

FDM NYOMTATÁS GEOMETRIAI PONTOSSÁGA - A CAD MODELLTŐL A VALÓSÁGIG

GEOMETRIC ACCURACY OF FDM PRINTING - FROM CAD MODEL TO REALITY

Garay Richárd*, Nemes Dániel**

ABSTRACT

This research provides a comprehensive statistical model of the geometric accuracy and surface roughness of parts manufactured using FDM (Fused Deposition Modeling) technology. Additive manufacturing today is no longer limited to prototyping, the technology is now used to produce parts in mass production, making an understanding of manufacturing variations essential for establishing reliable tolerance limits. Data was collected using various measurement techniques, including digital calipers, micrometers, structured light 3D scanning, and a roughness tester. The study characterizes deviations from nominal CAD values across different size categories using statistical indicators. The final result provides a framework for the maximum tolerance limits recommended based on ISO 286 IT classes, which is specifically tailored to the parameters of the FDM process under investigation.

Ez a kutatás átfogó statisztikai modellezést nyújt az FDM (Fused Deposition Modeling) technológiával gyártott alkatrészek geometriai pontosságáról és felületi érdességéről. Az additív gyártás napjainkban már nem csak a prototípus-készítésről szól, hanem a technológiával már sorozatgyártott alkatrészeket is gyártanak, így a gyártás során keletkező eltérések megértése elengedhetetlen a megbízható tűréshatárok megállapításához. Az adatokat többféle mérési technikával gyűjtöttük, többek között digitális tolómérővel, mikrométerrel, strukturált fényű 3D-szkenneléssel és érdességmérővel. A tanulmány különböző méretkategóriákban statisztikai mutatók segítségével jellemzi a névleges CAD-értéektől való eltéréseket. A végső eredmény egy keretrendszer biztosít az ISO 286 IT osztályok alapján ajánlott maximális tűréshatárokhoz, amely kifejezetten a vizsgált FDM-folyamat paramétereire van szabva.

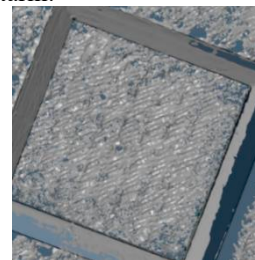
1. BEVEZETÉS

A 3D-nyomtatás történeti fejlődése 1984-ben kezdődött, amikor Charles W. Hull kifejlesztette a sztereolitográfiát (SLA), amelyet hamarosan a fűzős réteges modellezés (FDM) és a szelektív lézeres szinterezés (SLS) követett. [2] Ma ezek a technológiák

elengedhetetlenek az autópiparban, a repülőgépiparban, a gyógyszeriparban és a divatiparban. Az orvosi és fogászati területeken a 3D nyomtatás lehetővé teszi egyedi sebészeti implantátumok és protézisek készítését, bár ezek az alkalmazások jelentős akadályokkal szembesülnek a méretpontosság és a felületi minőség tekintetében. [4, 5, 6, 7, 8, 12] Az FDM 3D-nyomtatási eljárás, jelenleg a legelterjedtebb és egyik legolcsóbb megoldásnak számít egyedi és kisszériás gyártásban. A nyomtató által használt nyersanyag egy huzal alakú, hőre lágyuló műanyag szál, amit egy fűvókán keresztül tol ki a nyomtató és a tárgyasztalra rétegz, ahol megszilárdul, és elkészül az alkatrész. A huzal adagolási sebessége, az asztal mozgási sebessége, valamint a huzaladagoló és az asztal hőmérséklete változtatható. Ezzel a technológiával sokféle nagy teherbírású műanyag termék állítható elő, például PA (nejlon), PC, PEEK stb. [9, 10, 11]

2. ELŐKÉSZÜLETEK

A vizsgált próbatestet elkészítéséhez az Ultimaker 3 nyomtatót használtuk. Az összes beállítást alapértelmezett értékén hagytuk, kivéve a rétegmagasságot, amelyet 0,1 mm-re, és a kitöltést, amelyet 37%-ra állítottunk be. A támasztóanyag típusát „tree”-re állítottuk. [13] Az FDM technológiára jellemző rétegvastagság előre meghatározza a pontosság határát, így a kutatás csak az adott nyomtató, beállítások és anyag kombinációra érvényes. Fontos megjegyezni azt is, hogy a használt geometria alsó részét nem mértük, mivel a támaszanyag eltávolítása, befolyásolja a méreteket, így félrevezető mérési eredményekhez vezetett volna (1. ábra). Továbbá a támasztékok méretre gyakorolt hatását csak ennél összetettebb vizsgálatokkal lehetett volna feltárni.

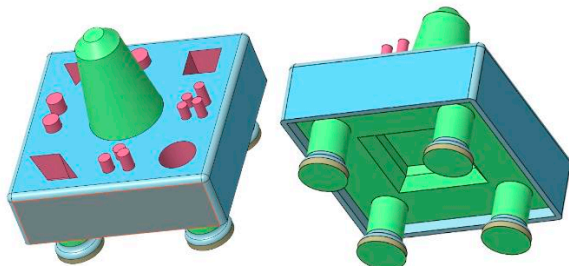


1. ábra Az asztal alja; a 3D szkennelt képen jól láthatók a támaszanyag maradványai

* tanszéki mérnök, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

** tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

A kutatás előkészítéseként konkrét mérési célokat határoztunk meg. Keresést végeztünk a tanulmányhoz hasonló publikációk után, és az azokban használt geometriákat felhasználva kidolgoztunk egy kritériumrendszert, amely alapján a saját geometriánk is létrehozható volt. Végül négy publikációt használtunk fel e kritériumok megállapításához. A saját geometriánk a 2. ábrán látható. [8, 14, 15, 16]

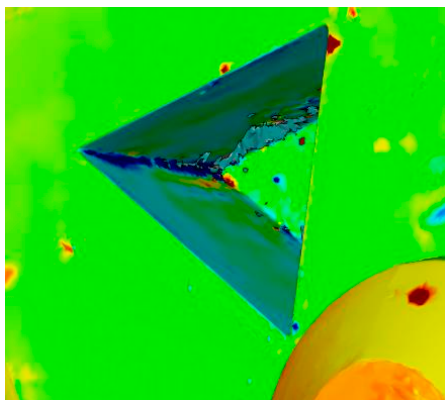


2. ábra A tanulmányhoz használt geometria

3. A MÉRÉS FOLYAMATA ÉS MÓDSZEREK

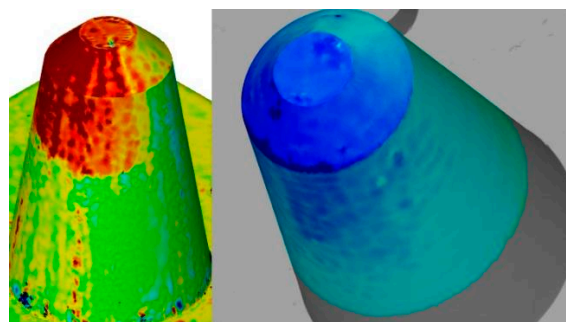
A mérésekhez négy különböző mérőeszközt használtunk: digitális tolómérőt, digitális mikrométert, érdességmérőt és 3D szkennert. A kutatás során használt legfontosabb mérőeszköz a 3D szkennert volt. Ez a műszer lehetővé tette a nyomtatott tárgy és a CAD-modell összehasonlítását. A mérések során a GOM Atos Core 200-as 3D szkennert használtuk. [17, 18]

Összetett geometriák vagy mély, keskeny mélyedések esetén az optikai hozzáférhetőség korlátozott, mivel a szkennert által rávetített fény és a kamera látószöge nem éri el ezeket a területeket. A kutatás során előfordultak olyan esetek, amikor a szkennert nem látott be a tárgy zsebeibe, ezért azt a területet többször kellett szkennelni. A mattító spray javított a helyzeten, de ennek ellenére a modell bizonyos területeken továbbra is hiányos maradt (3. ábra). A vetett árnyékok szintén problémásak lehetnek, mivel a kiemelkedések vagy élek árnyékot vethetnek az objektum egyes részeire, megakadályozva a szkennert a megfelelő képalkotásban. Ilyen esetekben a több szögből történő szkennelés jelent megoldást. [19, 20]



3. ábra A szkennert többszöri beolvasás után sem tudta felismerni a háromszög alsó éleit

A kutatás során egy új probléma is felmerült. A próbatest közepén található nagy kúp tetején jelentős eltérés mutatkozott a CAD-modelltől, és a hiba jellege eleinte nem volt egyértelmű (4. ábra). Számos lehetséges okot vizsgáltunk át szisztematikusan, végül rájöttünk, hogy a korábban említett zsebek beolvasásakor bizonyos pozíciókban jelentősen nagyobb expozíciós időket alkalmaztunk, mint más esetekben. Következésképpen a poligonizálás előtt alkalmazott adatszűrő algoritmus a nagyobb pontsűrűségű területeket másképp súlyozta, mint a többi régiót, így a különböző szakaszokban alkalmazott eltérő expozíciós idők okozhatták az eltérést.

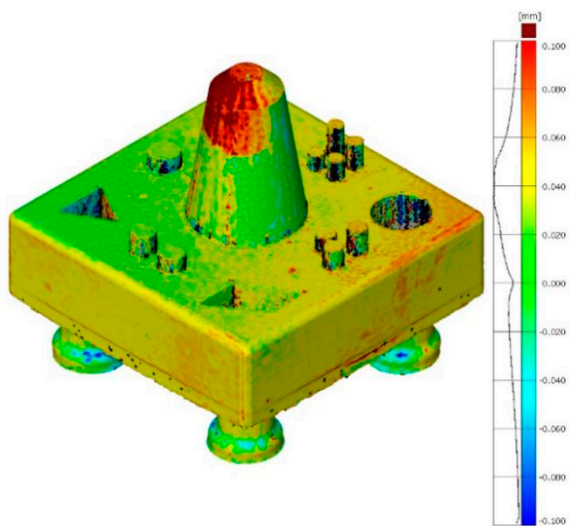


4. ábra Jelentős eltérés a próbatest kúpjának tetején

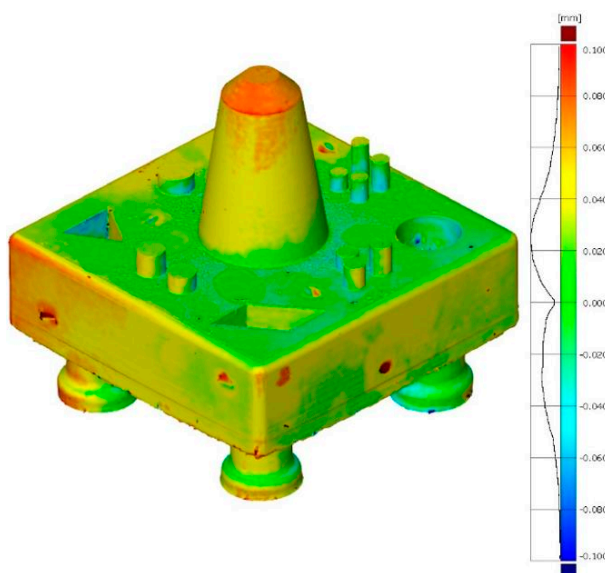
A vizsgált tárgyról mattító spray használatával, illetve anélkül is készítettünk felvételeket, a méréseket minden esetben kétszer ismételtük meg. Az 5. ábrán látható, hogy a beszkennt tárgy felülete mattító spray nélkül lényegesen zajosabb. Az is nyilvánvaló, hogy a kis hengerek és zsebek gyakran nagyon magas hibaértékeket mutattak. Ez azért történt, mert a szkennert nem tudta megfelelően beszkenntelni ezeket a zsebeket és hengereket.

Az előző szkenneléshez képest a 6. ábra azt mutatja, hogy a mattító spray alkalmazása sokkal simábbá tette a szkennelt tárgy felületét. A szkennert sokkal hatékonyabban észlelte a zsebeket és a kis hengereket, ami egy jobban használható modellt eredményezett. A várakozásoknak megfelelően, a mattító spray-vel készült beolvasások sokkal részletesebbek, simábbak és kevésbé voltak zajosak, mint azok, amelyeket anélkül készítettünk.

A spray-t azonban óvatosan kell alkalmazni, mivel a nagy kúp körül megjelenő kékes, pontszerű leképezési hibákat a spray okozta. Használat közben ugyanis a spray kis csomókba állhat össze.



5. ábra Mattító spray használata nélkül készített szkennelés



6. ábra Mattító spray használatával készített szkennelés

A kutatás limitációja, hogy egyetlen próbatesten végeztük el a méréseket, illetve egyetlen nyomtatóval és anyaggal készítettük el a testet. Ezt a limitációit úgymond kompenzálja az elvégzett mérések mennyisége.

4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A kézi mérések eredményeit méretcsoportokba soroltuk a pontosság alakulásának feltárása érdekében (1. táblázat). Összesen 292 mérés alapján egyértelmű fordított arányosság mutatkozott az alkatrész mérete és a relatív eltérés között. Megállapítottuk, hogy a szórás egyenesen arányos a méret abszolút értékével, ami 0,045 és 0,216 között mozog.

1. táblázat A méretcsoportok elemzésének eredményei

Méret-csoportok [mm]	Eltérés a névlegestől [mm]	Relatív eltérés [%]	Relatív eltérés abszolútértéken [%]	Szórás
3-6	0,0841	1,410	1,957	0,045
7-10	0,0815	0,543	0,916	0,056
11-14	0,1450	1,107	1,107	0,062
15-20	0,0769	0,004	0,482	0,063
21-40	0,1335	-0,516	0,521	0,144
41-100	0,2358	0,077	0,389	0,216

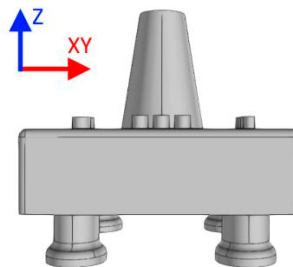
A nyers adatok feldolgozása után a kapott 3D modelleket szoftveres környezetben vetettük össze a névleges CAD modellel a geometriai pontosság ellenőrzéséhez. A vizsgálat során összesen 58 ponton végeztünk el 232 mérést, különös tekintettel a hengerességre, a párhuzamosságra és a síklapúságra.

Az elemzés kimutatta, hogy a szkennelések átlagos relatív eltérése 0,21 mm. Az összesített eredmények számszerűsítették a korábbi megfigyeléseket: a mattító spray használata nemcsak vizuálisan, hanem mérhetően is javította a pontosságot, közel 34%-os eltérést mutatva a spray-vel kezelt és a kezeletlen felületek adatai között.

A különböző nyomtatási irányokat külön táblázatokban is összehasonlítottuk. Az 7. ábrán láthatóak a nyomtatási irányok, a 2. táblázatban pedig a Z irány, és a XY irány eredményei.

2. táblázat Nyomtatási irányok összehasonlítása

3D szkennelés eredmények		
Nyomtatási irány	Relatív eltérés [mm]	Szórás
XY	0,158	0,123
Z	0,138	0,101
Kézi mérések eredményei		
Nyomtatási irány	Relatív eltérés [mm]	Szórás
XY	0,116	0,028
Z	0,019	0,134



7. ábra Nyomtatási irányok

A geometrián felületi érdességmérést is végeztünk. A mérésekhez a QPT Smartic M mérőműszert használtunk. A nyomtatott mintadarab felületi érdessége gyakran már szemrevételezéssel is észlelhető. Az összefoglalt eredmények alapján a mért pontok Ra-értéke 7,729 µm, az Rz-értéke pedig 36,755 µm.

Ez jelentősen érdesebbnek tekinthető, mint a hagyományos gyártási technológiákkal kapott értékek. Ennek a jelenségnek az oka az FDM technológiával előállított minták réteges szerkezetében keresendő. Az egymásra rakódó rétegek között a rétegvonalak mentén úgynevezett „lépcsőzetes hatás” jelentkezik, amely jelentős eltéréseket okozhat az érdességmérés során, és jelentősen növelheti a felületi egyenetlenségeket. A ferde felületeken és a kis keresztmetszetű rétegeknél a lépcsőzetes hatás mind vizuálisan, mind a mérési adatokban jobban látható, ami magyarázza az ezeken a felületeken kapott magasabb Ra- és Rz-értékeket. Az FDM további jellemzői, mint például az extrudálási hőmérséklet és sebesség enyhe ingadozásai, vagy a kis keresztmetszetű rétegek rövid hűlési ideje tovább növelhetik a helyi érdességet. [2, 3]

A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy az FDM nyomtatókkal előállított tárgyak felületi minősége utómunkálatok nélkül jelenleg nem érheti utol a fröccsöntéssel gyártott tárgyak és alkatrészek felületi érdességét, hanem sokkal inkább a homoköntéssel vagy a nagyoló forgácsolással előállított felületek érdességével tekinthető ekvivalensnek. [2, 3, 9, 16]

5. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A kutatás célja az ajánlott tűréshatárok meghatározása volt. Ebben a fejezetben összefoglaltuk a mért adatokat, és az IT-osztályok alapján meghatároztuk a különböző méretcsoportokra vonatkozó ajánlott tűréshatárokat. Ez lényegében közel 700 mérésen alapuló iránymutatást nyújt a kutatásban vizsgált esetre vonatkozóan. Ezeket az eredményeket a korábban említett korlátozások figyelembevételével kell értelmezni és alkalmazni. Az ajánlott tűréshatárokat az ISO 286 szabványban meghatározott méretek alapján határoztuk meg. [21, 22, 23, 24]

3. táblázat Z és XY irányú méretek ajánlott tűrései

Névl. méret [mm]	M (Z)	Tűrés (Z)	M (XY)	Tűrés (XY)
≤ 3	n.d.	n.d.	136.3	IT14
< 3 ≤ 6	-100	b14	42.5	za12
< 6 ≤ 10	-88.75	c13	109.8	zc11
< 10 ≤ 18	47.5	x10	41.25	u13
< 18 ≤ 30	-20	f9	-171.9	b11
< 30 ≤ 50	n.d.	n.d.	47.5	t14
< 50 ≤ 120	n.d.	n.d.	-171.3	c12
Felületi hengerek	2.5	m11	108.8	zb13
Hengeresség	347.5	za13	n.d.	n.d.
Párhuzamosság	228	y10	n.d.	n.d.
Síklapúság	152.5	v10	280	z11
Érdesség	10.95	IT11	5.12	IT8

Az 3. táblázatban összefoglaltuk a Z és az XY irányra vonatkozó átlagértékeket és a végleges ajánlott tűréshatárokat. Ezek az adatok azt mutatják, hogy egyes esetekben az XY irányra szűkebb tűréshatárokat lehetett megadni, mint a Z irányra. Kisebb méretek esetén az XY irányú méretek tűréshatárai néha két IT-osztállyal szűkebbek, mint a Z irányban. A felületi érdesség tekintetében a különbség három IT-osztályt tesz ki: az XY irányú felület (IT8) sokkal simábbnak bizonyult, mint a Z irányú (IT11). Ez ellentétben állhat a várt eredménnyel, mivel a Z irány volt a nyomtatási irány. A jelenség magyarázata azonban a nyomtató mechanikai felépítésében keresendő. Az XY síkban a szíjhajtás és a léptetőmotorok felbontása gyakran finomabb pozicionálást tesz lehetővé, mint a Z tengelyt mozgó menetes orsó esetleges holtjátéka vagy pontatlansága. Emellett a Z irányú méretpontosságot befolyásolja a rétegek egymásra rakódásából adódó halmozott hiba, valamint a hűlés közbeni vertikális zsugorodás is, ami az XY irányú, rögzített asztalon történő rétegfelhordásnál kevésbé kritikus. [2, 3, 8, 15]

Ez az összefoglaló táblázat kiváló útmutatást nyújt azok számára, akik FDM eljárással kívánnak nyomtatni, a kutatásban alkalmazott beállításokkal. A táblázat alapján előre meghatározhatók a gyártás során alkalmazandó tűréshatárok. Természetesen számos további kutatási lehetőség kínálkozik ezen a területen. Például több mintát is kinyomtathatunk azonos beállításokkal, vagy más beállításokkal és különböző típusú nyomtatókkal. Ezek a variációk rengeteg további mérési adatot eredményezhetnek. Megvizsgálható a rétegvastagság, a kitöltési arány, a nyomtatási sebesség és a hőmérséklet statisztikai hatása is. Ezenkívül más anyagokat is felhasználhatunk és összehasonlíthatunk.

A kutatással kapcsolatos további részletek az [1] cikkben vannak publikálva.

6. SUMMARY

The aim of the research was to determine the recommended tolerance limits. In this chapter, the measured data were summarized, and the recommended tolerances for various size ranges were established based on IT grades. This essentially provides a guideline based on nearly 700 measurements for the specific case investigated in this study. These results should be interpreted and applied considering the previously mentioned limitations. The recommended tolerance limits were determined based on the dimensions specified in the ISO 286 standard. [21, 22, 23, 24]

Table 3. Recommended tolerances for dimensions in the Z and XY directions

Nominal size [mm]	M (Z)	Tolerance (Z)	M (XY)	Tolerance (XY)
≤ 3	n.d.	n.d.	136.3	IT14
< 3 ≤ 6	-100	b14	42.5	za12
< 6 ≤ 10	-88.75	c13	109.8	zc11
< 10 ≤ 18	47.5	x10	41.25	u13
< 18 ≤ 30	-20	f9	-171.9	b11
< 30 ≤ 50	n.d.	n.d.	47.5	t14
< 50 ≤ 120	n.d.	n.d.	-171.3	c12
Surface cylinders	2.5	m11	108.8	zb13
Cylindricity	347.5	za13	n.d.	n.d.
Parallelism	228	y10	n.d.	n.d.
Flatness	152.5	v10	280	z11
Hardness	10.95	IT11	5.12	IT8

Table 3 summarizes the average values and the final recommended tolerance limits for the Z and XY directions. These data indicate that, in certain cases, tighter tolerance limits could be specified for the XY direction than for the Z direction. For smaller dimensions, the tolerances in the XY direction are sometimes two IT grades tighter than in the Z direction. Regarding surface roughness, the difference amounts to three IT grades: the XY-direction surface (IT8) proved to be significantly smoother than the Z-direction surface (IT11). This may contradict expected results, as Z was the build (printing) direction. However, the explanation for this phenomenon lies in the mechanical construction of the printer. In the XY plane, the resolution of the belt drive and stepper motors often allows for finer positioning than the potential backlash or inaccuracy of the leadscrew driving the Z-axis. Furthermore, dimensional accuracy in the Z direction is affected by cumulative errors resulting from layer stacking, as well as vertical shrinkage during cooling, which is less critical during layer deposition in the XY direction on a fixed print bed. [2, 3, 8, 15]

This summary table provides excellent guidance for those intending to print using the FDM process with the settings applied in this research. Based on the table, the tolerance limits to be applied during manufacturing can be predetermined. Naturally, numerous further research opportunities exist in this field. For instance, more samples could be printed using the same parameters, or with different settings and various types of printers. These variations could yield a wealth of additional measurement data. The statistical effects of layer thickness, infill density, printing speed, and temperature could also be investigated. Additionally, other materials could be utilized and compared. Further details regarding the research are published in article [1].

7. IRODALOM

[1] GARAY R., NEMES D.: *Statistical modeling of geometric accuracy of FDM printing for machine design applications*, 11th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME), publikálásra elfogadva

[2] HORVATH J.: *Mastering 3D Printing*, Springer, 2014, <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4>

[3] HORVATH J., CAMERON R.: *Mastering 3D Printing: A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping*, Apress, 2020, <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5842-2>

[4] YAP Y. L., YEONG W. Y.: *Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review*, Virtual and Physical Prototyping, Vol. 9, No. 3, 2014, pp. 195–201, <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>

[5] LIAW C. Y., GUVENDIREN M.: *Current and emerging applications of 3D printing in medicine*, Biofabrication, Vol. 9, No. 2, 2017, 024102, <https://doi.org/10.1088/1758-5090/aa7279>

[6] BHADURI S., TOVAR J., KANE S.: *Fabrication Games: Using 3D Printers to Explore New Interactions for Tabletop Games*, 2017, pp. 51–62, <https://doi.org/10.1145/3059454.3059463>

[7] YANG F., ZHANG M., BHANDARI B.: *Recent Development in 3D Food Printing*, Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1094732>

[8] WEI X., ZHANG S., SUN L., ZHAO X., SUN M., YU R., ZHOU X., LI Y.: *Geometric Accuracy and Dimensional Precision in 3D Printing-Based Gear Manufacturing: A Study on Interchangeability and Forming Precision*, Polymers, Vol. 17, No. 3, 2025, 416, <https://doi.org/10.3390/polym17030416>

[9] BORBÁS L.: *Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben*, Magyar Mérnöki Kamara, Gépészeti Tagozat, Budapest, 2017.

[10] DOSHI M., MAHALE A., SINGH S., DESHMUKH S.: *Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects*, Materials Today: Proceedings, Vol. 50, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.003>

[11] PRUSA J.: *Basics of 3D Printing with Josef Prusa*, Prusa Research, 2019.

[12] SHAIKH S., NAHAR P., SHAIKH S. Y., SAYED A. J. és HABIBULLAH M. A.: *Current perspectives of 3D printing in dental applications*, Braz. Dent. Sci., Vol. 24, No. 3, 2021, <https://doi.org/10.14295/bds.2021.v24i3.2481>

[13] ULTIMAKER: *Ultimaker 3 – Felhasználói kézikönyv (v1.0)*, Magyar nyelvű kiadás, 2025, <https://um-support-files.ultimaker.com/manuals/user-manual/UM3/Ultimaker%203%20-%20User%20manual%20HU%20v1.0.pdf>

[14] RUPAL B. S.: *Geometric Tolerance Quantification and Prediction Framework for Additive Manufacturing Processes*, University of Alberta, 2021, <https://doi.org/10.7939/r3-a21v-yp34>

[15] AGARWAL K., SHUBHAM P., BHATIA D., SHARMA P., VAID H., VAJPEYI R.: *Analyzing*

- the Impact of Print Parameters on Dimensional Variation of ABS specimens printed using Fused Deposition Modelling (FDM)*, Sensors International, Vol. 3, 100149, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100149>
- [16] REBAIOLI L., FASSI I.: *A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 93, 2017, <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0570-0>
- [17] POLLÁK M., SABOL D., GORYL K.: *Measuring the Dimension Accuracy of Products Created by 3D Printing Technology with the Designed Measuring System*, Machines, Vol. 12, No. 12, 2024, 884, <https://doi.org/10.3390/machines12120884>
- [18] GOM GMBH: *ATOS Core 3D Scanner – Product Brochure*, 2025, https://scanare3d.com/wp-content/uploads/2020/07/GOM_Brochure_ATOS_Core_EN.pdf
- [19] RACHAKONDA P., MURALIKRISHNAN B., SAWYER D.: *Sources of Errors in Structured Light 3D Scanners*, SPIE Defense and Commercial Sensing 2019, Baltimore, MD, US, 2019, https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=927473
- [20] ONYIA T., OLARINOYE I.: *Advancements and Challenges in 3D Scanning: A Comprehensive Review of Engineering Applications*, African Journal of Advances in Science and Technology Research, Vol. 18, 2025, pp. 191–206, <https://doi.org/10.62154/ajastr.2025.018.010640>
- [21] ISO 286-1:2010: *Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits*, 2010.
- [22] ISO 286-2:2010: *Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 2: Tables of standard tolerance classes and limit deviations*, 2010.
- [23] BOÓR F.: *Gyártási tűrések elemzése és kapcsolata a folyamatszabályozással*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2019, ISBN 978-963-454-340-4.
- [24] HÁROMI F., KOVÁCSNÉ G.: *Gépszerkezetek I.*, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr.