetszetének megváltozásaiból adódó többlet terheléseket. A [2] munka az előző munkákban is vizsgált hídszerkezetre, mint térbeli vázszerkezetre, tisztán szimulációs eszközökkel, konkrétan végeselemes megközelítéssel, tovább vizsgálta a már valósághűbb terhelési viszonyok előírása mellett a kialakuló szilárdságtani állapotot. A modellezett térbeli rácsos szerkezeten pedig modal analízist [3] is végezve sajátfrekvenciákat határozott meg, a szalagpályán mozgatott anyagmennyiségből rácsvázon adott pontokban szétosztott koncentrált erővektorok által megvalósított, leterhelt állapotban lévő hídvázon. A frekvenciaszámítás jelentősége a pálya működése során gerjesztésnek kitett szerkezeten a gerjesztési frekvenciával egybeeső sajátfrekvenciák okozta probléma, a rezonanciakatasztrófa megelőzésében van. A sajátfrekvenciákhoz tartozó rezgésképek pedig felhasználhatóak a különféle dinamikus terhelések szerkezetre gyakorolt hatásainak vizsgálatában is, mint például tranziens rezgések elemzése stb. A rezonanciakatasztrófa lehetséges veszélyei miatt különféle ipari területeken végeznek is erre vonatkozóan vizsgálatokat, pl. bányákban alkalmazott kotrógépeknél és szállítószalagoknál [4, 5, 6]. A szerkezetek károsodásai, vagy a tervezett paraméterektől eltérő célokra történő alkalmazásai a sajátfrekvenciák olyan változását eredményezik, amely kedvezőtlen lehet. A szerkezetek sajátfrekvenciáinak ismerete ezen hatások kézbentartásának legfontosabb része. A hídváz szerkezetet alkotó karcsú rudak jellegükből adódóan

* *egyetemi docens, Miskolci Egyetem Műszaki Mechanikai Intézet*
** *egyetemi docens, Miskolci Egyetem Bányászat és Energia Intézet*

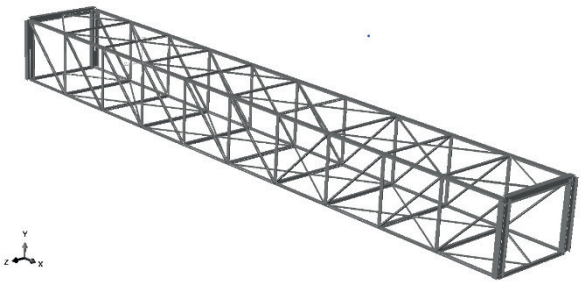
alacsony sajátfrekvenciával bírnak, így a könnyen gerjeszthető szerkezet rendszeres felügyeletet kíván, amelyet alapvetően szemrevételezés útján végeznek.

A rácsos hídszerkezet a beépített szállítószalag vázelemekkel együtt már a heveder mozgásából, az anyag ráhordásból származó transzverzális rezgéseknek is kitett, de idővel a szállítószalag görgők károsodásából és tönkremeneteléből származó hatások is befolyásolnak gerjesztési frekvenciákat. Jelen munkában a gerjesztéseket is befolyásoló ellenállások közül a görgők forgási ellenállásának hatását vizsgáljuk meg feltételezve azt, hogy bizonyos szállított anyagok érintkezés útján erősen korrodálhatják a szalagpálya alkatrészeit, amelyek közül a szállítószalag görgőire gyakorolt káros hatás váratlan üzemzavarokat is okozhat. Kísérleti úton meghatározható az elhasználódottság mértékét adó, a görgők külső acélpalástjának körbeforgathatóságát leíró, palástkerületen mérhető kerületi erő nagysága a vonatkozó sorozatmérésekkel. A hevedert tartó és terelő görgőkben ébredő ellenállások a szalagpálya mozgatáshoz szükséges motorteljesítményen keresztül befolyásolják a motorfrekvenciát, így a pályatartó hídszerkezet gerjesztéseit.

2. RÁCSOS VÁZSZERKEZET KIALAKÍTÁSA ÉS EGYES REZGÉSTANI JELLEMZŐI

A vizsgált görgő egy olyan alapvető szerkezeti elem, amely a szállítószalag vezetését és megtámasztását biztosítja és így nagy számban kerül az egyes szalagpályákon felhasználásra. A szállítópályákat tartó görgősorok tengelyei rögzülnek a vázszerkezethez. Maga a váz többször is felhasználásra kerülhet jellemzően eltérő anyagok elszállításának lebonyolításában, illetve a szállítópályák szintbéli találkozásának elkerülésében. Egy ilyen térbeli rácsos szerkezet többszöri átépítés és megerősítés után nyerte el az általunk is vizsgált alakját, amely a fejlesztések során aszimmetrikus kialakításúvá vált. A 23 m hosszúságú, 3 m széles és 2,3 m magas főbb méretekkel bíró szerkezet geometriai modellje tíz azonos hosszúságú cellából áll. Ezekben az átlós irányú kereszttartók beépítésének iránya egymásra merőleges, viszont a cellák elrendezése nem szimmetrikus, mint ahogy az az esetek többségében megszokott, így hat cellában azonos, míg a másik négyen ellentétes a keresztmerevítők állása, mint az kivehető a 1. ábrán is. A szerkezeten alul- felül ún. szélfogórácsok láthatók.

A szalaghíd (1. ábra) mindkét végén, a jelentős mértékben megerősített kapuk a többi elemhez képest jóval masszívabb I gerendákból állnak. A [2] számításokból kiderül, hogy a szerkezet állékonyságát alapvetően javítják, előnyösek mind szilárdságtani, mind rezgéstani szempontból. A hossztartók néhány szakaszára a korábbi felhasználásokból adódóan merevítések kerültek, de ezeket nem modelleztük, így a hossztartók mentén a rúdelemek azonos profilúak a háromdimenziós szerkezeti modellen.



1. ábra Hídszerkezet geometriai modellje

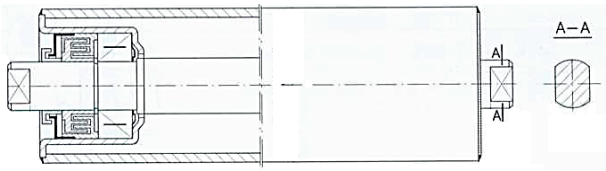
A szállítandó anyag megváltozása és a szállítópályák radikális átalakítása a szalaghíd teherbírásának, szilárdságtani ellenőrzését az [1] munka kétdimenziós modell vizsgálatán keresztül valósította meg. Az általunk is vizsgált szerkezet háromdimenziós modellje a valós szerkezetet alkotó többféle keresztmetszetű szerkezeti acél méretpontos bevitelével, illetve, ahol a profil összetett geometriával bírt, például az oszlopoknál, velük azonos geometriai jellemzőkkel bíró általános keresztmetszet felvételével készült. A vizsgált szerkezet acélanyaga az $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ MPa értékű Young modulus, a $\nu = 0{,}25$ Poisson-szám, valamint a $\rho = 7{,}85 \cdot 10^{-9}$ t / mm^3 sűrűségi anyagparaméterekkel jól leírható.

A hídszerkezetre telepített szállítószalagpálya üzemeltetésbiztonságának előzetes ellenőrzése során végeselemes számítások alapján végzett rezgéstani vizsgálatokkal [2] megállapítottuk, hogy az előfeszített szerkezetként számolt és állandósuló üzemből származtatott egyenletesen szétosztott terhelésekkel támadott acélszerkezet különböző terhelési eseteinél első domináns sajátfrekvenciáik között minimális eltérés található, valamint értékük 7 és 16 Hz közé esik a szállítószalagon továbbított $\rho_h = 1{,}4 \cdot 10^{-9}$ t / mm^3 halmazsűrűséggel számolt anyagra. Az adódó terhelés átrendezése a modellen a sajátfrekvenciákra minimális hatást gyakorolt, mert a 6,2 tonna tömegű hídszerkezet megerősített kapui erősen stabilizálnak, ellensúlyozva a vázat alkotó rudak karcsúságát.

A szállítószalagra szállítás közben ható terhelések méréssel [7] vagy szimulációkkal is megállapíthatók az ömlesztett szilárd anyag és a szalag megereszkedési arányai alapján [4], és ezáltal a görgőkre ható terhelésen keresztül a vázszerkezet anyagszállításból adódó terhelése is. A szállítószalag görgők állapotfelügyelete pedig már akusztikus szenzorokkal is megoldható [5].

3. SZÁLLÍTÓSZALAG GÖRGŐ FORGÁSI ELLENÁLLÁSÁNAK MÉRÉSE

Egy szállítószalag görgő kialakítás (2. ábra) a forgó külső hengeres felület és a rögzített tengelyre szerelt csapágypár paraméterei között kompromisszumot jelent, figyelembe véve a szállítószalagok által rájuk kifejtett különböző erőhatásokat.



2. ábra Egy tipikus szállítószag görgő felépítése

A görgők különösképpen elhasználódnak, ha például a szállított anyag egy savas kémhatású közeg, amely érintkezve a görgők alkatrészeivel kikezdi annak szerkezeti anyagait. A korrózió hatásai így szembetűnően is megjelennek a görgőkön: acéltengely és a ház felületén elszíneződések figyelhetők meg és a görgőtömítés is látható károsodást szenved. A savas környezet által a görgőkön okozott károsodás egy időtől erősen függő folyamat. A savas kémhatású anyag okozta károsodásokat szimulálva, a mérési idő lerövidítése érdekében a mérési sorozatot két azonos görgőn végeztük el, amelyeket az 1. és 2. táblázatok sorszámozott oszlopaiban foglalt mérések között foszforsavfürdőben tartottunk átlagosan két hétig. Az alkalmazott mérési elrendezés a $d = 89$ milliméter átmérőjű acélpalásttal rendelkező szállítószalag görgő tengelyét megforgató esztergagép által hajtott tengelyből, a palástón átvetett a vezetőgörgő külső burkolatát a helyén tartó kötélből; valamint az erőmérések elvégzéséhez szükséges mérőműszerből lett összeállítva. A mérésben a forgathatóság vizsgálatát álló palást mellett és adott fordulatszámon meghajtott görgőtengellyel végeztük, szemben a valósággal, amikor a működő szalagpálya alatt a görgőpalástok forognak az álló tengelyeken a csapágyazás segítségével. Az esztergagép által biztosított fordulatszámokat a d külső átmérő ismeretében átszámíthatjuk az alábbi táblázatok első oszlopaiban közölt kerületi sebességekre, amelyek egyúttal jellemző szállítószalag sebességek is.

1. táblázat Az első görgőn végzett mérési eredmények értékei a forgási ellenállás értékeire [N] adott palást kerületi sebességei mellett

v_p	Mérés sorszáma							
m/s	1	2	3	4	5	6	7	8
2,47	0,9	1,0	0,8	1,1	1,1	1,0	1,2	1,5
3,50	1,1	1,2	1,0	1,3	1,3	1,2	1,3	1,8
4,94	1,4	1,5	1,3	1,4	1,6	1,5	1,5	2,1

2. táblázat A második görgőn végzett mérési eredmények a forgási ellenállás értékeire [N] adott palást kerületi sebességei mellett

v_p	Mérés sorszáma							
m/s	1	2	3	4	5	6	7	8
2,47	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	1,1	1,5
3,50	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9	1,4	1,6
4,94	1,0	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,6	1,9

Az 1. és 2. táblázatokban közölt értékek az első pár oszlopban lassú növekedést mutatnak, de a savfürdőben történő elhelyezés vége felé - lásd utolsó oszlopok, már egyértelműen növekedve, nagymértékben meghaladják a az első oszlopokban látható kiinduló értékeket. Várható is volt, hogy a három adott v_p kerületi sebesség biztosításához annál nagyobb erő szükségeltetik, minél több időt tölt a savfürdőben a görgő. A 8. sorszámú mérési eredmények szinte már kétszeresei az induló intakt görgőre érvényes értékeknek. A méréseket két anyagában, kivitelében azonos szállítószalag görgőn párhuzamosan folytak, mégis a mérési eredmények szignifikáns eltéréseket mutatnak, így utalva a károsodási folyamatok összetettségére. Megjegyzendő, hogy a gördülési ellenállással szemben a forgatási ellenállása egy szállítószalag görgőknek nem függ a tömegtől, azaz a mérési eredmények közvetlenül felhasználhatóak a számítási képletekben.

4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

A hevedert mozgató hajtódobon a T meghajtó erőt úgy kell megválasztani, hogy az a szállítószalag és ezáltal a szállított anyag állandó sebességgel történő mozgatását lehetővé tegye. Az erőnek így különféle ellenállásokat kell legyőznie, melyek a szállítószalag kialakításától erősen függenek. A hajtódobon szükséges T kerületi erőnek egy része az ún.

$$T_g = T_k + T_e + T_r + T_f + T_s \qquad (1)$$

elsődleges ellenállásból származik, amely adódik a tartozékok által okozott súrlódási ellenállásokból: az általunk is mért görgő T_k forgási ellenállásból, az öv T_s csúszási ellenállásából a vezetőgörgőn, továbbá a T_e erőből, amely a görgőnek a gumiszalagba való benyomódásával kapcsolatos gördülési ellenállás leküzdésére szolgál [8], valamint a T_f erőkomponensből, amely a szállított például savas kémhatású őrölt műtrágya– nevezetesen a foszfát tartalmú anyag – 0,8 t/m³ térfogatsűrűségétől függ, és az üres szalag, egyéb terhelés stb. mozgatásához szükséges, valamint a szíj T_r hajlítási ellenállásából a görgőkészleteken. Megjelenik továbbá a szállítószalag tetszőleges pontjain koncentrálódó másodlagos ellenállás, valamint a pálya meredek szakaszain jelentkező lejtésből adódó ellenállás is [10]. Két további fontos ellenállás még a hordozó- és visszatérő görgőktől származó, a görgőcsapágyakban és tömítésekben fellépő súrlódás miatt keletkező ellenállás, valamint a heveder előrehaladásából, a görgők szállítószalagra gyakorolt nyomásából, a heveder anyagának ismétlődő hajlításából eredő ellenállás. Így a szállítószalag hajtóhengerére ható szükséges kerületi erő lépésről lépésre kiszámítható, mivel a vonatkozó súrlódási együtthatók értékei megfelelő mérésekkel meghatározhatók.

A szállítószalag állandó sebességgel történő mozgatásához a technológiai paraméterek által befolyásolt ellenállások ismeretében rendelkezésre álló, a hajtódob kerületén szükséges kerületi erő ismeretében a hevedert hajtódob hajtótengelyén leadandó szükséges elméleti motorteljesítmény kilowattban a

$$P_M = \left[\frac{Tv}{1000} + \frac{(T_w + T_b)v}{1000}\right]/\eta \qquad (2)$$

képlet alapján számítható, ahol v a szállítószalag sebesség m/s-ban, valamint a $0{,}75 \leq \eta \leq 0{,}92$ hajtómű és az átviteli mechanizmus hatásfoka. Kiegészítésül a kerületi erőhöz még a T_w szalag és hajtódob közötti hevederhajlítási ellenállás, és T_b hajtódobcsapágy ellenállás is hozzáadható. Kisebb biztonsági ráhagyással számolva az összes meghajtó erő szükséglet

$$T = CLfg\left(q_a + 2q_h + q_{gf} + q_{ga}\right) + Hq_a g \qquad (3)$$

módon is meghatározható a folyómétertömegek alapján, ahol a mellékellenállásokat a *C* korrekciós tényezővel, a pályaellenállást pedig az *f* pályaellenállási tényezővel veszik figyelembe, továbbá q_a az anyag, q_h pedig a heveder folyómétertömegét jelenti, míg q_{gf}, q_{ga} görgő forgórész folyómétertömeg alul és felül és *H* az emelési magasság. Az idő múlásával növekvő ellenállásokkal együtt változik a szükséges motorteljesítmény is, azaz egyre nagyobb nyomatékot kell biztosítani.

A hídváz szerkezetét érő gerjesztések frekvenciái a szalagot előírt sebességen mozgató hajtódob forgása alapján is előírhatók a numerikus kísérletekben. További lehetőség a mérési eredmények hasznosítására a tranziens rezgések előírása során mutatkozik, mivel közvetetten a mérési eredmények is alátámasztják, hogy a károsodásokkal együtt növekvő ellenállások mellett a szalag elakadásnak is nagyobb a valószínűsége.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A szállítószalagon mozgatott anyag elkerülhetetlenül érintkezésbe kerül a pályaelemekkel, így a görgősorokkal is. Ha a szállított anyag fokozottan korrodálja az elemeket, például savas közeg esetén, amely egyes műtrágyák gyártása és szállítása során előfordulhat, akkor a szállítószalag görgők károsodása is fokozottan jelentkezik. A feladat az általában szemrevételezéssel végzett állapotfelügyeletnél hatékonyabb módot találni a vázszerkezet és pálya károsodásainak korai észlelésére. A leállások megelőzéséhez kísérleti úton szükséges az

egyes ellenállások, többek közt görgőknél megjelenő forgatási ellenállás mértékének kimérése a tervezett, fokozott igénybevétel esetére is. A vonatozó táblázatosan közölt adatok jól mutatják a tendenciákat. Szimulációs feladatok kitűzésében, a szállítószalag mozgásából adódó tranziens terhelések szalagpályát tartó hídvázon történő megjelenésének vizsgálatakor, az általunk korábban is vizsgált szerkezet geometriai és egyes rezgéstani paraméterei már a modal analízis során előállításra kerültek, így a hajtódobbal meghajtott szalagpálya rácsszerkezetre gyakorolt időbeli változásának hatásai valósághűbben modellezhetők.

6. IRODALOM

[1] Ladányi G.: *Strength assessment of a truss bridge for belt conveyors*, Annals of the University of Petroşani, Mechanical Engineering, 19, 2018, pp. 91–96.

[2] Szirbik S., Virág Z.: *Finite element analysis of a steel bridge frame for belt conveyors*, Geosciences and Engineering, Vol. 11, No. 1, 2023, https://doi.org/10.33030/geosciences.2023.01.009

[3] Bathe K. J.: Finite Element Procedures, Prentice-Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.

[4] Ilic D., Wheeler, C.: *Measurement and simulation of the bulk solid load on a conveyor belt during transportation*, Powder Technology, 307, 2017, pp 190-202, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.020

[5] Wijaya, H., Rajeev, P., Gad, E., Vivekanantham, R.: *Automatic fault detection system for mining conveyor using distributed acoustic sensor*, Measurement, 187, 2022, 110330, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110330

[6] Popescu, F. D., Radu, S. M., Andras, A., Brînas, I., Marita M. O., Rebedea, N. I.: *The modal analysis, using simulation and modelling, of the boom of the ERC-1400 Bucket Wheel Excavator during operation,* Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, Vol. 63 No. 4, 2020, pp. 353-362.

[7] Klimendaa, F., Kampoa, J., Hejma, P.: *Vibration measurement of conveyor rollers*, Procedia Engineering, 136, 2016, pp. 198-203, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.197

[8] Woźniak, D.: *Laboratory tests of indentation rolling resistance of conveyor belts*, Measurement, 150, 2020, 107065, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107065

[9] Zhang, S.; Xia, X.: *Modelling and energy efficiency optimization of belt conveyors*, Appl. Energy, 88, 2011, 3061–3071, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.015

[10] Kulinowski, P.; Kasza, P., Zarzycki, J.: *Methods of Testing of Roller Rotational Resistance in Aspect of Energy Consumption of a Belt Conveyor*, Energies, 16, 2023, 26, https://doi.org/10.3390/en16010026

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.27

ADDITÍVAN GYÁRTOTT PCTG ÉS PETG-PTFE ANYAGPÁROK TRIBOLÓGIAI VIZSGÁLATA PIN-ON-DISK MÓDSZERREL

TRIBOLOGICAL INVESTIGATION OF ADDITIVELY MANUFACTURED PCTG AND PETG-PTFE MATERIAL PAIRS USING A PIN-ON-DISK METHOD

Zsibók Marcell, Dr. Zwierczyk Péter Tamás***

ABSTRACT

The aim of this study was the tribological pre-screening of additively manufactured PCTG and PETG-PTFE polymer material pairs to support material selection for subsequent dry-running polymer gear investigations. Homogeneous PCTG–PCTG and PETG-PTFE–PETG-PTFE pairs and the heterogeneous PCTG–PETG-PTFE pair in both pin–disk role assignments were compared under identical loading and kinematic conditions. Specimens with layer heights of 0.16 and 0.20 mm were evaluated. The PCTG–PCTG pairs exhibited the least favourable behaviour, losing stable contact after approximately 1 minute at both layer heights. In contrast, both heterogeneous configurations at 0.20 mm completed the nominal 10 min test with a temperature rise of only about 14–15 °C. At 0.16 mm, a marked role asymmetry was observed, while the PETG-PTFE–PETG-PTFE pair showed layer-height-dependent behaviour. The results indicate that, in addition to the individual material properties, the tribological compatibility between the mating polymers is relevant to the screening of additively manufactured polymer machine elements. The heterogeneous PCTG–PETG-PTFE pair is therefore a candidate for repeated and gear-scale investigations.

Keywords: additive manufacturing; PCTG; PETG-PTFE; Pin-on-Disk; tribology; polymer gear; dry sliding; material pairing

1. BEVEZETÉS

1.1. Motiváció

Az additív gyártással előállított polimer alkatrészek egyre több funkcionális gépészeti alkalmazásban jelennek meg. Tribológiai igénybevétel esetén azonban az egyes alapanyagok mechanikai tulajdonságai önmagukban nem elegendők az alkalmazhatóság megítéléséhez, mivel a működési viselkedést az érintkező anyagok párosítása, a súrlódás, a felületi deformáció, a kopás és az ezekhez kapcsolódó hőmérséklet-emelkedés együttesen befolyásolják. Polimer fogaskerekeknél a hőmérséklet növekedése a kifáradási élettartamot is jelentősen módosíthatja [1].

A lehetséges polimer anyagok és anyagpárok száma ugyanakkor nagy, ezért valamennyi jelölt közvetlen fogaskerékszintű vizsgálata jelentős idő- és erőforrásigénnyel járna. Emiatt célszerű egy gyors előszűrési lépcső alkalmazása, amely azonos üzemi körülmények között lehetővé teszi a kedvezőtlen kombinációk kizárását és kijelöli a részletesebb tribológiai, mechanikai, majd fogaskerékszintű vizsgálatra érdemes anyagpárokat.

Egy korábbi vizsgálatban additívan gyártott PLA-, PETG- és ABS-próbatestek termikus viselkedését tanulmányoztuk Pin-on-Disk elrendezésben [2]. A jelen munka ezt a módszertani alapot már célzott tribológiai előszűrésként alkalmazza, kifejezetten a későbbi polimer fogaskerék-vizsgálatok anyagterének szűkítésére.

1.2. Anyagpárosítás és kutatási rés

Száraz polimer–polimer kontaktusban az ellenanyag megválasztása alapvetően befolyásolhatja a tribológiai rendszer működését. Azonos anyagú pároknál bizonyos körülmények között fokozott adhézió, anyagátadás és kölcsönös felületi deformáció jelentkezhet, ugyanakkor különböző anyagok párosítása sem eredményez automatikusan kedvezőbb kopási viselkedést [3,4]. A tribológiai kompatibilitást ezért az adott anyagkombináció és az üzemi feltételek mellett szükséges vizsgálni.

Az anyagválasztás során két, anyagextrúziós additív gyártással jól feldolgozható, poliészter jellegű polimert választottunk eltérő funkcionális szereppel. A PCTG-t potenciális szerkezeti anyagként vizsgáltuk, mivel additív gyártással funkcionális alkatrészek előállítására is alkalmazható [5]. A Francofil PETG-PTFE ezzel szemben 10% PTFE-t tartalmaz [11], ezért tribológiailag módosított ellenanyagként került a vizsgálatba. Fogaskerékpár esetében a két kapcsolódó elem nem szükségszerűen azonos anyagból készül, ezért a szerkezeti és tribológiai funkciók eltérő anyagok közötti megosztása potenciálisan kedvező megoldást jelenthet. A heterogén PCTG–PETG-PTFE párosítás vizsgálatának

** PhD-hallgató, BME Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék*
*** adjunktus, BME Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék*

hipotézise ezért az volt, hogy a szerkezeti jellegű PCTG és a PTFE-tartalmú PETG-PTFE együtt kedvezőbb száraz csúszási viselkedést mutathat, mint a homogén PCTG–PCTG és PETG-PTFE–PETG-PTFE párok [3,4,6].

A heterogén PCTG–PETG–PTFE anyagpár vizsgálatának kiinduló hipotézise ezért az volt, hogy egy szerkezeti jellegű és egy tribológiailag módosított polimer párosítása a vizsgált száraz csúszókontaktusban kedvezőbb működési viselkedést mutathat, mint a homogén PCTG–PCTG és PETG-PTFE–PETG-PTFE konfigurációk. Additívan gyártott PETG–PTFE-alapú kompozitok tribológiai vizsgálata már megjelent a szakirodalomban [6], azonban a célzott szakirodalmi keresés során nem azonosítottunk olyan közvetlen publikációt, amely a PCTG és a PETG–PTFE homogén, valamint heterogén párosításait mindkét Pin-on-Disk szerepkiosztásban összehasonlította volna. A jelen munka ezért ezt a konkrét anyagpárosítást vizsgálja gyors tribológiai előszűrésként a későbbi, részletesebb, fogaskerékszintű vizsgálatok anyagterének szűkítésére.

1.3. A kutatás célja

A kutatás célja a PCTG–PCTG, PETG-PTFE–PETG-PTFE, PCTG pin–PETG-PTFE tárcsa és PETG-PTFE pin–PCTG tárcsa konfigurációk összehasonlító tribológiai előszűrése egyetlen rögzített, kenőanyag nélküli száraz csúszási üzemi pontban. Az előszűrés során a vizsgált konfigurációkat a maximális felületi hőmérséklet, a hőmérséklet-emelkedés, a stabil működési idő és a látható felületi károsodás alapján hasonlítottuk össze. A vizsgálat célja annak megállapítása volt, hogy a vizsgált anyagpárok közül melyek mutatnak a jelen üzemi pontban kedvezőtlen, illetve további vizsgálatra érdemes működési viselkedést. A 0,16 és 0,20 mm-es rétegvastagságúak összehasonlítása csupán gyártástechnológiai kiegészítés.

Mivel konfigurációnként egy-egy előszűrőmérés készült, a jelen vizsgálat nem az általános tribológiai összefüggések vagy statisztikailag reprezentatív anyagjellemzők meghatározására irányult. A Pin-on-Disk vizsgálatok eredményeiből a fogaskerék élettartamát vagy megengedett terhelését közvetlenül nem lehet meghatározni [8]. Az eredmények célja a későbbi ismétléses tribológiai, mechanikai és fogaskerékszintű vizsgálatokhoz felhasználható anyagpárok körének szűkítése volt.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZER

2.1. Vizsgált anyagok és próbatestek gyártása

A vizsgálatokhoz két anyagextrúziós (MEX) additív gyártással feldolgozható polimer filamentet alkalmaztunk. A vizsgálatokhoz Fiberlogy PCTG filamentet, valamint Francofil PETG-PTFE filamentet alkalmaztunk; utóbbi kereskedelmi megnevezése PETG-PTFE Blanc. A PCTG additív gyártási alkalmazhatóságát korábbi vizsgálatok is tárgyalták [5], míg PETG-PTFE-alapú additív kompozitok mechanikai és tribológiai vizsgálatára szintén található szakirodalmi előzmény [6]. A Francofil gyártói specifikációja szerint a jelen kutatásban alkalmazott PETG-PTFE filament 10% PTFE-t tartalmaz [11].

A pin- és tárcsapróbatesteket Bambu Lab P1S berendezéssel készítettük. Mindkét alapanyag esetében azonos PETG-alapú Bambu Studio profilt alkalmaztunk, hogy az összehasonlítás során a gyártási beállításokból származó eltéréseket a lehetőségekhez mérten csökkentsük. A vizsgálat kiegészítő gyártástechnológiai változója a 0,16 és 0,20 mm-es rétegvastagság volt; a további fő gyártási paramétereket változatlanul tartottuk. A próbatestek gyártásához alkalmazott fontosabb paramétereket az 1. táblázat foglalja össze.

Mindkét filamentet a gyártást megelőzően legalább 12 órán keresztül 60 °C-on szárítottuk. A próbatesteken külön szabványos klimatikus kondicionálást nem végeztünk. A próbatesteket PEI-tárgyasztalfelületen, a legnagyobb sík felületükkel a tárgyasztalra fektetve gyártottuk. A Pin-on-Disk vizsgálat során a próbatest felső, nyomtatott sík felülete vett részt a tribológiai kontaktusban.

1. táblázat. A próbatestek fő gyártási paraméterei

Paraméter	Érték
Nyomtató	Bambu Lab P1S
Fúvókaátmérő	0,4 mm
Fúvóka-hőmérséklet	250 °C
Tárgyasztal-hőmérséklet	70 °C
Tárgyasztalfelület	PEI
Rétegvastagság	0,16 / 0,20 mm
Kitöltési tényező	100%
Kerületek száma	4
Felső / alsó tömör héj	1,5 / 1,5 mm
Jellemző vonalszélesség	0,42–0,45 mm
Külső fal névleges sebessége	60 mm/s
Belső fal névleges sebessége	300 mm/s
Kitöltés névleges sebessége	270 mm/s
Első réteg sebessége	50 mm/s
Hűtés	20–40%; első 3 réteg: 0%
Előzetes szárítás	60 °C, ≥12 h
Tribológiai kontaktfelület	felső nyomtatott felület

2.2. Pin-on-Disk mérési elrendezés és kiértékelés

A tribológiai vizsgálatokat saját fejlesztésű Pin-on-Disk mérőberendezéssel végeztük, amelynek korábbi változatát már bemutattuk [2]. A mérési elrendezésben a lineárisan megvezetett pin-próbatestet normálerővel a forgó polimer tárcsa felső felületéhez szorítottuk. A tárcsa forgómozgását hajtóműves villamos motor biztosította, míg a tangenciális súrlódási erőt erőmérő szenzor rögzítette; a jelet HBM PMX mérőerősítő és adatfeldolgozó rendszer dolgozta fel. A mérési elrendezést és a fő geometriai paramétereket az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: A Pin-on-Disk mérőberendezés és a 30 kg holttömeggel létrehozott normálerő alkalmazása.

Az ASTM G99 szabvány Pin-on-Disk és Ball-on-Disk elrendezések általános mérési elvét ismerteti, amelyben meghatározott normálerő mellett rögzített pin vagy golyó érintkezik forgó tárcsával [9]. A jelen vizsgálat ennek megfelelő pin–disk geometriát, állandó normálerőt, pályasugarat és csúszási sebességet alkalmazott; azonban célja a tribológiai előszűrés volt, ezért teljes ASTM G99 szerinti megfelelőség igazolása nem képezte a munka tárgyát.

Az előszűréshez 30 kg referencia tömeget alkalmaztunk, amely:

$$F_N = m \cdot g = 294{,}3 \ [N] \qquad (1)$$

Névleges normálerőnek felel meg és megközelíti a mérőberendezés 300 N maximális terhelhetőségét. A nagy terhelési szintet azért választottuk, mert korábbi mérési tapasztalataink alapján kisebb terhelés mellett a rövid előszűrési időn belül kevésbé markáns különbségek jelentkeztek az anyagpárok között [2].

A Ø8 mm-es pin névleges homlokfelülete:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = 50{,}27 \ [mm^2] \qquad (2)$$

Ebből a névleges felületi nyomás:

$$p = \frac{F_N}{A} = 5{,}85 \ [MPa] \qquad (3)$$

A 20 mm-es pályasugár és a 24 min^{-1} fordulatszám mellett a csúszási sebesség:

$$v = \frac{2 \cdot R \cdot \pi \cdot n}{60} = \ 0{,}0503 \ [\mathrm{m/s}] \qquad (4)$$

ahol: R = 20 mm és n = 24 min^{-1} mellett. Az egyetlen vizsgált üzemi ponthoz tartozó PV-érték:

$$PV = p \cdot v = 0{,}294 \ [MPa \cdot m/s] \qquad (5)$$

A tangenciális erő jelét a mérőrendszer 0,1 s-időközönként rögzítette, és ebből folyamatosan számította a súrlódási tényezőt:

$$\mu = \frac{F_t}{F_N} \approx 0{,}20 \qquad (6)$$

A vizsgált konfigurációk között a számított súrlódási tényező eltérése tízezred nagyságrendű volt, és a mérés során jellemzően $\mu \approx 0{,}20$ érték adódott. A súrlódási tényező részletes tranziens vizsgálata nem volt a jelen előszűrőmérés célja.

Valamennyi konfigurációt azonos normálerő, fordulatszám, pályasugár és 10 perces névleges vizsgálati idő mellett mértük. A vizsgálatokat kenőanyag nélküli, száraz csúszókontaktusban végeztük. A próbát a névleges mérési idő előtt szakítottuk meg, amikor a pin kopása vagy deformációja miatt az eredeti kontaktgeometria és a stabil érintkezés már nem voltak fenntarthatók. A fő mérési paramétereket a 2. táblázat foglalja össze.

A tárcsa felületi hőmérsékletét NEO 75-276 infravörös hőmérővel mértük. A készüléket gyári alapbeállításával használtuk. A tárcsa polimer felületét minden mérési időpontban pásztáztuk és az adott időpontban észlelt legnagyobb felületi hőmérsékletet rögzítettük. A hőmérsékleti adatokat 1 perces időközönként vettük fel. A vizsgálat célja nem egy rögzített pont kontakthőmérsékletének vagy teljes hőmérsékletmezőjének meghatározása, hanem a konfigurációk maximális felületi hőmérséklet alapján történő összehasonlító előszűrése volt. A termikus válasz jellemzésére az alábbi összefüggést használtuk:

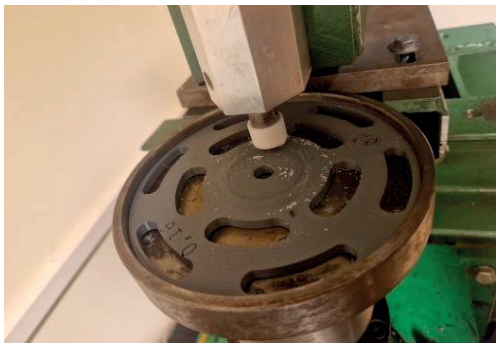
$$\Delta T = T_{max} - T_0 \ [°C] \qquad (7)$$

A kézi infravörös mérésből adódó geometriai és kibocsátási bizonytalanság miatt a hőmérsékleti eredményeket összehasonlító termikus indikátorként értelmeztük.

2. táblázat. A Pin-on-Disk vizsgálat rögzített paraméterei

Paraméter	Érték
Referencia tömeg	30 kg
Normálerő, F_N	294,3 N
Pin átmérő, d	8 mm
Kontaktfelület, A	50,27 mm²
Pályasugár, R	20 mm
Fordulatszám, n	24 min^{-1}
Csúszási sebesség, v	0,0503 m/s
Felületi nyomás, p	5,85 MPa
PV	0,294 MPa·m/s
Súrlódási tényező, μ	≈ 0,20
Hőmérséklet-adatok időköze	1 min
Vizsgálati idő, t	10 min
Kontaktus	kenőanyag nélküli száraz csúszás

A Pin-on-Disk elrendezésben a lineárisan megvezetett pin próbatestet normálerővel a forgó polimer tárcsa felső nyomtatott felületéhez szorítottuk. A tárcsa forgása során a pin rögzített pályasugáron érintkezett a tárcsával. A pin–tárcsa kontaktusának geometriai kialakítását a 2. ábra szemlélteti, ami közvetlenül az egyik mérés után készült. Látható, hogy a PIN jelentős kopást szenvedett. A tárcsán pedig látszik az érintkezés köríve.



2. ábra. A Pin-on-Disk vizsgálat pin–tárcsa kontaktusának kialakítása PCTG-tárcsa és PETG–PTFE pin alkalmazásával.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Termikus és működési viselkedés

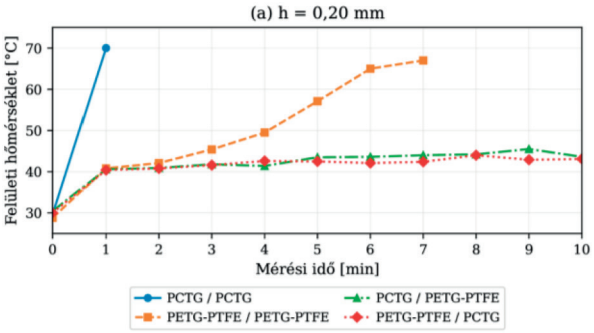
A jelen előszűrőmérésekben a vizsgált konfigurációk között eltérő termikus és működési viselkedés volt megfigyelhető. A hőmérséklet időbeli változását a 3a–b. ábrán szemléltetjük, míg a fő számszerű eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

A PCTG–PCTG párosítás mindkét vizsgált rétegvastagságnál megközelítőleg 1 perc alatt elvesztette a stabil kontaktust. A PETG-PTFE–PETG-PTFE konfiguráció 0,20 mm-es rétegvastagság esetén körülbelül 7 percig működött, míg a 0,16 mm-es változat teljesítette a 10 perces névleges vizsgálati időt.

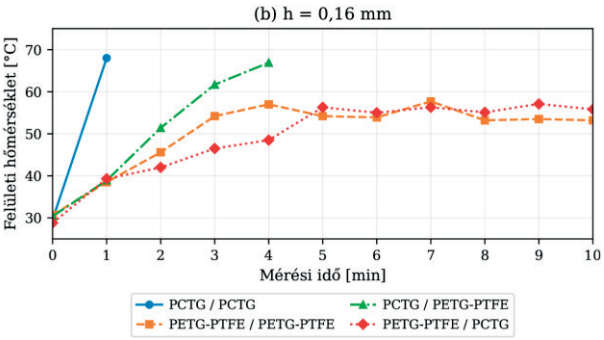
A 0,20 mm-es heterogén PCTG–PETG–PTFE konfigurációk mindkét szerepkiosztásban teljesítették a teljes névleges mérési időt. Ezeknél adódott a legkisebb mért hőmérséklet-emelkedés: PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin esetén $\Delta T = 15{,}1\ °C$, míg PETG − PTFE tárcsa − PCTG pin esetén $\Delta T = 14{,}0\ °C$.

A 0,16 mm-es heterogén konfigurációknál eltérő működési viselkedés jelentkezett. PETG-PTFE tárcsa és PCTG pin alkalmazásakor a mérés a teljes 10 perces névleges időtartamig folytatható volt, míg fordított szerepkiosztásban, PCTG tárcsa és PETG-PTFE pin esetén a vizsgálat körülbelül 4 perc után megszakadt.

A súrlódási tényező valamennyi konfigurációnál közel azonos, $\mu \approx 0{,}20$ értéket mutatott. A konfigurációk között a számított súrlódási tényező eltérése csak tízezred nagyságrendű volt, ezért a jelen mérésekben megfigyelt termikus és károsodási különbségek nem társultak számottevő eltéréshez a makroszkopikus súrlódási tényezőben. A súrlódási tényező részletes tranziens értékelése nem képezte a jelen előszűrő vizsgálat tárgyát. A jelmagyarázatban az első anyag a tárcsa, a második pedig a pin anyagát jelöli.



3a. ábra A felületi hőmérséklet időbeli változása 0,20 mm-es rétegvastagság esetén.



3b. ábra A felületi hőmérséklet időbeli változása 0,16 mm rétegvastagságú rétegnél.

3. táblázat. A vizsgált anyagpárok összefoglaló előszűrési eredményei

0,20 mm rétegvastagság eset

Konfiguráció (tárcsa / pin)	Eredmény
PCTG / PCTG	T_{max} 70,0 °C; ΔT 40,4 °C; t ≈ 1 min; súlyos, nem javasolt
PETG-PTFE / PETG-PTFE	T_{max} 67,0 °C; ΔT 38,2 °C; t≈7 min; jelentős, korlátozott
PCTG / PETG-PTFE	T_{max} 45,5 °C; ΔT 15,1 °C; t ≥ 10 min; enyhe, tovább vizsgálandó
PETG-PTFE / PCTG	T_{max} 44,0 °C; ΔT 14,0 °C; t ≥ 10 min; enyhe, tovább vizsgálandó

0,16 mm rétegvastagság

Konfiguráció (tárcsa / pin)	Eredmény
PCTG / PCTG	T_{max} 68,0 °C; ΔT 38,4 °C; t ≈ 1 min; súlyos, nem javasolt
PETG-PTFE / PETG-PTFE	T_{max} 57,7 °C; ΔT 27,0 °C; t ≥ 10 min; nincs jelentős károsodás; megerősítő ismétlés javasolt
PCTG / PETG-PTFE	T_{max} 66,9 °C; ΔT 36,5 °C; t≈4 min; erősen kopott, nem kedvező
PETG-PTFE / PCTG	T_{max} 57,1 °C; ΔT 28,3 °C; t ≥ 10 min; látható, nem kritikus; tovább vizsgálandó

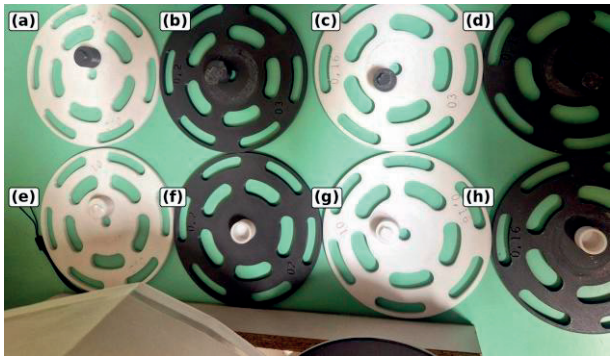
Megjegyzés: ≥10 min a teljes névleges vizsgálati idő teljesítését jelenti.

3.2. Felületi károsodás és előszűrési értékelés

A vizsgálat utáni vizuális értékelés a termikus és működési eredményekkel összhangban eltérő károsodási képet mutatott az egyes konfigurációkban. A PCTG–PCTG párosítás mindkét rétegvastagság esetében súlyos felületi károsodást és jelentős geometriai deformációt mutatott. A 0,20 mm-es PETG-PTFE–PETG-PTFE konfigurációnál szintén jelentős károsodás volt megfigyelhető, míg a 0,16 mm-es változat felületén nem alakult ki hasonló mértékű elváltozás.

A heterogén PCTG–PETG–PTFE párok közül a 0,20 mm-es konfigurációk mutatták a legkedvezőbb vizuális állapotot. A 0,16 mm-es sorozatban a két szerepkiosztás eltérő károsodási képet adott: PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin esetén erősebb kopás volt megfigyelhető, míg PETG-PTFE tárcsa–PCTG pin esetén a felületi károsodás mérsékeltebb maradt.

A vizsgálat utáni próbatestek összképét a 4. ábra mutatja. Mivel konfigurációnként egy-egy előszűrőmérés készült, a megfigyelt károsodási különbségeket a jelen vizsgálati körülményekhez tartozó tapasztalatként értelmezzük; az általános kopási mechanizmus vagy az anyagpárfüggő törvényszerűség megállapításához ismétléses, részletesebb felületvizsgálatok szükségesek.



4. ábra. A Pin-on-Disk vizsgálatok utáni próbatestek. A szürke elemek PCTG-ből, a fehér elemek pedig PETG-PTFE-ből készültek. (a) PETG-PTFE tárcsa–PCTG pin, 0,20 mm; (b) PCTG–PCTG, 0,20 mm; (c) PETG-PTFE tárcsa–PCTG pin, 0,16 mm; (d) PCTG–PCTG, 0,16 mm; (e) PETG-PTFE–PETG-PTFE, 0,20 mm; (f) PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin, 0,20 mm; (g) PETG-PTFE–PETG-PTFE, 0,16 mm; (h) PCTG tárcsa–PETG-PTFE pin, 0,16 mm.

4. KIÉRTÉKELÉS

4.1. Anyagpárosítással kapcsolatos megfigyelések

A PCTG–PCTG konfiguráció a jelen előszűrő mérésekben gyors hőmérséklet-emelkedést és súlyos felületi károsodást mutatott. Polimer tribológiai rendszerekben az adhézió, az anyagátadás, a felületi deformáció és a kialakuló transfer- vagy tribofilm egyaránt befolyásolhatják a súrlódási és kopási viselkedést [3,4]. A jelen vizsgálat részletes felületanalitikai módszer nélkül nem teszi lehetővé a konkrét kopásmechanizmus azonosítását, ezért az adhéziós és termikusan erősített károsodás csak lehetséges magyarázatként értelmezhető.

A PETG-PTFE jelenléte önmagában nem eredményezett kedvezőbb működési viselkedést minden vizsgált konfigurációban. A PTFE-tartalmú polimerrendszereknél az alacsony nyírási ellenállás és a tribofilm kialakulása kedvezően módosíthatják a súrlódási viselkedést, ugyanakkor a kopás mértéke erősen függhet az anyagösszetételtől és a kontaktfeltételektől [3,4,6]. Ez összhangban áll a jelen mérési tapasztalatokkal, miszerint a PETG–PTFE–PETG–PTFE homogén konfiguráció nem minden esetben hoz kedvezőbb eredményt, mint a heterogén párok.

A vizsgált konfigurációk súrlódási tényezője a mérések során közel azonos, $\mu \approx 0{,}20$ érték körül alakult, miközben a termikus válasz és a felületi károsodás mértéke eltérő volt. Ez arra utal, hogy a jelenleg használt rendszerben a makroszkopikus súrlódási tényező önmagában nem elegendő a megfigyelt működési különbségek leírásához. Az anyagátadás, a hőmegoszlás és a lokális deformáció szerepe további részletes vizsgálatot igényel.

A 0,20 mm-es heterogén konfigurációknál a pin és a tárcsa anyagának felcserélése a jelen mérésekben csak kis eltéréssel járt, míg 0,16 mm-es rétegvastagságnál a két szerepkiosztás eltérő működési viselkedést mutatott. Más tribológiai rendszerekben kimutatták, hogy a rögzített és mozgó tagok felcserélése azonos anyagpár esetén is módosíthatja a súrlódási, hő- és kopási viselkedést [7]. A jelen eredmények azonban konfigurációnként egy-egy mérésen alapulnak, ezért a szerepkiosztás hatására vonatkozó általános következtetéshez ismétléses vizsgálatok szükségesek.

4.2. Rétegvastagsággal kapcsolatos megfigyelések

A két vizsgált rétegvastagsághoz a jelen előszűrő mérésekben eltérő működési viselkedés társult, azonban az eltérés iránya az egyes anyagpároknál nem volt egységes. A 0,20 mm-es heterogén PCTG–PETG–PTFE konfigurációk mindkét szerepkiosztásban teljesítették a névleges mérési időt, míg 0,16 mm-es rétegvastagságnál a két heterogén szerepkiosztás eltérő működési viselkedést mutatott. A homogén PETG-PTFE–PETG-PTFE párosítás esetében ugyanakkor a 0,16 mm-es próbatest teljesítette a 10 perces névleges vizsgálati időt, míg a 0,20 mm-es konfiguráció mérése korábban megszakadt.

Az anyagextrúziós eljárással gyártott alkatrészek tribológiai viselkedését a gyártási paraméterek és a réteges szerkezet is befolyásolhatják; korábbi vizsgálatok például a gyártási orientáció és a csúszókopási viselkedés között is kimutattak kapcsolatot [12]. A jelen vizsgálatban azonban a felületi érdességet, a topográfiát és a felszín alatti szerkezetet nem mértük, továbbá konfigurációnként egy-egy mérés történt. Emiatt a 0,16 és 0,20 mm-es rétegvastagsághoz társuló különbségek

megfigyelt tendenciaként értelmezhetők; a rétegvastagság tribológiai hatására vagy annak az anyagpárral való kölcsönhatására vonatkozóan nem vonható le általános következtetés.

4.3. Tudományos jelentőség és továbbvitel

A jelen vizsgálat elsődleges célja a polimer anyagpárok gyors tribológiai előszűrése volt. A maximális felületi hőmérséklet, a működési idő és a látható károsodás együttes értékelésével kijelölhetők azok a konfigurációk, amelyek részletesebb vizsgálatra érdemesek.

A Pin-on-Disk mérés eredményeiből a fogaskerék-élettartam vagy a megengedett terhelés közvetlenül nem határozható meg [8], ugyanakkor a termikus viselkedés releváns előszűrési szempont lehet polimer fogaskerekek esetében [1]. A további kutatásban az ígéretes anyagpárok ismétléses tribológiai és mechanikai vizsgálata után célszerű kialakítani egy fogaskerékszintű mérési koncepciót.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során additívan gyártott PCTG és PETG-PTFE homogén és heterogén anyagpárok tribológiai viselkedését hasonlítottuk össze egy rögzített száraz Pin-on-Disk üzemállapotban. A PCTG–PCTG párok mindkét rétegvastagságnál körülbelül 1 percen belül elvesztették a stabil kontaktust. A 0,20 mm-es heterogén PCTG–PETG–PTFE konfigurációk ezzel szemben teljesítették a 10 perces névleges vizsgálati időt 14–15 °C-os hőmérséklet-emelkedés mellett. A 0,16 mm-es heterogén konfigurációk között markáns szerepaszimmetria volt megfigyelhető, míg a PETG-PTFE–PETG-PTFE homogén párnál a 0,16 mm-es változat stabilabb viselkedést mutatott. A közel azonos $\mu \approx 0{,}20$ súrlódási tényező ellenére a termikus és károsodási viselkedés jelentősen eltér, ami arra utal, hogy az anyagpárosítás a további tervezésnél figyelembe veendő tényező. A jelen eredmények előszűrési jellegűek; a PCTG–PETG–PTFE anyagpár további ismétléses, fogaskerékszintű vizsgálata indokolt.

6. SUMMARY

This study investigated the tribological behaviour of additively manufactured PCTG and PETG-PTFE homogeneous and heterogeneous material pairs under a fixed dry Pin-on-Disk operating condition. The PCTG–PCTG pairs lost stable contact after approximately one minute at both layer heights. In contrast, both heterogeneous PCTG–PETG-PTFE configurations manufactured with a 0.20 mm layer height completed the nominal 10 min test while showing only about 14–15 °C temperature rise. At 0.16 mm, the heterogeneous pair exhibited a clear role asymmetry, whereas the self-mated PETG-PTFE pair showed better stability than its 0.20 mm counterpart. The measured friction coefficient was approximately $\mu \approx 0.20$ across all configurations; however, their thermal responses and surface degradation differed substantially. This indicates that the tribological compatibility of the mating materials cannot be assessed solely from the macroscopic friction coefficient. The present results are intended as a screening step, and the heterogeneous PCTG–PETG-PTFE pair is considered a promising candidate for repeated testing and subsequent gear-scale validation.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Francofil vállalatnak a kutatáshoz felhasznált PETG-PTFE alapanyag biztosításáért, valamint a szakmai együttműködésért. Köszönjük szépen Dr. Baka Ernő Zsolt és Dr. Csobán Attila szakmai támogatását.

8. IRODALOM

[1] KALIN M., KUPEC A.: The dominant effect of temperature on the fatigue behaviour of polymer gears. Wear, Vol. 376–377, 2017, pp. 1339–1346. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.02.003

[2] ZSIBÓK M., BAKA E. Z., HORÁK P.: Additívan gyártott polimer próbatestek Pin-on-Disk vizsgálata. GÉP, 76. évf., 3–4. sz., 2025, pp. 128–131. https://doi.org/10.70750/GEP.2025.3-4.31

[3] JÓZWIK J., DZIEDZIC K., BARSZCZ M., PASHECHKO M.: Analysis and Comparative Assessment of Basic Tribological Properties of Selected Polymer Composites. Materials, Vol. 13, No. 1, 2020, 75. https://doi.org/10.3390/ma13010075

[4] VASILEV A. P., STRUCHKOVA T. S., NIKIFOROV L. A., OKHLOPKOVA A. A., GRAKOVICH P. N., SHIM E. L., CHO J.-H.: Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites with Carbon Fibre and Layered Silicate Fillers. Molecules, Vol. 24, No. 2, 2019, 224. https://doi.org/10.3390/molecules24020224

[5] AMIN A., JACK D. A., RAVINDRANATH P. K., FLECK T. J.: Nondestructive quantification of internal raster path for additively manufactured components via ultrasonic testing. Scientific Reports, Vol. 14, 2024, 11416. https://doi.org/10.1038/s41598-024-61416-5

[6] AZIM S., VANDE RYSE R., D'HOOGE D. R., EDELEVA M., CARDON L., DE BAETS P.: Comparing Mechanical and Tribological Properties of PETg-PTFE-EG/h-BN Composites Produced by Injection Moulding and Additive Manufacturing. Journal of Composites Science, Vol. 10, No. 10, 2026, 511. https://doi.org/10.3390/jcs10100511

[7] XU A., TIAN P., WEN S., GUO F., HU Y., JIA W., DONG C., TIAN Y.: Differences in Tribological Behaviors upon Switching Fixed and Moving Materials of Tribo-pairs including Metal and Polymer. Scientific Reports, Vol. 7, 2017, 13041. https://doi.org/10.1038/s41598-017-13262-x

[8] MATKOVIČ S., POGAČNIK A., KALIN M.: Wear-coefficient analyses for polymer-gear life-time predictions: A critical appraisal of methodologies. Wear, Vol. 480–481, 2021, 203944. https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203944

[9] ASTM INTERNATIONAL: ASTM G99-23 – Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. ASTM International, 2023. https://doi.org/10.1520/G0099-23

[10] FIBERLOGY: PCTG Filament. Fiberlab S.A., Poland. https://fiberlogy.com/en/product/pctg-filament/, Hozzáférés: 2026.10.18.

[11] FRANCOFIL: *PETG PTFE Blanc – Technical Filament.* Francofil, France. https://francofil.fr/en/product/petg-ptfe-blanc/ Hozzáférés: 2026.10.18.

[12] ALAMRO T., YUNUS M., ALFATTANI R., ALNASER I. A.: Effect of part build orientations and sliding wear factors on tribological characteristics of FDM processed parts. Archive of Mechanical Engineering, Vol. 68, No. 3, 2021, pp. 321–336. https://doi.org/10.24425/ame.2021.138395

https://doi.org/10.70750/GEP.2026.3-4.28

A FORGÁCSOLÓERŐ, A REZGÉS, A FELÜLETI ÉRDESSÉG ÉS A HENGERESSÉG VIZSGÁLATA C45 ACÉL ESZTERGÁLÁSA SORÁN

INVESTIGATION OF CUTTING FORCE, VIBRATION, SURFACE ROUGHNESS, AND CYLINDRICITY DURING TURNING OF C45 STEEL

Inácio Manuel Junqueira[*], *Dr. Csaba Felhő*[**]

ABSTRACT

This study investigates cutting force, vibration acceleration, surface roughness, and geometric deviations during dry CNC turning of C45 steel (EN 1.0503). A Taguchi L9 design was implemented using cutting speeds of 160, 180, and 210 m/min, feed rates of 0.10, 0.20, and 0.30 mm/rev, and depths of cut of 0.5, 1.0, and 1.5 mm. Each of the nine conditions was repeated three times (27 machining trials). Force and vibration were monitored during cutting, and surface texture and geometric accuracy were evaluated after machining. The supplied nine-row results summary shows cutting force from 257.12 to 522.86 N, RMS vibration from 5.20 to 10.21 m/s², Ra from 2.90 to 9.64 µm, and cylindricity deviation from 11.23 to 20.92 µm. Maximum force and vibration occurred under condition 3, while the greatest Ra and Rz occurred under condition 7. Descriptive and exploratory correlation analyses are reported for the nine supplied summary rows; inference about within-condition repeatability requires the individual measurements from all 27 trials. The combined assessment illustrates the importance of evaluating mechanical loading, dynamics, surface texture, and form accuracy together.

Keywords: C45 steel; turning; cutting force; vibration; surface roughness; cylindricity;MPU6050 sensor.

1. INTRODUCTION

Turning is widely used to manufacture rotational components where dimensional precision and surface integrity are critical. Cutting speed, feed rate, and depth of cut influence chip formation, cutting resistance, tool–workpiece dynamics, surface texture, and geometric deviations [1–3]. C45 (EN 1.0503) is a medium-carbon steel used for shafts and machine components. Reliable process selection requires assessment of mechanical loading alongside the quality of the generated surface [1,2].

Cutting force reflects the mechanical interaction during material removal, whereas vibration provides information on dynamic stability and potential chatter [2,3]. Surface roughness, commonly expressed through Ra and Rz, describes profile texture but does not alone establish form accuracy. Cylindricity (CYLt), roundness (RONt), and straightness (STRt) characterize different geometric departures from ideal shape; their interpretation depends on the evaluation procedure [4–6].The present work investigates these responses together during dry turning of C45 steel. A three-factor, three-level Taguchi L9 array with three repetitions per condition was used. The objective is to compare the influence of the cutting parameters and explore associations between force, vibration, roughness, and form deviation without assuming that statistical association establishes causation C45 (EN 1.0503) is used in rotational components where both surface finish and geometric form are important. Cutting forces can affect deflection and mechanical loading, whereas vibration can reflect dynamic excitation, of the tool–workpiece system. Consequently, force and vibration should be interpreted together with roughness and form measurements rather than used as interchangeable quality indicators [1–3].

Roundness, straightness, and cylindricity quantify different aspects of form and need not respond in the same direction to changes in cutting conditions. Geometric product specification principles distinguish these characteristics and the operators used to evaluate them [5,6]. The present work therefore combines mechanical, dynamic, texture, and form responses in one L9 experimental framework; the reported nine condition-level values are analyzed without assuming that the 27 underlying trial records are available.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Material, workpiece and turning arrangement

Three C45 medium-carbon steel (EN 1.0503) cylindrical specimens were machined in a segmented configuration to provide distinct evaluation regions. The schematic shows a three-jaw chuck, a supported workpiece, a cutting tool, and a tool-holder-mounted acceleration sensor (Fig. 1). The machining setup photograph illustrates the prepared segmented cylindrical workpiece (Fig. 2). Turning was performed dry on a

* *PhD student, University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Institute of Manufacturing Science*
** *associate professor, University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Institute of Manufacturing Science*

Hunor PNC721 CNC lathe. Cutting insert grade, nose radius, workpiece diameter, and tool geometry should be checked against the laboratory log before submission.

Experimental investigations were conducted on C45 steel (EN 1.0503) using a Hunor PNC721 CNC lathe under dry cutting conditions. Cylindrical workpieces (40 mm diameter, 200 mm length) were machined using a DSDNN 2020K 12 tool holder with Sandvik Coromant SNMG 120416-PR 4425 carbide inserts [1,2]. Cutting forces were measured using a Kistler 9257A three-component dynamometer, Kistler 5011A charge amplifiers, and an NI CompactDAQ-9171 system, with data recorded in LabVIEW 2018 SP1. Vibrations were monitored using an MPU6050 accelerometer mounted near the cutting insert and connected to an ESP32-based data acquisition system

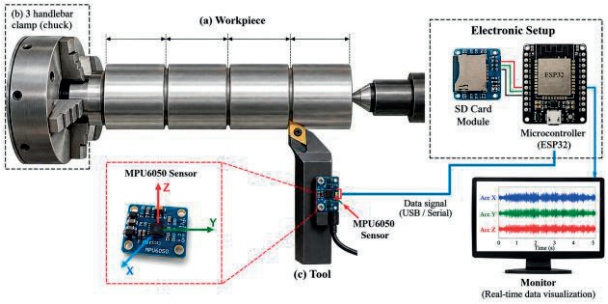


Figure 1. Schematic of segmented workpiece, tool, MPU6050 vibration sensor, ESP32 and recording arrangement.

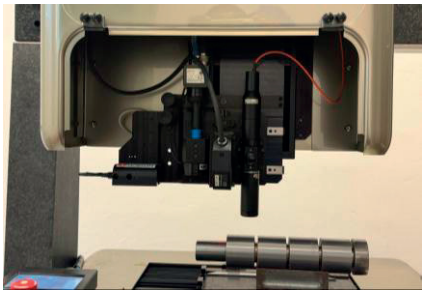


Figure 2. Photograph of the segmented workpiece in the measurement arrangement.

2.2. Experimental design

A Taguchi L9 (3^3) orthogonal array was used. The factors were cutting speed V_c = 160, 180, 210 m/min; feed f = 0.10, 0.20, 0.30 mm/rev; and depth of cut a_p = 0.5, 1.0, 1.5 mm. Each condition was machined three times, giving 27 trials.

Table 1. Experimental design

Run	V_c(m/min)	f(mm/rev)	a_p(mm)
1	160	0.10	0.5
2	160	0.20	1.0
3	160	0.30	1.5
4	180	0.10	1.0
5	180	0.20	1.5
6	180	0.30	0.5
7	210	0.10	1.5
8	210	0.20	0.5
9	210	0.30	1.0

The nine values supplied for each response are treated here as condition-level reported results; whether they are three-trial means must be verified. The L9 design primarily supports estimation of main effects; interactions are not independently resolved.

2.3. Cutting force and vibration monitoring

Cutting force signals were acquired using a Kistler 9257A dynamometer in combination with Kistler 5011A charge amplifiers, NI CDAQ-9171 data acquisition hardware, and LabVIEW software. The resulting force response was represented by AF(N). To characterize the overall force level during the turning process, the root mean square (RMS) value of the measured force signal was calculated and used as the representative cutting-force parameter. This approach provides a reliable measure of the effective force magnitude by considering the complete force signal over the sampling interval rather than individual instantaneous values.

Tool-holder vibrations were monitored using an MPU6050 three-axis accelerometer mounted directly on the tool holder. The vibration acquisition system consisted of an ESP32 microcontroller, an SD-card module for data storage, and a computer-based display interface, as illustrated in Fig. 1. The acceleration data collected along the three orthogonal axes were combined to determine the resultant acceleration magnitude, which was used to evaluate the vibration behavior of the cutting system throughout the machining process. The calculated acceleration magnitude provided a single parameter representing the overall vibration intensity during dry turning.

The RMS value of the force signal was calculated according to Equation (1), while the resultant acceleration magnitude was obtained using Equation (2).

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} {x^2}_i} \tag{1}$$

$$a = \sqrt{{a_x}^2 + {a_y}^2 + {a_z}^2} \tag{2}$$

2.4. Surface roughness and form measurement

Ra and Rz were evaluated using an AltiSurf 520 surface-measurement system. Ra is the mean absolute height of the roughness profile over the evaluation length; the exact Rz definition depends on the applicable profile standard and processing settings [4]. Cutoff, evaluation length and trace positions require confirmation. Cylindricity (CYLt), roundness (RONt), and straightness (STRt) were measured with a Taylor Hobson Talyrond 365 system (Fig. 3), following geometrical product specification concepts [5,6]. The figure shows the specimen mounted vertically on the rotary table with a contacting probe. The filtering criteria and mathematical fitting methods used to determine the form parameters followed the standard settings of the

Taylor Hobson Talyrond 365 system. After acquisition, the data were exported to Microsoft Excel, where statistical processing, data organization, and comparative analyses among the machining conditions were performed.



Figure 3. Talyrond measurement setup with vertically mounted machined specimen and contact probe.

2.5. Data processing and statistical approach

The experimental results obtained from the nine machining conditions of the Taguchi L9 orthogonal array were subjected to statistical analysis to evaluate the relationships among the measured responses. For each response variable, descriptive statistics, including minimum and maximum values, were determined to characterize the range of variation across the experimental conditions. In addition, Pearson correlation analysis was performed to assess the strength and direction of the linear relationships between the machining responses. Because the analysis was conducted using nine condition-level observations rather than the complete set of 27 individual measurements, the resulting correlations should be considered exploratory. Consequently, any associated p-values should not be interpreted as formal significance tests based on 27 independent observations. More comprehensive statistical analyses, such as repetition-level means, standard deviations, confidence intervals, and residual-error analysis of variance (ANOVA), would require access to the complete dataset containing all experimental repetitions. Furthermore, due to the limited number of observations in the L9 design, any regression models or main-effect trends derived from the data should be interpreted with caution and used primarily to support the understanding of general response tendencies. The Pearson correlation coefficient used to quantify the linear relationships among variables was calculated according to Equation (3).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}\left((y_i - \bar{y})\right)^2}} \qquad (3)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Experimental response overview

Table 2 presents the nine supplied condition-level response records. All trials were performed without coolant. Cutting force ranged from 257.12 N (run 9) to 522.86 N (run 3). RMS vibration ranged from 5.20 m/s² (run 8) to 10.21 m/s² (run 3). The Ra range was 2.90–9.64 µm, and Rz was 27.53–42.44 µm. Geometric deviations varied across the conditions: STRt 0.40–5.27 µm, RONt 2.20–9.21 µm, and CYLt 11.23–20.92 µm.

Table 2. Supplied condition-level measurements (Ra, Rz, STRt, RONt, CYLt in µm; vibration RMS).

Run	AF N	Ra	Rz	STRt	RONt	CYLt	Vib
1	300.9	4.5	31.6	3.2	3.4	17.1	9.3
2	356.1	3.3	27.5	0.6	3.1	20.7	9.9
3	522.9	8.2	34.4	0.4	3.1	20.9	10.2
4	410.7	6.3	35.2	1.7	2.2	11.2	8.1
5	510.8	4.1	31.9	5.3	4.7	19.6	9.6
6	260.7	2.9	28.4	0.5	3.2	18.3	7.1
7	430.6	9.6	42.4	0.7	2.6	14.5	7.3
8	365.0	7.9	36.5	1.6	9.2	16.4	5.2
9	257.1	4.8	32.5	2.3	8.1	17.4	5.9

The maximum force and maximum vibration were both observed in run 3 (Vc = 160 m/min, f = 0.30 mm/rev, ap = 1.5 mm). In contrast, the highest Ra (9.64 µm) and Rz (42.44 µm) were observed in run 7 (210 m/min, 0.10 mm/rev, 1.5 mm). Maximum RONt occurred in run 8 (9.21 µm), whereas maximum STRt occurred in run 5 (5.27 µm). These differing extrema show that the highest mechanical load did not coincide with the worst value for every surface or form response.

3.2. Effects of machining conditions

For the nine reported values, the lowest cutting force occurred in run 9 despite its relatively high cutting speed and feed. Run 3, with high depth of cut and feed, generated the largest force. However, individual factor effects cannot be isolated by comparing two arbitrary runs because more than one parameter changes. A balanced main-effect comparison or ANOVA should use the full experimental design and preferably all three repetitions.

The roughness results are not monotonic with feed across the L9 conditions: for example, run 7 at f = 0.10 mm/rev had the largest Ra. This suggests that surface generation depends on multiple interacting physical mechanisms, potentially including tool condition and dynamics; the present summary alone does not identify their causes. Cylindricity also showed no simple one-to-one correspondence with force or vibration.

3.3. Exploratory response correlations

The correlations in Table 3 quantify associations among condition-level responses only. They should not be interpreted as causal links or as substitutes for analysis of the 27 underlying trials. The small sample size, multiple comparisons, and possible averaging of replicates limit statistical confidence. A final repeatability analysis should report the within-condition standard deviation and ideally uncertainty intervals for each response.

Table 3. Exploratory Pearson correlations across nine supplied rows; p-values

Pair	Pearson r	p (n=9)
Vibration–force	0.529	0.143
Vibration–Ra	-0.222	0.566
Vibration–CYLt	0.462	0.211
Force–CYLt	0.124	0.750
Ra–Rz	0.929	0.000

3.4. Cutting-force response and factor effects

As shown in Table 2, the cutting force varied substantially across the nine machining conditions. Figure 4 compares the condition-level forces, with the highest value of 522.86 N in Run 3 and the lowest value of 257.12 N in Run 9. Figure 9 summarizes the mean cutting force at each cutting-parameter level, using the balanced L9 design. These descriptive main effects should not be interpreted as independent interaction estimates or as a replicated-trial ANOVA.

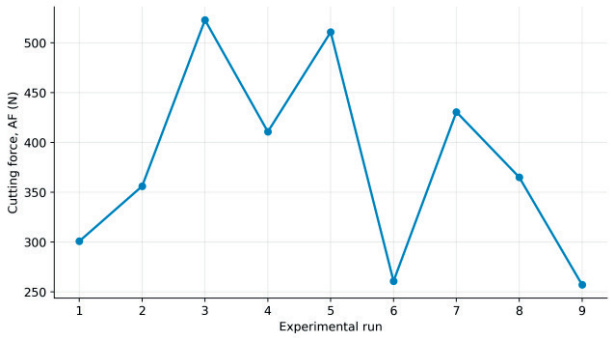


Figure 4. Cutting force measured across the nine Taguchi L9 turning conditions.

3.5. Vibration acceleration

The vibration values in Table 2 ranged from 5.20 to 10.21 m/s². Figure 5 shows the RMS vibration response for each cutting condition. Run 3 produced the highest reported vibration magnitude (10.21 m/s²), coinciding with the maximum cutting force, whereas Run 8 had the lowest vibration (5.20 m/s²). This agreement at one condition does not establish a causal relationship between the two signals.

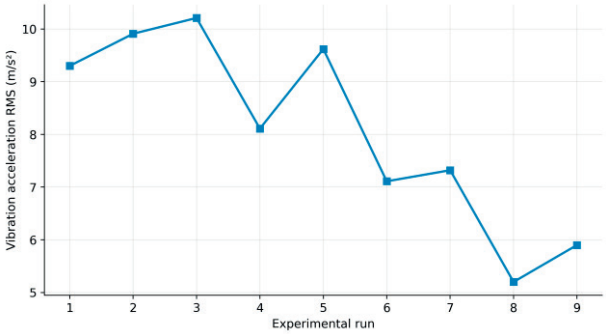


Figure 5. RMS vibration acceleration across the nine turning conditions.

3.6. Surface roughness and geometric quality

Figure 6 illustrates the variation in Ra and Rz from Table 2. Both roughness measures reached their maximum in Run 7 (Ra = 9.64 µm; Rz = 42.44 µm), rather than in Run 3, where the cutting force was greatest. Figure 7 presents STRt, RONt and CYLt. The maximum cylindricity deviation occurred in Run 3 (20.92 µm), maximum roundness deviation in Run 8 (9.21 µm), and maximum straightness deviation in Run 5 (5.27 µm). These different peak conditions indicate that individual machining-quality responses should be assessed separately.

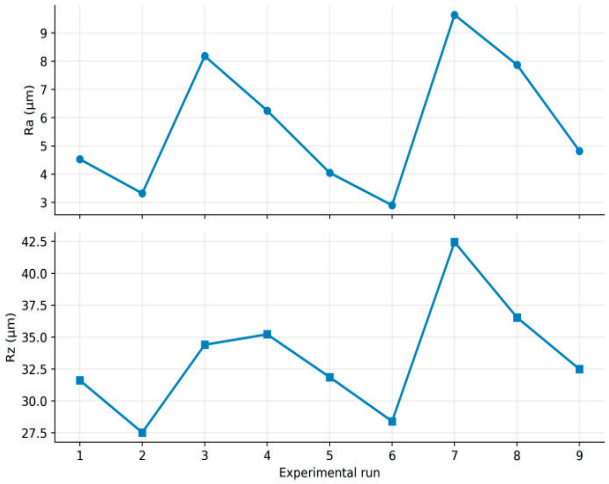


Figure 6. Variation of surface roughness parameters Ra and Rz across the experimental conditions.

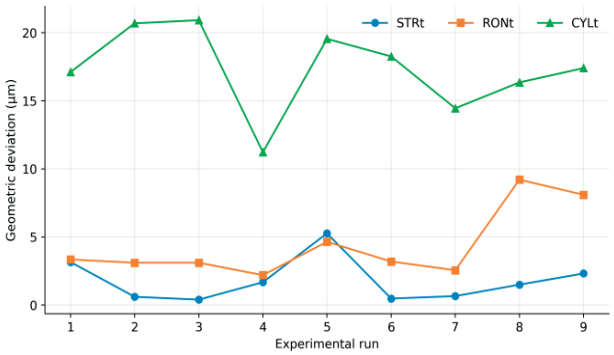


Figure 7. Straightness, roundness and cylindricity deviations across the experimental conditions.

3.7. Relationships among machining responses

The Pearson coefficients in Table 3 are visualized in Figure 8 as a correlation matrix. These associations were computed from nine condition-level records (n = 9), not the 27 individual repetitions. For example, the cutting force–vibration correlation is positive ($r \approx 0.529$), but its two-sided unadjusted p-value is approximately 0.143. Correlation strength should therefore be interpreted cautiously, without claiming statistical significance or causality from these limited data.

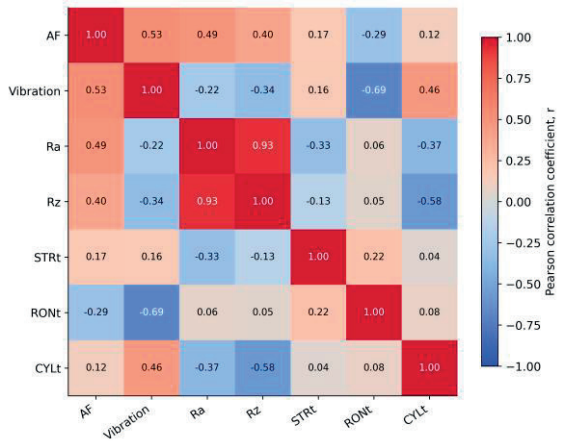


Figure 8. Pearson correlation heatmap of cutting force, vibration, surface roughness and geometric deviations (n = 9 condition-level records).

To better illustrate the influence of the machining parameters on cutting force, the average force values were calculated for each level of cutting speed, feed rate, and depth of cut based on the Taguchi L9 experimental design. The results indicate that cutting force remained relatively stable between cutting speeds of 160 and 180 m/min but decreased at 210 m/min. Feed rate exhibited a non-monotonic effect, with the highest mean cutting force observed at 0.20 mm/rev. In contrast, depth of cut showed the strongest influence on cutting force, increasing substantially as the depth of cut increased from 0.5 mm to 1.5 mm. This behavior is consistent with the increase in the uncut chip cross-sectional area, which directly affects the cutting load generated during machining. The trends shown in Figure 9 are descriptive and represent the average response at each factor level within the L9 design.

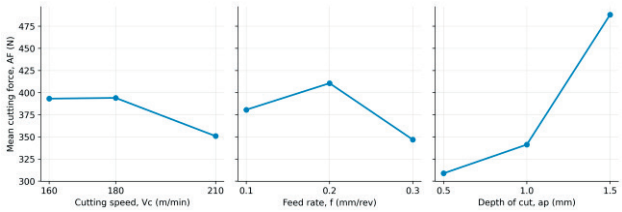


Figure 9. Descriptive main effects of cutting speed, feed rate, and depth of cut on cutting force.

3.8. Three-dimensional response surfaces for geometric accuracy

To complement the measured geometric deviations in Table 2 and the condition-by-condition comparison in Figure 7, Figure 10 presents modeled response surfaces for roundness (RONt), straightness (STRt), and cylindricity (CYLt) as functions of cutting speed and feed rate. The surfaces are descriptive predictions from additive regression models fitted to the nine supplied L9 response records, with depth of cut held at 1.0 mm. They should not be interpreted as directly observed measurements at the interpolated grid points.

Figure 10(a) concerns roundness, which ranged from 2.20 µm in Run 4 to 9.21 µm in Run 8. The additive model explained approximately 61% of the nine-point variation ($R^2 \approx 0.61$). Figure 10(b) illustrates straightness, ranging from 0.40 µm in Run 3 to 5.27 µm in Run 5. Its model fit was weak ($R^2 \approx 0.05$), so the apparent surface slope is not robust evidence of a systematic trend. Figure 10(c) depicts cylindricity, ranging from 11.23 µm in Run 4 to 20.92 µm in Run 3; the corresponding additive model explained approximately 65% of variation ($R^2 \approx 0.65$).

These surfaces suggest that the geometric responses need not improve simultaneously under a single combination of cutting parameters. The Taguchi L9 arrangement cannot independently resolve all factor interactions, and the three-repetition raw records are unavailable for a replicated model validation. Consequently, the response surfaces should be used as exploratory visualization, not as validated optimization maps.

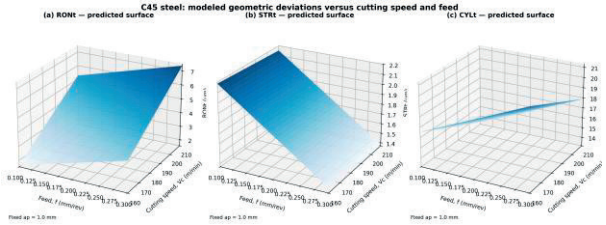


Figure 10. Modeled three-dimensional response surfaces for (a) roundness deviation (RONt), (b) straightness deviation (STRt), and (c) cylindricity deviation (CYLt), as functions of cutting speed and feed rate at a_p = 1.0 mm.

3.9. Limitations and practical implications

The available data support descriptive comparisons across nine machining conditions. Although 27 trials were performed, their separate measurements were not supplied; therefore, no valid within-run repeatability statistics or replicated-trial ANOVA is claimed. Further reporting should include tool geometry, sensor acquisition settings, roughness evaluation parameters, Talyrond filtering, and a clear definition of AF. Joint monitoring remains useful because force, vibration, surface roughness, and form deviations describe different aspects of machining quality.

3.10. Discussion and Comparison with Previous Studies

The experimental results obtained in the present investigation are compared with published research on the turning of C45 steel and related machining processes. Particular attention is given to cutting force, vibration acceleration, surface roughness, and geometric accuracy. The present study found that cutting force varied from 257.12 to 522.86 N, while surface roughness Ra ranged from 2.90 to 9.64 µm. The maximum cutting force and vibration occurred in Run 3, whereas the highest surface roughness was observed in Run 7. This difference indicates that mechanical loading and surface quality are not necessarily governed by identical machining conditions. Duong [7] investigated the optimization of cutting parameters during C45 steel turning using the Taguchi method and identified feed rate as the most influential factor affecting surface roughness, followed by cutting speed and depth of cut. Similar findings were reported by Huynh et al. [8], who demonstrated the dominant influence of feed rate on surface roughness using Taguchi design and ANOVA. In contrast, the present investigation showed a non-monotonic roughness response, with the highest Ra occurring at the lowest investigated feed rate. This difference suggests that surface generation may depend on additional factors, including tool geometry, cutting dynamics, and experimental conditions. Şap et al. [9] investigated the machinability of CK45 steel under dry, minimum quantity lubrication (MQL), and nanofluid conditions. Their results showed that lubrication significantly improved surface quality, with minimum reported Ra values of 2.168, 1.341, and 0.965 µm, respectively. The minimum Ra obtained in the present dry-turning investigation was 2.90 µm, which was higher than their reported values. However, differences in cutting parameters, machining operations, tooling, and lubrication conditions prevent direct attribution of this difference to any single factor. Regarding geometric accuracy, the present results revealed weak correlations between cutting force and cylindricity ($r = 0.124$) and between vibration and surface roughness Ra ($r = -0.222$). These findings indicate that neither mechanical loading nor RMS vibration acceleration alone adequately describes the observed surface and form quality. Unlike the cited investigations, which primarily emphasized roughness optimization or lubrication performance, the present study jointly evaluated cutting force, vibration, surface roughness, straightness, roundness, and cylindricity.

4. CONCLUSION

Dry turning of C45 steel was examined using nine Taguchi L9 cutting conditions, each repeated three times. Across the nine reported response records, cutting force ranged from 257.12 to 522.86 N and RMS vibration from 5.20 to 10.21 m/s². Ra ranged from 2.90 to 9.64 µm, Rz from 27.53 to 42.44 µm, and cylindricity from 11.23 to 20.92 µm. Run 3 exhibited both the highest force and vibration, whereas run 7 had the highest Ra and Rz. Different runs produced the maxima of roundness and straightness deviations, confirming that no single measured response completely represents overall machining quality. The nine-row dataset enables descriptive and exploratory analysis; reliable estimation of trial-to-trial variability and formal replicated-trial inference requires the individual measurements from all 27 experiments.

5. REFERENCES

[1] KALPAKJIAN S., SCHMID S. R.: *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th Edition, Pearson Education, 2014. ISBN 978-0-13-312874-1.

[2] STEPHENSON D. A., AGAPIOU J. S.: *Metal Cutting Theory and Practice*, 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton, 2016.

[3] ALTINTAS Y.: *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2012.

[4] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 4287:1997—Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Profile Method—Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*, ISO, Geneva, 1997.

[5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 12180-1:2011—Geometrical Product Specifications (GPS)—Cylindricity—Part 1: Vocabulary and Parameters of Cylindrical Form*, ISO, Geneva, 2011.

[6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO 12180-2:2011—Geometrical Product Specifications (GPS)—Cylindricity—Part 2: Specification Operators*, ISO, Geneva, 2011.

[7] DUONG D.-T.: Experimental Research to Determine the Optimal Cutting Parameters for Reducing Roughness in Turning of C45 Steel, *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, Vol. 4, No. 3, 2024, pp. 440–442. Available: https://www.multiresearchjournal.com/arclist/list-2024.4.3/id-2805

[8] HUYNH T. T., NGUYEN H. T., HUYNH Q. K., NGUYEN V. C., BUI V. H.: Investigating Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness Machined by Turning of C45 Steel Based on Taguchi Methodology and ANOVA, *CTU Journal of Innovation and Sustainable Development*, Vol. 17, Special Issue ETMD, 2025, pp. 53–58. https://doi.org/10.22144/ctujoisd.2025.007

[9] ŞAP E., USCA Ü. A., DEĞIRMENCI Ü., ŞAP S., UZUN M.: Evaluation of Machinability and Energy Consumption of CK45 Steel Using Synthetic-Based Nanofluid and Minimum Quantity Lubrication Cutting Fluid, *Metals*, Vol. 15, No. 1, 2025, Article 36. https://doi.org/10.3390/met15010036

CONTENTS

1. Miklós László SZALAI, Dr. János TAKÁCS, Dr. Gábor KÓNYA, Pál HANSÁGHY: EFFECT OF RELATIVE HUMIDITY AND SCREWDRIVING SPEED ON THREAD STRIPPING TORQUE IN INJECTION-MOLDED PA66 POLYMER 5

2. Dr. Szilárd JASKÓ, Dr. Tamás RUPPERT: THE DEFINITION OF THE 21ST-CENTURY INDUSTRIAL OPERATOR 12

3. Tamás ÁRVAI, Dr. Károly JÁLICS: THE EFFECT OF WELDING, ADHESIVE BONDING, AND MECHANICAL FASTENING TECHNOLOGIES ON WAVE PROPAGATION IN AUTOMOTIVE BODIES 18

4. Máté BÉRES, Dr. Zoltán BIHARI: MECHANICAL INVESTIGATION OF INFILL GEOMETRIES IN FDM PRINTED PET-G COMPONENTS 22

5. István BESENYEI, Dr. Zoltán BIHARI: DESING OF PROFILE GROOVE TESTING DEVICE 26

6. Eszter BORSODI, Dr. Ágnes Judit TAKÁCS: ANALYSIS OF THE APPLICATION AREAS OF GENERATIVE DESIGN AND ITS IMPACT ON PRODUCT CHARACTERISTICS 30

7. Tamim DEEB, Dr. László KÁTAI: ROTARY VS. LINEAR TILLAGE TOOL VIBRATIONS: DIFFERENCES IN SIGNAL CHARACTER AND IMPLICATIONS FOR SIGNAL PROCESSING 34

8. Dávid DÖMÖTÖR, Dávid NAGY, Dániel TÓTH, Dániel HORVÁTH, Dr. András HÁRY: THE ROLE OF SIMULATION AND ASSOCIATED EXPERIENCES IN DEVELOPMENT OF WELDING TECHNOLOGY 40

9. Bálint FEKÉCS, Ádám MARAI, Ákos NYIRŐ, Dr. András HÁRY: DESIGN EXPERIENCES OF ELECTRIC OFF-ROAD SMALL SCALE-VEHICLE 45

10. Sándor FORRAI, Dr. habil. P. Balázs SZABÓ: THERMAL EFFICIENCY ANALYSIS OF BEE NESTS AND ARTIFICIAL HIVES 51

11. Dr. Dávid GÖNCZI: THERMOELASTIC PROBLEMS OF RADIALLY GRADED CIRCULAR ARCHES USING STRESS FUNCTIONS 55

12. Ferenc Áron KASÓ, Dr. Péter Tamás ZWIERCZYK: AI-SUPPORTED COMPLEMENT TO THE STRUCTURAL INTEGRITY INSPECTION OF STEAM GENERATOR TUBES 59

13. Dr. László KÁTAI, Dr. Róbert MEZŐ, Dr. Péter GÁRDONYI, István NAGY: MOTION ANALYSIS OF THE ANKLE JOINT USING A KINEMATIC MECHANISM 64

14. Katalin KOVÁCH, Dr. Viktor GOTTHARD: AI-SUPPORTED VISUAL CONCEPT DESIGN THROUGH THE DEVELOPMENT OF A HOUSEHOLD MUSHROOM GROWING SYSTEM 68

15. Dr. László LOVAS, Dr. Csaba ÉGETŐ: METHOD TO CHECK THE APPLICABILITY OF NO-DIG PIPE INSERTS 72

16. Dr. Imre MARADA: ACCURACY OF 3D PRINTED PLASTIC GEARS WITH A 0.3 MM MODULE 76

17. János MIKOLÁS, István Junior KONKOLY, Dr. Roland BARTÓK, Sándor HUS, Dr. András HÁRY: EXPERIENCES IN DEVELOPING A MOBILE ROBOT PLATFORM FOR EDUCATION 80

18. András MÓZER, Dr. Zsolt József FARKAS: CONCEPTIONAL DESIGN OF A UNIQUE LOAD MODULE FOR LINEAR ACTUATORS 84

19. Áron ROHÁLY, Dr. Ágnes TAKÁCS, Dr. Károly JÁLICS: LATEST RESEARCH TRENDS ON THE DESIGN METHODOLOGY OF HUNGARIAN DESIGN SCHOOLS 88

20. Dr. SIPOSS István: ONCE UPON A TIME THERE WAS A STUDIO 94

21. Dorina SPEKKER, Dr. Zoltán BIHARI: DESIGN AND ADDITIVE MANUFACTURING OF A PERSONALIZED CRANIAL ORTHOSIS 95

22. Kristóf SZABÓ: PART DESIGN AND DEVELOPMENT USING SIMULATION-DRIVEN METHODS 99

23. Roland SZABÓ, Bálint FEHÉR, Dr. András HÁRY, Dr. Csilla TÓTH: COMPETITIVENESS ASPECTS OF PRODUCT DESIGN PROCESS 103

24. Sándor Imre SZABÓ, Dr. Zoltán BIHARI: BUILDING AN ANISOTROPIC MATERIAL MODEL FROM LIMITED MATERIAL DATA FOR THE ANALYSIS OF FDM-PRINTED PLA 109

25. Dr. Krisztina Katalin SZEGHŐ: THE ENGINEER AS A DIGITAL CONDUCTOR – DESIGN IN THE AGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE 113

26. Dr. Sándor SZIRBIK, Dr. Zoltán VIRÁG: EFFECTS OF DAMAGED STEEL-CASE ROLLERS ON THE DESIGN OF THE CONVEYOR BELT AND TRUSS BRIDGE STRUCTURE 117

27. Marcell ZSIBÓK, Dr. Péter Tamás ZWIERCZYK: TRIBOLOGICAL INVESTIGATION OF ADDITIVELY MANUFACTURED PCTG AND PETG-PTFE MATERIAL PAIRS USING A PIN-ON-DISK METHOD 121

28. Inácio Manuel JUNQUEIRA, Dr. Csaba FELHŐ: INVESTIGATION OF CUTTING FORCE, VIBRATION, SURFACE ROUGHNESS, AND CYLINDRICITY DURING TURNING OF C45 STEEL 127

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 Jármai
Dr. József Kakuk
Dr. Gábor Kalácska
Dr. Márk Lelkes
Dr. János Kanócz
Dr. László Könözsy
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 Tímár
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 XLII Seminar of Machine Designers and Product Developers. The authors submitted 28 presentations for the conference held on November 12, 2026. Most of the presentations and some other publications, a total of 28 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 Téglás 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

XLII. Conference of Machine and Product Designers

Miskolc, 12th November 2026 (Thursday)

– P R O G R A M –

Date/time: **12th November 2026 (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 *Dr. SZEGHŐ Krisztina adjunktus BME, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **A mérnök mint digitális karmester – tervezés a mesterséges intelligencia korszakában**

10:40 11:00 *METÁL Attila fejlesztési részlegvezető Knorr-Bremse Hungária Kft.:* **A digitális transzformáció evolúciós lépcsője: modellalapú, rajzmentes tervezési és gyártási folyamatlánc megvalósítása a Knorr-Bremse-nél**

11:10 11:30 *Dr. HÁRY András ügyvezető, Szabó Roland fejlesztő mérnök TC-Zone Mérnöki Kft.:* **A terméktervezési folyamat versenyképességi kérdései**

11:40 12:00 *Dr. LOVAS László egyetemi docens BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék:* **Módszer feltárás nélküli csőbélelés alkalmazhatóságának vizsgálatára**

12:00 12:20 Questions, informal conversation

12:45 13:45 Lunch and coffee break for registered participants of the seminar

Date/time: **12th November 2026 (Thursday) 14.00-18.30 (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 *Dr. SZIRBIK Sándor egyetemi docens ME-GÉIK, Műszaki Mechanikai Intézet:* **Görgőkárosodás hatása a szállítószalag és egy pályát tartó rácsos hídváz vizsgálatánál**

14:20 14:30 *Dr. GÖNCZI Dávid egyetemi docens ME-GÉIK, Műszaki Mechanikai Intézet:* **Radiálisan gradiens görbült rudak hőrugalmasságtani megoldásai feszültségfüggvények segítségével**

14:40 14:50 *MIKOLÁS János oktató ZSZC Ganz Ábrahám Technikum:* **Oktatási célú mobil robot platform fejlesztésének tapasztalatai**

15:00 15:10 *MÓZER András tanszéki mérnök Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **Egyedi terhelő modul koncepcionális tervezése lineáris aktuátorok számára**

15:20 15:30 *Dr. SZABÓ Ferenc János ny. egyetemi docens ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Globális folyamatok vizsgálata szigmoid görbékkel**

15:40 16:00 Coffee break

16:00 16:10 *Dr. MARADA Imre adjunktus ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **3D nyomtatott 0,3 mm modulú műanyag fogaskerekek pontossága**

16:20 16:30 *SZALAI Miklós László tanársegéd Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék:* **Relatív páratartalom és a csavarbehajtási fordulatszám hatása a menetkiszakadási nyomatékra fröccsöntött PA66 polimerben**

16:40 16:50 *KOVÁCH Katalin demonstrátor BME, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **MI támogatott vizuális koncepciótervezés egy háztartási gombatermesztő rendszer fejlesztésén keresztül**

17:00 17:10 *ZSIBÓK Marcell PhD hallgató BME, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék:* **Additívan gyártott PCTG és PETG-PTFE anyagpárok tribológiai vizsgálata Pin-on-Disk módszerrel**

17:20 17:30 *BORSODI Eszter PhD hallgató ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **A generatív tervezés alkalmazási területeinek és a termékjellemzőkre gyakorolt hatásának elemzése**

17:40 17:50 *BESENYEI István tanársegéd, PhD hallgató ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Profilhorony vizsgáló berendezés tervezése**

18:00 18:10 *ÁRVAI Tamás PhD hallgató ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **A hegesztés, ragasztás és mechanikus kötések hatása a hullámterjedésre gépjármű karosszériákban**

18:20 18:30 CLOSING WORD

Date/time: **12th November 2026 (Thursday) 14.00-18.30 (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 *SHAAYA Karam Dheyaa Jirjees PhD student Institute of Machine and Product Design:* **Effect of Infill Pattern on the Strength of 3D-Printed Spur Gears**

14:20 14:30 *DEEB Tamim PhD student MATE University, Doctoral school of Mechanical Engineering:* **Vibration Analysis in non rotary machines**

14:40 14:50 *ALRUDHAN Alaa PhD student Mechanical Engineering/Design of machines and structures:* **Design and Manufacturing of Porous Aluminum Pipes Using Selective Laser Melting**

15:00 15:10 *WANOUS Batoul PhD student Institute of Machine and Product Design:* **Factors influencing the creep properties of 3D printed plastic parts – a literature review**

15:20 15:30 *JUNQUEIRA Inácio PhD student Institute of Manufacturing Science, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics:* **Investigation of Cutting Force, Surface Roughness, and Cylindricity during Turning of C45 Steel**

15:40 16:00 Coffee break

16:00 16:10 *DÖMÖTÖR Dávid duális mérnök hallgató Pannon Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.:* **A szimuláció szerepe és tapasztalatai a hegesztési technológia kialakítása során**

16:20 16:30 *FEKÉCS Bálint duális mérnök hallgató Széchenyi István Egyetem, ZalaZONE Ipari Park Zrt.:* **Elektromos kisjármű tervezési tapasztalatai**

16:40 16:50 *ROHÁLY Áron PhD hallgató ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Magyarországi tervezőiskolák legutóbbi tervezésmódszertani kutatásai**

17:00 17:10 *BATA Zsófia BSc hallgató ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Többfunkciós bútorok fejlődéstörténete**

17:20 17:30 *BÉRES Máté BSc gépészmérnök hallgató ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **PET-G alapanyagú FDM nyomtatott alkatrészek kitöltési geometriáinak mechanikai vizsgálata**

17:40 17:50 *SPEKKER Dorina egészségügyi mérnök MSc, ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Személyre szabott koponyaortézis tervezése és additív gyártása**

18:00 18:10 *SZABÓ Sándor Imre PhD hallgató ME-GÉIK, Gép- és Terméktervezési Intézet:* **Anizotróp anyagmodell építése korlátozott anyagadatokból FDM-nyomtatott PLA vizsgálatához**

18:20 18:30 CLOSING WORD








Biztos pont.
200 éve.








Evolvens származtatása különböző
módszerekkel

Biztos pont.
200 éve.

ADDITÍVAN GYÁRTOTT POLIMER
PRÓBATESTEK
PIN-ON-DISK VIZSGÁLATA
Biztos pont.
200 éve.




Cs. Hetyei, ZF Hungária Kft.
