

# Additív gyártással készült műanyag fogaskerekek méretpontossági jellemzőinek vizsgálata

## Analysis of the dimensional accuracy characteristics of plastic gears manufactured by additive manufacturing

SZABÓ Sándor Imre<sup>1</sup>, Dr. BIHARI Zoltán<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD hallgató, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet, H-3515 Miskolc-Egyetemváros,  
e-mail: szabo.sandor.imre@student.uni-miskolc.hu

<sup>2</sup>egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet, H-3515 Miskolc-Egyetemváros,  
e-mail: zoltan.bihari@uni-miskolc.hu

### Abstract

*Gears are key mechanical components. They can be found everywhere in equipment used in everyday life as well as in industry. In the case of traditional gear manufacturing methods, the topic of achievable dimensional accuracy has been thoroughly explored over previous decades. However, due to the increasing prevalence of additive technologies today, it is worthwhile to extend this topic to gears produced by 3D printing as well. In this work, the gears to be examined are manufactured from the same premium-grade material, based on the same model, using different types and categories of FDM (Fused Deposition Modelling) printers. The objective is to carry out standard-prescribed dimensional accuracy tests on the manufactured gears, such as the measurement of base tangent length. After evaluating the measurement results, the outcomes can be compared with the nominal CAD geometry.*

**Keywords:** 3D printing, additive manufacturing, gear, base tangent length, FDM

### Kivonat

*A fogaskerekek kulcsfontosságú gépelemek. Mindenhol megtalálhatóak azokban a berendezésekben, amelyeket a mindennapi életünk során és az iparban használunk. A hagyományos fogaskerék gyártási módszerek esetében az elérhető méretpontosság témaköre alaposan feltáráásra került a korábbi évtizedekben. Azonban az additív technológiák napjainkban történő fokozott térhódításának következtében a témakört érdemes kiterjeszteni a 3D nyomtatással előállított fogaskerekek esetére is. A munka során ugyanazon prémium kategóriájú alapanyagból előállítjuk ugyanazon modell alapján a vizsgálandó kerekeket különböző, típusú és kategóriájú FDM (Fused Deposition Modelling) nyomtatókon. A cél a legyártott kerekeken elvégezni olyan szabvány által előírt méretpontossági vizsgálatokat mint például a többfogmért mérés. A mérési eredmények kiértékelését követően az eredményeket össze lehet hasonlítani a névleges CAD geometriával.*

**Kulcsszavak:** 3D nyomtatás, additív gyártás, fogaskerék, többfogmért, FDM

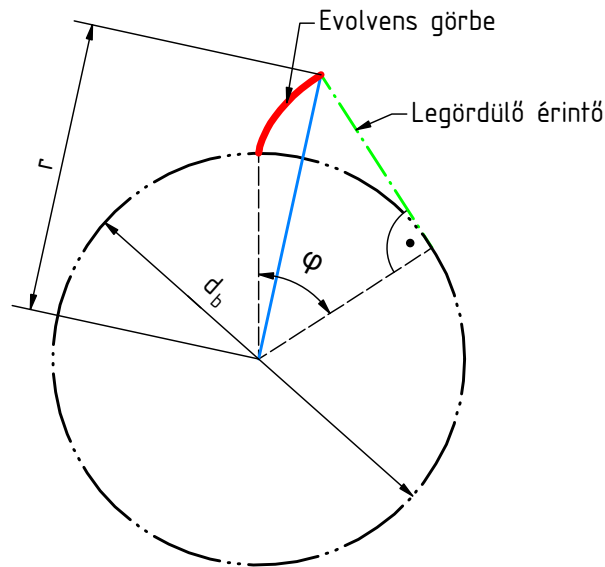
## 1. FOGASKERÉK CAD MODELL ELŐÁLLÍTÁSA

Ha egy körön csúszásmentesen legördítünk egy érintőegyenest, akkor az egyenes pontjai evolvensgörbét írnak le. Az evolvensgörbe használatos főként a fogaskerekek profilgörbéjeként.

A pontos körevolvens görbe szoftveres előállításának egy lehetséges módját tárgyalja az [1]. irodalom. Az ott ismertetett módszer segítségével előállítunk egy fogaskerék modellt Siemens NX 3D CAD szoftver felhasználásával, a körevolvens görbét leíró egyenletrendszer betáplálásával.

### 1.1. Az evolvens származtatása

Az evolvens elméleti származtatását mutatja az 1. ábra, aminek minden részletre kiterjedő ismertetésére ebben a cikkben nem térnénk ki. Ami ebben az esetben fontos az a  $d_b$  kör, ami a fogaskeréknek az úgynevezett alapköre, az a kör, amin az érintőt legördítjük. A másik pedig a  $\varphi$  szög, ami az evolvens egyenleteiben a változó szerepét fogja betölteni. Fontos leszögezni, hogy ebben az írásban elemi fogazatú fogaskerekeket tárgyalunk.



1. ábra. Az evolvens származtatása [1]

Az alapkör átmérő kiszámítása a következő módon lehetséges:

$$d_b = m \cdot z \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

ahol:

- $m$ : a fogaskerék modulja, jelen esetben 6 mm
- $z$ : a fogsám, jelen esetben 20
- $\alpha$ : a kapcsolószög, esetünkben  $20^\circ$

Ebből adódóan az alapkör:

$$d_b \approx 112.763 \text{ mm} \quad (2)$$

Végül pedig az evolvenst leíró egyenletrendszer alkotó összefüggések a 3. és a 4. képletek.

$$x = \frac{d_b}{2} (\sin \varphi - \check{\varphi} \cdot \cos \varphi) \quad (3)$$

$$y = \frac{d_b}{2} (\cos \varphi + \check{\varphi} \cdot \sin \varphi) \quad (4)$$

ahol  $\check{\varphi}$  a  $\varphi$  szög radiánban vett értéke [1].

## 1.2. Egyenlettel leírt profilú fogaskerék CAD szoftveres implementálása

A következőkben a cél az ismertetett evolvensgörbe felhasználásával egy fogaskerék szilárdtest modellt létrehozni. Ehhez a tervezőszoftverben (*Siemens NX*) evolvensgörbét kell definiálni a *Law Defined Spline* paranccsal. Kezdetben 1 mm-es modul használatával (mert a modell a későbbiekben a kívánt modulszorosára lesz módosítva egy egyszerű skálázási művelettel) Majd ebből egy *Extrude* utasítással készíteni kell egy felületet (az *Extrude* paramétere a fogaskerék kívánt végleges fogvastagsága legyen). Ezt követően ki kell szerkeszteni az evolvensprofil osztókörön fekvő pontját. Ehhez az 5. összefüggés felhasználásával megállapítjuk a  $d$  osztókör átmérőt.

$$d = m \cdot z \quad (5)$$

Ami 1 mm-es modul esetén a fogsámmal egyenlő, tehát esetünkben  $d = 20 \text{ mm}$ . Ezt követően rajzolunk egy kört ezzel az átmérővel, amiből egy újabb *Extrude*-al készítünk egy másik felületet, ami egy hengerpalást (2.a. ábra). Az *Extract Geometry* paranccsal az evolvens felületről készítünk egy asszociatív másolatot. Majd ezt két részre osztjuk a *Divide Face* paranccsal. Itt a hengerpalástot fogjuk kiválasztani a *Dividing Object* alatt. Így megkapjuk a hengerpalást és az evolvensfelület metszévonalát, ami egy egyenes vonal. Ezután létre kell

hozni egy síkot a programban két egyenes kiválasztásával, ezek a fogaskerék forgástengelye, és a korábbiakban létrehozott metszégörbe lesznek. Ezen a ponton, hogy ne legyenek zavaróak a *Delete Body* paranccsal az eredeti evolvensprofilon kívüli felületek eltüntethetőek.

Mivel egy fogaskerék egy középpontosan szimmetrikus alkatrész, ezért a megadott felületelemek bizonyos középponti szögenként újra ismétlődnek, az is belátható, hogy ez a szög csupán a fogszámától függ. Létre kell hozni egy új síkot, ami korábban létrehozott sík elforgatásával jön létre, ez lesz a fog szimmetriasíkja. Amire ezt követően a *Mirror Geometry* paranccsal lehet is tükrözni az evolvens felületet (2.b. ábra). Majd létre kell hozni egy újabb hengerpalástot, ezúttal viszont a fogaskerék fejkörével megegyező átmérőre, amit a 6. képletben leírt módon határozunk meg (2.c. ábra).

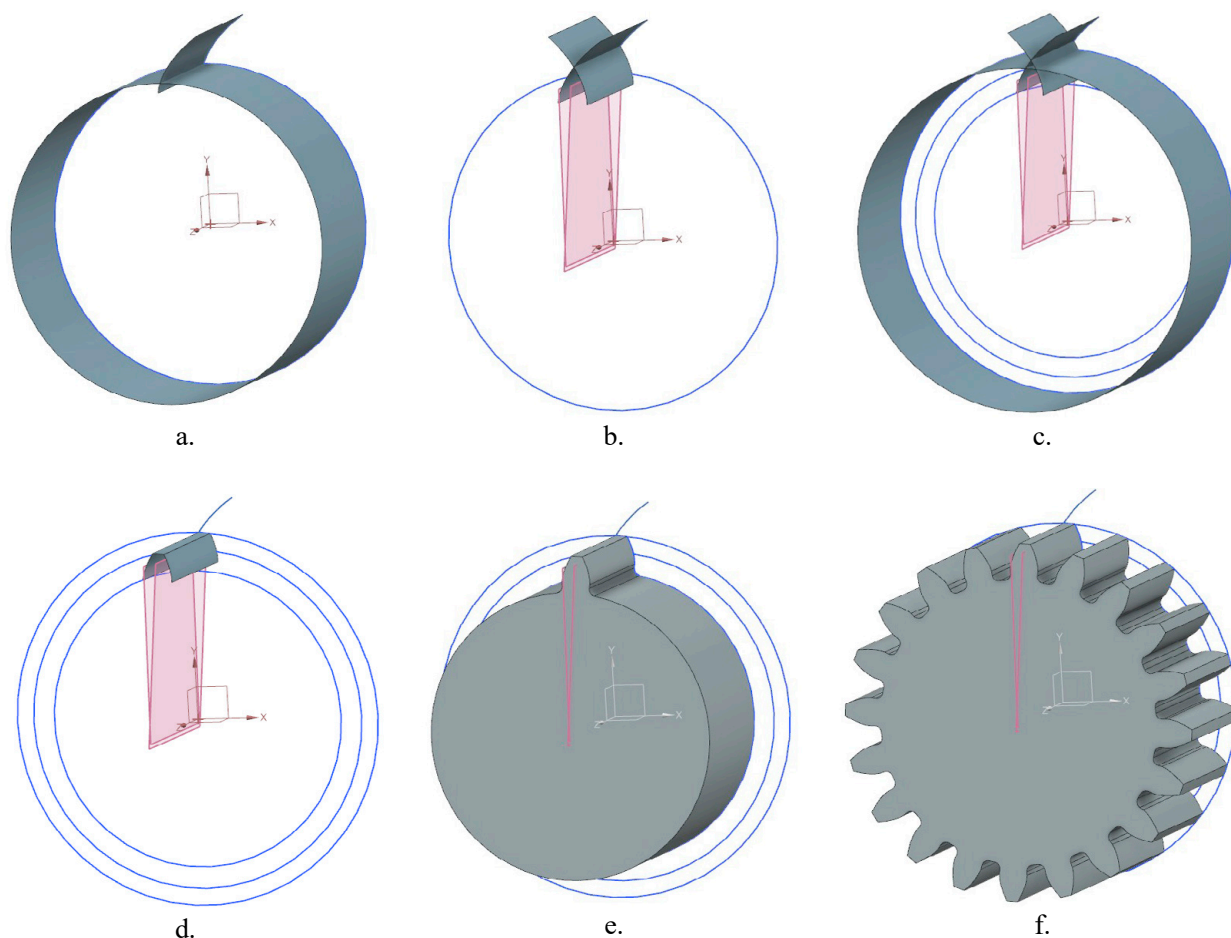
$$d_a = (m + 2) \cdot z = 22 \text{ mm} \quad (6)$$

Majd a meglévő három felületből a *Trim Sheet* paranccsal levágjuk a szükségtelen felületelemeket. Így létrejön a fejszalag (2.d. ábra). A továbbiakban egy szilárdtest hengert szükséges létrehozni, aminek az átmérője a fogaskerék lábköre lesz, a lábkörátmérő meghatározását a 7. egyenlet mutatja.

$$d_f = m(z - 2 - 2c^*) = 17,5 \text{ mm} \quad (7)$$

Ahol  $c^*$  a lábhézagtényező, értéke általában 0,25.

Ezután egy vázlatra kiszerkesztünk az evolvensprofilokhoz tartozó lábtőgörbét (jelen esetben egy egyszerű éllekerekítés). Egy ismételt *Extrude* következik, amivel előállítjuk a fog solid modelljét, amit hozzá is adunk a lábkörhengerhez (2.e. ábra). Végül egy körkörös kiosztással a fogat megsokszorozzuk a kívánt számra (2.f. ábra). Befejezésül szükség van a *Scale Body* parancsra, amivel a testet fel lehet skálázni a kívánt modullal a fogaskerék homloksíkjába eső tengelyek mentén, amivel így tetszőleges modul érhető el. A modellezési folyamat lépéseit szemlélteti a 2. ábra [2], [3].



2. ábra. A fogaskerék modellezés lépései

Technikai okokból egy  $0,5 \times 45^\circ$ -os élettörést helyeztünk el a fogaskerék homloksíkjára. Ez amiatt szükséges mert az FDM nyomtatóknál a legelső réteg hajlamos szétterülni az esetleg nem ideális asztalbeállítás miatt és az ebből fakadó mérési hibákat küszöböli ki az élettörés.

## 2. A NYOMTATOTT FOGASKEREKEK PONTOSSÁGI ELLENŐRZÉSE

Az evolvens profilú fogaskerék méretellenőrzésének egyik leggyakrabban használt módja a többfogmérés. A többfogmérés olyan geometriai méret, amely egymás melletti több fog együttes méretét jellemzi, és a fogazat globális pontosságának mérésére szolgál. Mérését tárcsás mikrométerrel végezzük, gyakorlatilag párhuzamos érintősíkokkal fogunk közre előre meghatározott számú fogat.

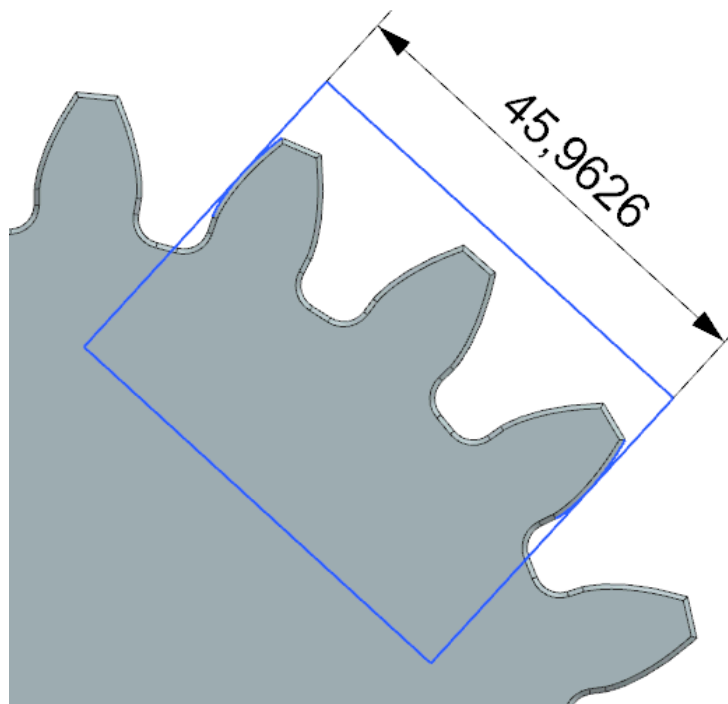
A közrefogott fogak számának ( $k$ ) meghatározása  $\alpha = 20^\circ$ -os kapcsolószög esetén [4]:

$$k = \frac{z}{9} + \frac{1}{2} = \frac{20}{9} + \frac{1}{2} \approx 2,72 \rightarrow 3 \quad (8)$$

Ennek ismeretében a  $k$  számú fagon mért többfogmérés elméleti értéke meghatározható a 9. összefüggés felhasználásával [4]:

$$W_k = m \cdot \cos \alpha \left[ \left( k - \frac{1}{2} \right) \pi + z \cdot \operatorname{inv} \alpha \right] \approx 45,9626 \text{ mm} \quad (9)$$

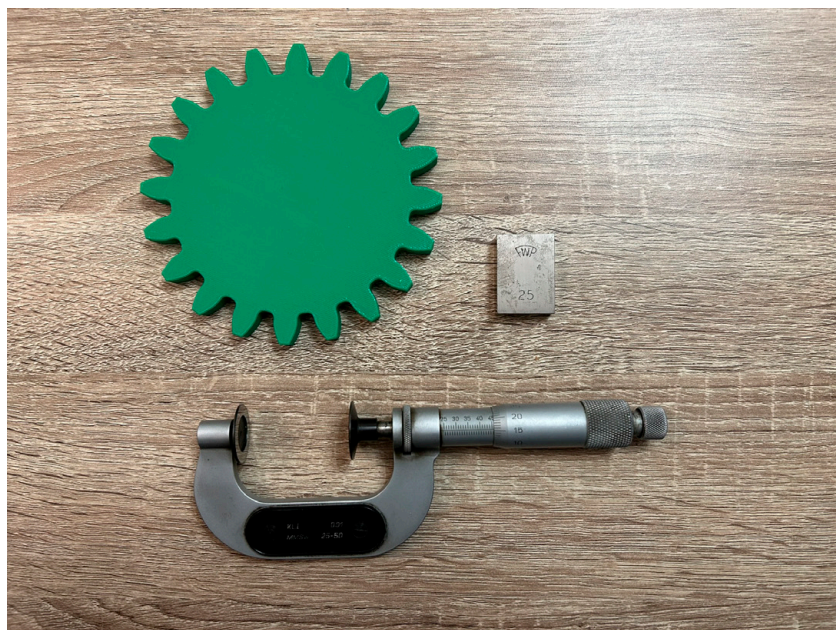
Ha ismert a többfogmérés nagysága akkor ezzel ellenőrizni tudjuk a korábbiakban előállított CAD modell megfelelőségét is egy egyszerű méréssel. A modellező szoftverben egy téglalapot definiálunk, amelyet ráhelyezünk, úgy a fogaskerekre, hogy két párhuzamos oldala a megfelelő fogak érintője legyen, ahogyan az a 3. ábrán vehető szemügyre.



3. ábra. A többfogmérés ellenőrzése a CAD modellen

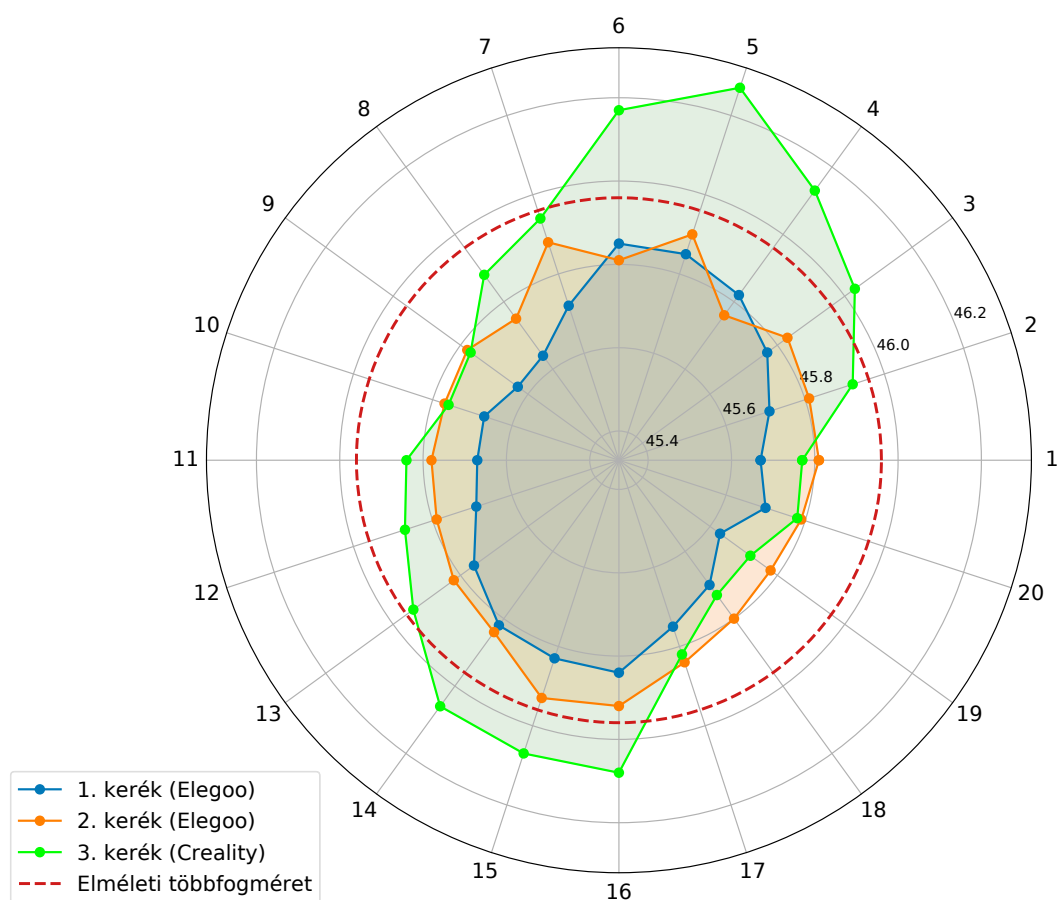
Az ábrán látottak alapján megállapítható, hogy a 3D modell méretpontossága megfelelő. Ezután a geometria 3D nyomtatása következik. A modellt két különböző Elegoo Centauri Carbon és egy Creality 200B típusú FDM 3D nyomtatón nyomtattuk ki PETG anyagból.

A nyomtatást követően körbemértük a fogaskerekeken valamennyi többfogmérést és az adatokból statisztikát készítettünk. A méréshez használt eszközök egy 25-50 mm méréstartományú 0,01 mm pontosságú többfogmérő (tárcsás) mikrométer és az ehhez mellékelt ellenőrző mérőhasáb álltak rendelkezésre. A felhasznált eszközök láthatóak a 4. ábrán.



4. ábra. A méréshez használt eszközök

A többfogmértet minden lehetséges esetben meghatároztuk. Az eredmények kiértékelését követően arra a megállapításra jutottunk, hogy a nyomtatott kerek nem pontosak. A mért értékek az Elegoo nyomtatók esetében kisebbek mint az elméleti többfogmértet. A Creality nyomtató esetében viszont van ahol az érték kisebb, van ahol nagyobb mint az elméleti többfogmértet. A mérések során felvett adatokat szemlélteti az 5. ábra.



5. ábra. A mérési eredmények

Az ábrán minden berajzolt sugár azt a fogat azonosítja, amely alapján körbehaldtunk a fogaskereken. Megfelelő nagyítás mellett a hiba kissé túlzónak tűnik, a szemléletesebbé tétel érdekében választottuk ezt az ábrázolást. Így sokkal jobban megfigyelhető az elméleti mérethez képesti eltérés nagysága. A méréseket követő statisztikai eredményeket összesíti az 1. táblázat [2], [4].

A mért eredmények statisztikája

1. táblázat

	1. kerék	2. kerék	3. kerék
Szórás	0,14	0,08	0,17
Minimum	45,63	45,75	45,72
Maximum	45,85	45,93	46,27
Terjedelem (Max.-Min.)	0,22	0,18	0,55
Átlag	45,73	45,82	45,93

### 3. A MÉRT ÉRTÉKEK ALAPJÁN LEVONHATÓ KÖVETKEZTETÉSEK

Az 5. ábra alapján látható, hogy mindkét kerék esetén az elméleti többfogméréthez képesti eltérés egyfajta ovalitást mutat, ez a hiba adódhat a használt 3D nyomtatók pontossági hibáiból. Az Elegoo Centauri nyomtatók magasabb kategóriát képviselnek mint a Creality 200B. Ez magyarázhatja a gép nagyobb pontatlanságát, mivel a Creality esetében a tartomány, amin belül szór a többfogméret értéke jóval nagyobb mint az Elegoo esetében.

Fontos megfigyelés az, hogy az Elegoo nyomtatók esetében a méret minden esetben kisebb mint a névleges többfogméret. Ez akár betudható lehet a hőtágulásnak, illetve esetünkben a hűlés okozta zsugorodásnak, mivel a műanyag az extruderből való kilépését követően több mint 200°C-ot is hűl, amely esetben elképzelhető, hogy számottevő hatása van a végleges geometriára.

### ÖSSZEFOGLALÁS

A mérési eredményekből látszik, hogy a 3D nyomtatott fogaskerekenél akadnak méretpontossági problémák. A jövőben továbbfejlesztési lehetőségként szerepelhet a pontosság javítását célzó további kutatás-fejlesztés. A cél a lehető legnagyobb pontosságú nyomtatott fogaskerekek előállításának elérése. Potenciális további irány lehet a jövőben a hőtágulás miatti hűlés közbeni deformációs jelenség szimulációs vizsgálata.

### IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Bihari Z. – Szabó S. I.: Evolvens származtatása különböző módszerekkel, GÉP 76 3-4 pp 104-107 (2025), <https://doi.org/10.70750/GEP.2025.3-4.25>
- [2] Dr. Erney Gy.: Fogaskerekek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983
- [3] J. Duhovnik – I. Demšar – P. Drešar: Space Modeling with Solid Works and NX, Springer International Publishing, Switzerland, 2015
- [4] Bárány J.: Többfogméret, foghúrméret és csapméret számítása, 2. átdolgozott kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1972