

A RÉTEGVASTAGSÁG ÉS AZ ALKATRÉSZ TÁJOLÁSÁNAK HATÁSAI AZ ALKATRÉSZ MIKRO- ÉS MAKROGEOMETRIAI JELLEMZŐIRE 3D NYOMTATÁS SORÁN

THE EFFECTS OF LAYER THICKNESS AND ORIENTATION OF THE PART ON THE MICRO- AND MACRO-GEOMETRIC PROPERTIES OF THE PART DURING 3D PRINTING

Kónya Gábor ^{1*}, Ficzer Péter ²

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

² Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék, Közlekedés és Járműmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2022.2.ENG.005>

Kulcsszavak:

FDM
3D nyomtatás
PLA
Érdesség
Alakhiba

Keywords:

FDM
3D printing
PLA
Roughness
Shapeerror

Cikktörténet:

Beérkezett 2022. június 17.
Átdolgozva 2022. július 4.
Elfogadva 2022. július 7.

Összefoglalás

A 3D nyomtatási technológia jelentős fejlődésen megy keresztül napjainkban, mely következtében számos iparág is megújul, melyek közül a legjelentősebb a repülőgép-, az autó- és az orvostechonikai ipar. Ez a cikk a 3D nyomtatás során alkalmazott rétegvastagságok és az alkatrészek tájolásának hatásait taglalja a nyomtatott alkatrészek mikro- és makrogeometriai jellemzőire.

Abstract

Significant advances in 3D printing technology are underway these days, resulting in the renewal of many industries, the most significant of which are the aerospace, automotive and medical industries. This article discusses the effects of layer thicknesses and part orientation in 3D printing on the micro- and macro-geometric properties of printed parts.

1. Bevezetés

A gyorsan változó piaci igények a gyártó vállalatokat arra ösztökélik, hogy versenyképességüket megtartva lerövidítsék a termékfejlesztési- és piacra történő bevezetés idejét. Ebben segítenek a különféle 3D nyomtatási technológiák, melyek a CAD-modellek alapján készítik el rétegről rétegre a kívánt alkatrészeket [1], [2]. Ezek a technológiák lehetőséget biztosítanak komplex, összeszerelés nélküli termékek előállítására tesztelés vagy végfelhasználás céljából [3], [4].

Számos Rapid Prototyping technológia közül az FDM (Fused Deposition Modelling) tekinthető a legmegfelelőbb eljárásnak az RP számára abból a szempontból, hogy könnyen kezelhető, relatív olcsó berendezésekkel dolgozik, továbbá az alapanyagok is viszonylag olcsók [4].

* Kónya Gábor
E-mail cím: konya.gabor@gamf.uni-neumann.hu

Az FDM olyan additív eljárás, amely során a felhevített polimerszálat extrudálják, miközben a modell adott keresztmetszeti rétegén az extruder fej x-y tengely mentén mozog [5]. Miután egy réteg elkészült, az egész platform egy rétegvastagságnival süllyed „z” irányban és a folyamat mindaddig ismétlődik, amíg a teljes modell el nem készül [5], [6].

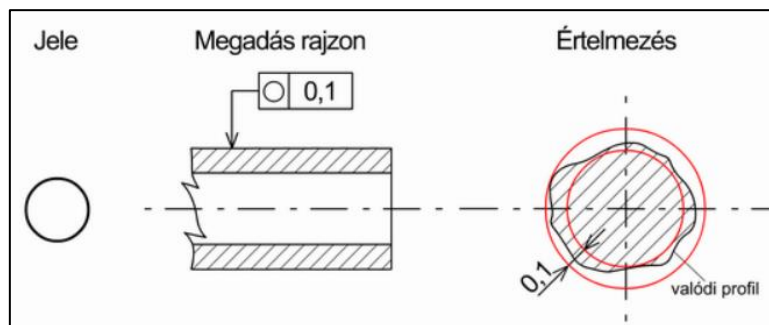
Hanon és társai [3] összehasonlították a piacon kapható nyomtatókat néhány szempont alapján, melyek az 1. táblázatban láthatók.

1. Táblázat. Additív gyártástechnológiák értékelése [3]. Megjegyzés: ● jó, ◼ közepes, ○ gyenge

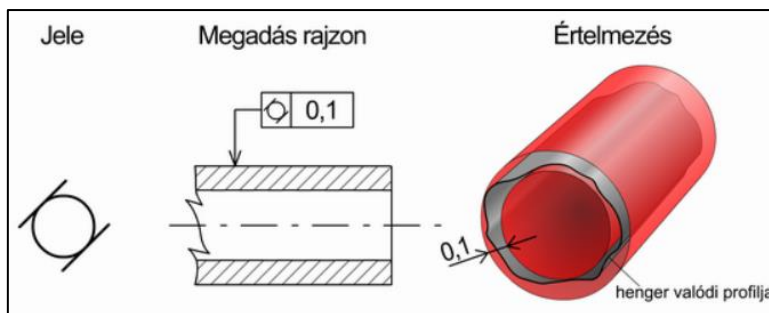
Nyomtató/megfontolások	SLA	LMD	FDM	3DP	PolyJet	SLS
Pontosság	◼	○	◼	○	●	●
Nyomtatható méret	○	◼	○	●	●	●
Utófeldolgozás	◼	●	◼	●	◼	◼
Nyersanyagok száma	●	○	◼	◼	◼	●
Gép mérete	○	●	●	○	◼	○
Gép ára	◼	○	●	○	○	○
Művelet ára	○	◼	●	○	○	○

Az 1. táblázat alapján a kísérletekhez FDM 3D nyomtatási technológiát választottuk ki, hiszen viszonylag olcsó eljárásnak számít a többi eljáráshoz képest és elég széleskörű alapanyagkészlet áll hozzá rendelkezésre, ezen tényezők miatt széles körben elterjedt. Pontossága egyes eljárásokhoz képest elmarad, azonban, ha a funkcionális felületek nem készre nyomtatásra kerülnek, hanem utómegmunkálással készülnek el (pl. menet), továbbá a pontos és szép felület az alkatrész többi részén nem követelmény, akkor kiváló választás lehet.

A publikáció egy előkutatás részleteit taglalja, amely során a rétegvastagság és a próbatest tájolásának irányultságát vizsgálja a felületi érdességre és az alakhibára nézve. Makrogeometria jellemzők közül a köralakúságot és hengerességet vizsgáltuk. A köralakúság során bármely keresztmetszet valóságos körvonalának két olyan koncentrikus kör között kell elhelyezkednie, amelyek egymástól való távolsága a megadott tűrésérték, míg hengeresség esetén a valóságos hengerfelület minden pontjának két olyan koaxiális hengerfelület között kell elhelyezkednie, amelyek egymástól való távolsága a megadott tűrésérték [7]. Ezt szemlélteti az 1. és 2. ábra.



1. ábra: Köralakúság értelmezése [7]



2. ábra: Hengeresség értelmezése [7]

2. A kísérlet módszertana

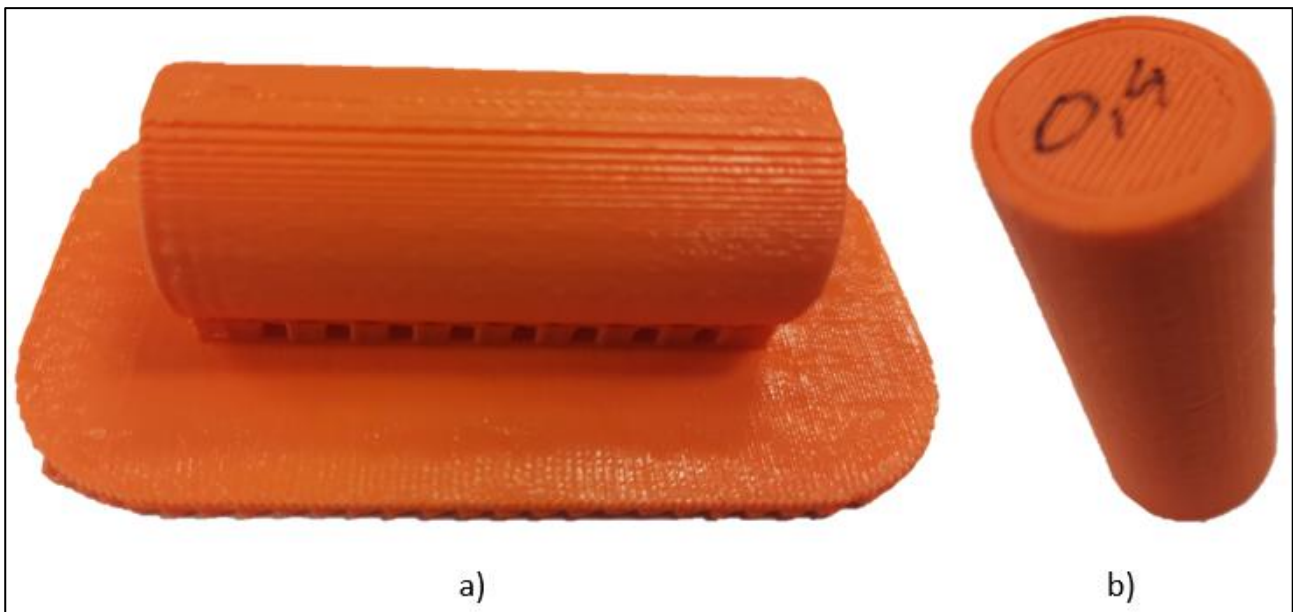
2.1. Nyomtató és nyomtatott próbatetek

A próbatetek nyomtatásához Prusa I3 típusú 3D nyomtatót használtuk. Az alkatrészeket hőre lágyuló PLA-ból (polylactic acid) [8] nyomtattuk, mely tulajdonságtartományai a 2. táblázatban figyelhetők meg.

2. Táblázat. PLA alapanyagok tulajdonságtartományai [5] [9]

Tulajdonságok	PLA
Szakítószilárdság (MPa)	15,5-72,2
Szakító modulus (GPa)	2,020-3,550
Szakadási nyúlás (%)	0,5-9,2
Hajlítószilárdság (MPa)	52-115,1
Hajlítási modulus (GPa)	2,392-4,930
Nyomtatási hőmérséklet (°C)	190-220
Nyomtatási sebesség (mm/s)	40-90

A nyomtatás során összesen 8 darab, Ø20x50 mm-es hengeres próbatest került kinyomtatásra. Ebből 4 darab álló tájolással, 4 pedig fekvő tájolással (3. ábra). Mindkét tájolás esetén 4 rétegvastagságot alkalmaztunk: 0,05; 0,1; 0,2 és 0,4 mm.



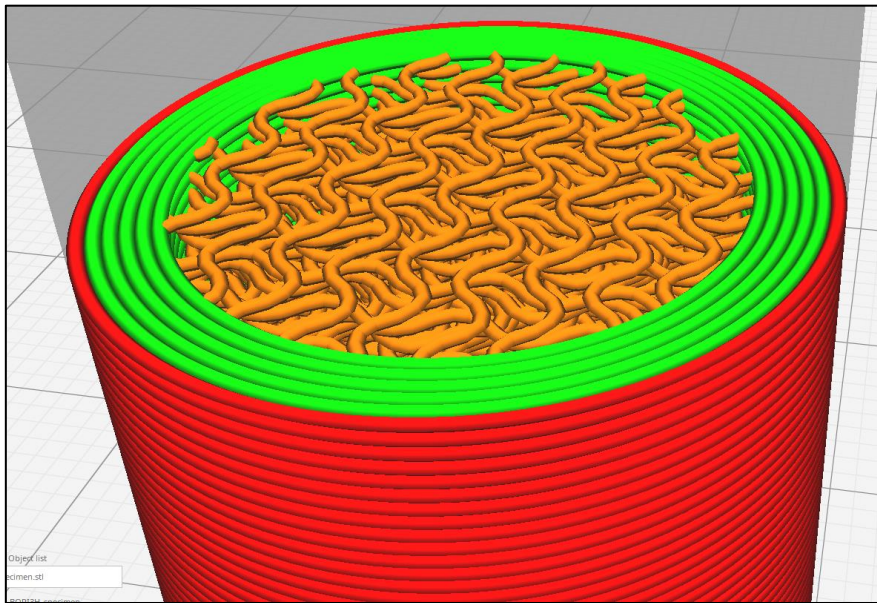
3. ábra: Nyomtatott próbatetek: a) fekvő- és b) álló tájolású

A henger modellezése és az STL-fájl kiexportálása Solid Edge tervezőszoftverben történt. A kiexportálás során 0,05 mm-es tűrést és 3°-os síkok általi bezárt szöveget alkalmaztunk.

Gyroid típusú kitöltéssel történt a nyomtatás (4. és 5. ábra), mely kitöltés a legnagyobb szilárdságot adja az összes közül minimális anyagfelhasználás mellett [10]. Mivel ezeken a próbatetekeken forgácsolhatósági vizsgálatok is lesznek végezve a jövőben, ezért a nyomtatási paraméterek a következők voltak (3. táblázat).

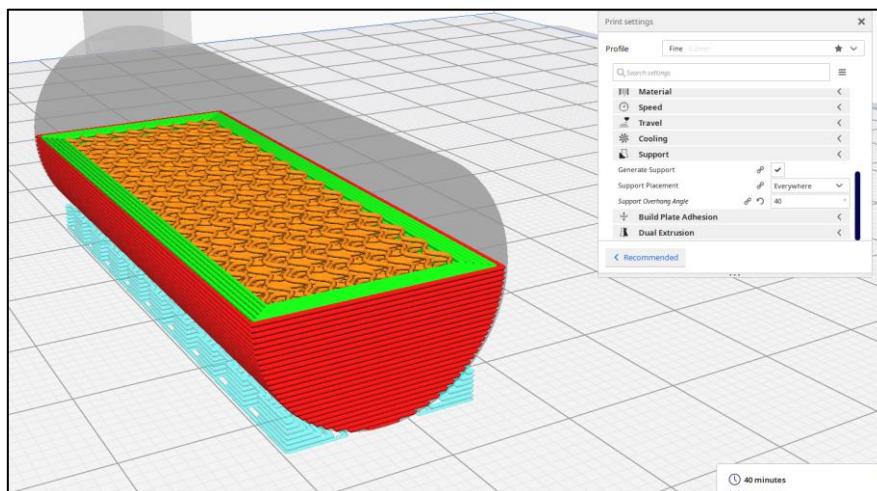
3. Táblázat. A nyomtatás során alkalmazott technológiai paraméterek

Technológiai paraméterek	Értékek
Rétegvastagság	0,05; 0,1; 0,2; 0,4 (mm)
Falvastagság	6 fal x rétegvastagság (mm)
Kitöltés sűrűsége	30 (%)
Nyomtatási hőmérséklet	215 (°C)
Nyomtatási sebesség	40 (mm/s)
Kitöltés nyomtatási sebesség	40 (mm/s)
Aktív hűtés (csak fekvő tájolás, 0,4 mm-es rétegvastagság esetén)	-



4. ábra: Gyroid kitöltésű nyomtatási stratégia
Megjegyzés: álló, 0,4 mm-es rétegvastagság

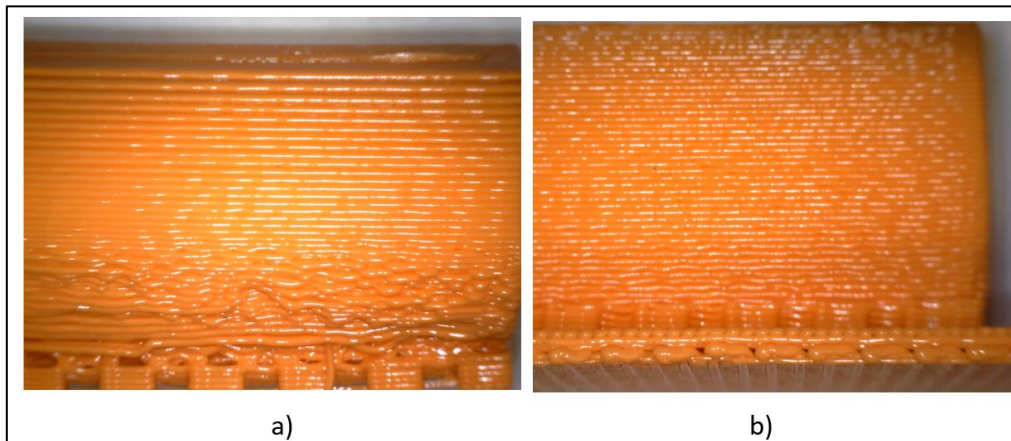
A fekvő tájolású darabok esetén szükség volt támaszanyag tervezésére is a gyárthatóság miatt, amit 40°-os hajlásszögig terveztünk (5. ábra). Azonban a későbbiekben ezt el kell távolítani, ami a mikro- és makrogeometriai jellemzőket nagy mértékben befolyásolhatja.



5. ábra: Gyroid kitöltésű nyomtatási stratégia
Megjegyzés: fekvő, 0,4 mm-es rétegvastagság

Gyártási sajátosságokból következően a felső és alsó rétegek száma meg lett emelve, mert különben hamarabb kezdődne a kitöltési rész, így a forgácsolás során a munkadarab nem felelne meg. Ebből adódóan az esztergakés csak tömör anyaggal fog találkozni. Hibákat ez is okozhat, hiszen nyomtatás során a falak koncentrikussága csak rétegenként biztosítható.

A támasszal nem alátámasztott részek esetén, ahol elvileg elég meredek már a fal, 0,4-es rétegvastagság esetén aktív hűtés alkalmazására (6. ábra) is szükség volt, mert nélküle megbomlott a rétegren.



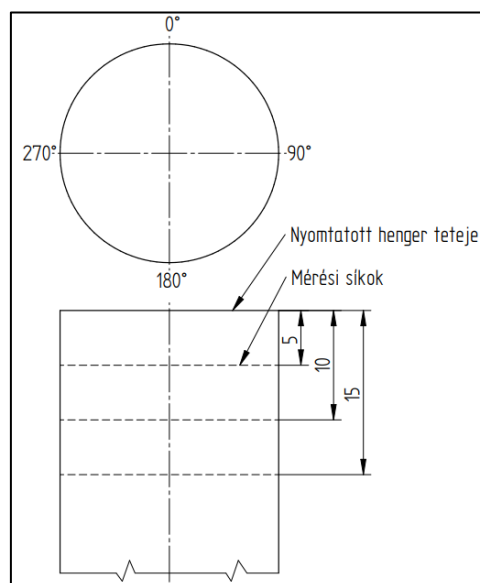
6. ábra: Nyomtatott darab a) aktív hűtés nélkül, b) aktív hűtéssel

2.2. Érdességmérés

A nyomtatott alkatrészek érdességének mérése Mitutoyo Formtracer SV-C3100 tapintós érdességmérővel történt MSZ EN ISO 4287:2002 szabvány szerint, majd a kapott profilokat Origin Pro 2021-ben értékeltük ki.

2.3. Alakhibamérés

Alakhiba mérése prizmában, 0,01 mm-es pontosságú Mitutoyo 543-270B típusú mérőórával történt, mely során a névleges mérettől való méreteltérést mértük. A mérés során három síkban, álló nyomtatással készült darabok esetén a tetejétől számítva 5-, 10- és 15 mm-nél. Mindegyik síkban négy mérés történt 0°-nál, 90°-nál, 180°-nál és 270°-nál, ahogy azt a 7. ábra szemlélteti. Kőralakhiba mérővel a nagy méreteltérések miatt nem lehetett mérni a próbatesteket. Az eredmények kiértékelését szintén Origin Pro 2021-ben végeztük el.



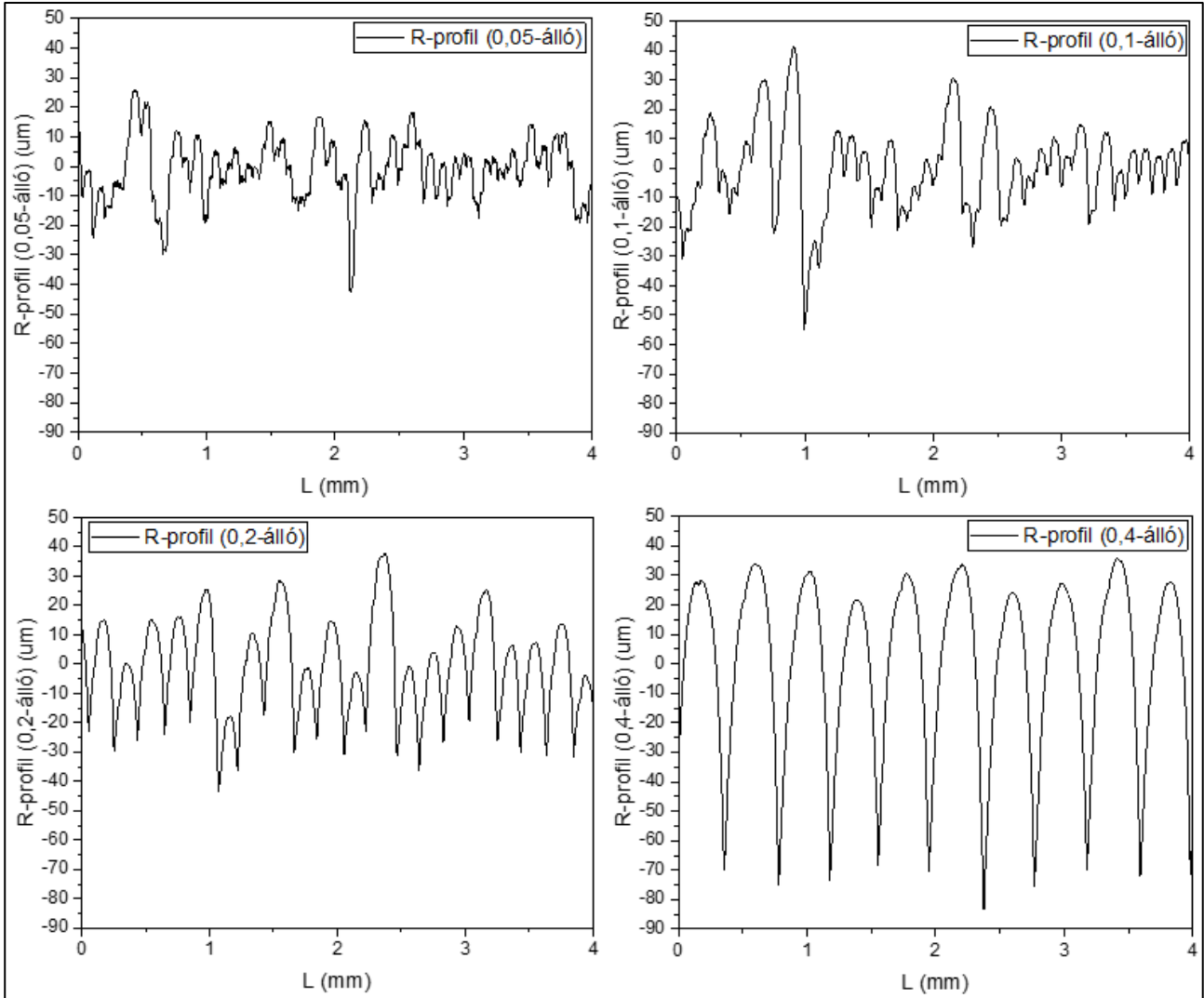
7. ábra: Alakhiba mérésének elve

3. Eredmények

3.1. Érdességmérés eredményei

3.1.1. Álló tájolás

Az álló tájolású munkadarabokon mért R-profilok az egyes rétegvastagságok esetén a 8. ábrán láthatók.



8. ábra: Álló tájolású próbatestek esetén mért R-profilok a rétegvastagság függvényében

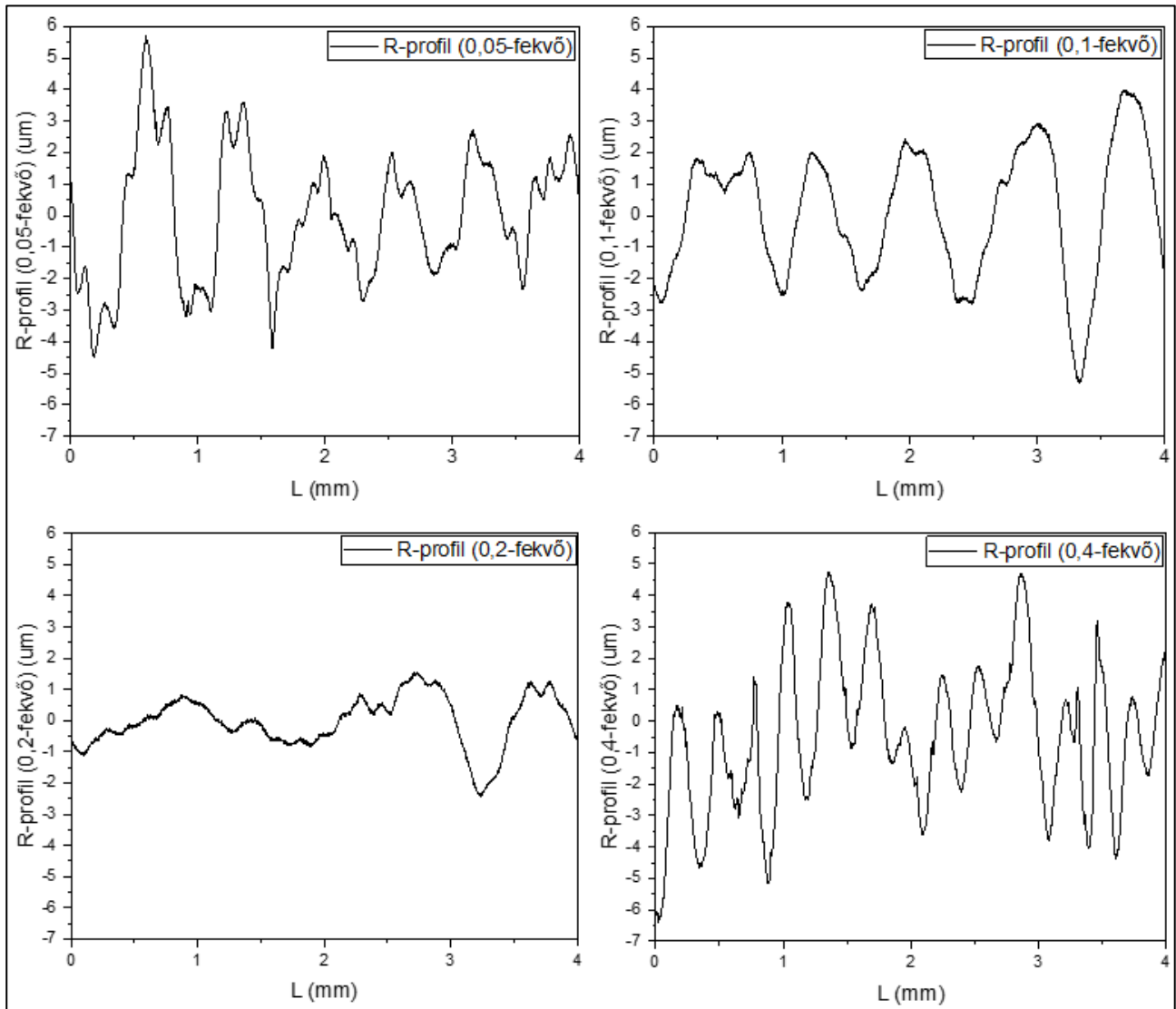
Az egyes rétegvastagságú próbatesteken mért mikrogeometriai jellemzők számszerűen a 4. táblázatban tekinthetők meg.

4. Táblázat. R_a és R_z a rétegvastagságok függvényében álló tájolás esetén

Rétegvastagság (mm)	R_a (µm)	R_z (µm)
0,05	7,981	43,627
0,1	11,064	57,297
0,2	12,803	61,664
0,4	24,552	108,374

3.1.2. Fekvő tájolás

A fekvő tájolású munkadarabokon mért R-profilok az egyes rétegvastagságok esetén a 9. ábrán figyelhetők meg.



9. ábra: Fekvő tájolású próbatestek esetén mért R-profilok a rétegvastagság függvényében

Az egyes rétegvastagságú próbatesteken mért mikrogeometriai jellemzők számszerűen az 5. táblázatban láthatók.

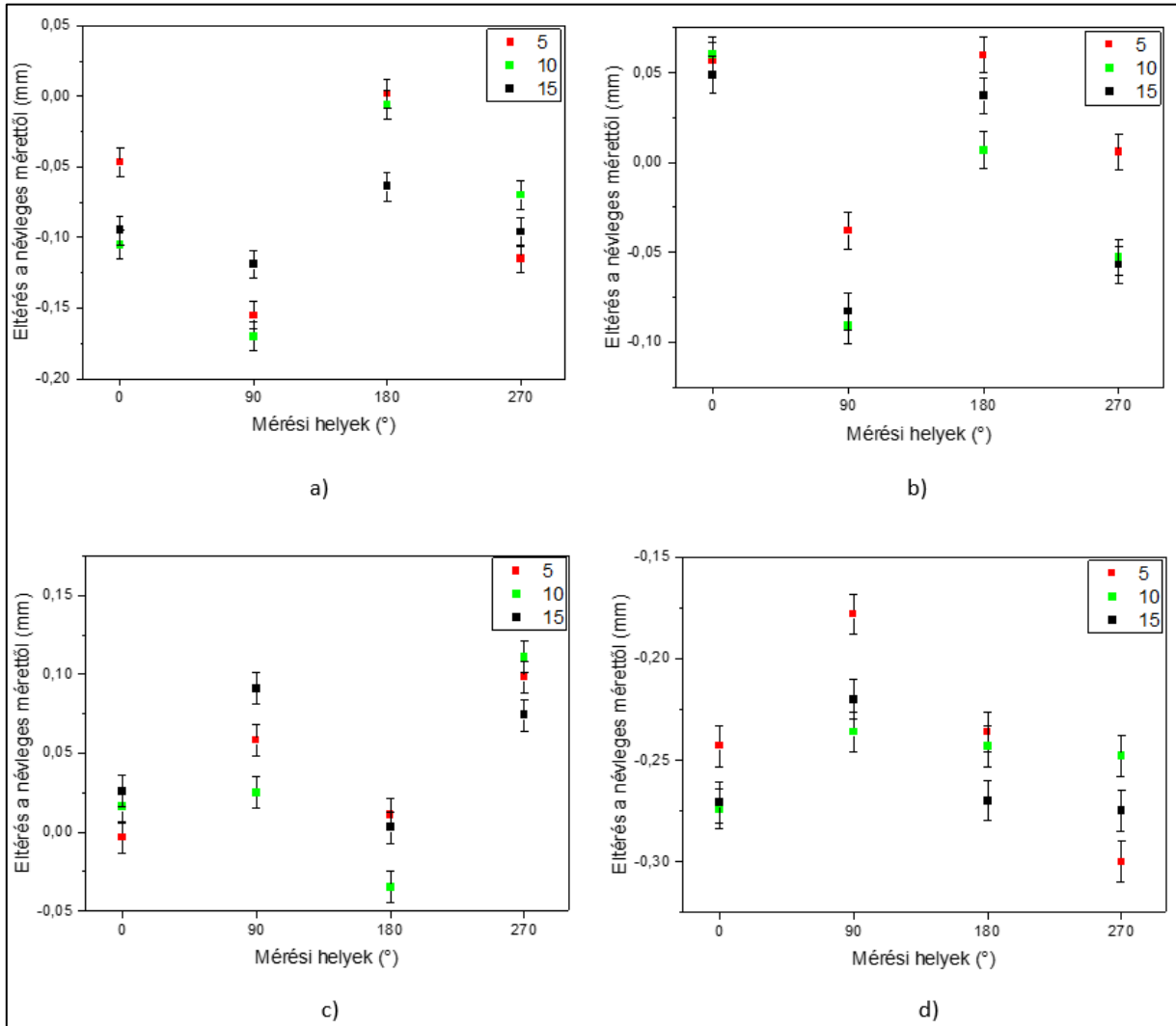
5. Táblázat. R_a és R_z a rétegvastagságok függvényében fekvő tájolás esetén

Rétegvastagság (mm)	R_a (μm)	R_z (μm)
0,05	1,895	8,225
0,1	0,651	2,484
0,2	1,785	5,914
0,4	1,721	6,633

3.2. Alakhiba mérés eredményei

3.2.1. Álló tájolás

Az álló tájolású munkadarabokon mért névleges mérettől való eltérések a 10. ábrán tekinthetők meg az egyes rétegvastagságok esetén. A jelölésekben lévő számok a munkadarab tetejétől mért síkok helyzetét mutatják ahogy az a 7. ábrán szemléltetve van. A mért pontok körüli hibaszávok a mérőóra mérési pontatlanságából adódnak, ami 0,01 mm.



10. ábra: Alakhiba az egyes rétegvastagságok esetén
Megjegyzés: a) 0,05; b) 0,1; c) 0,2 és d) 0,4 rétegvastagság

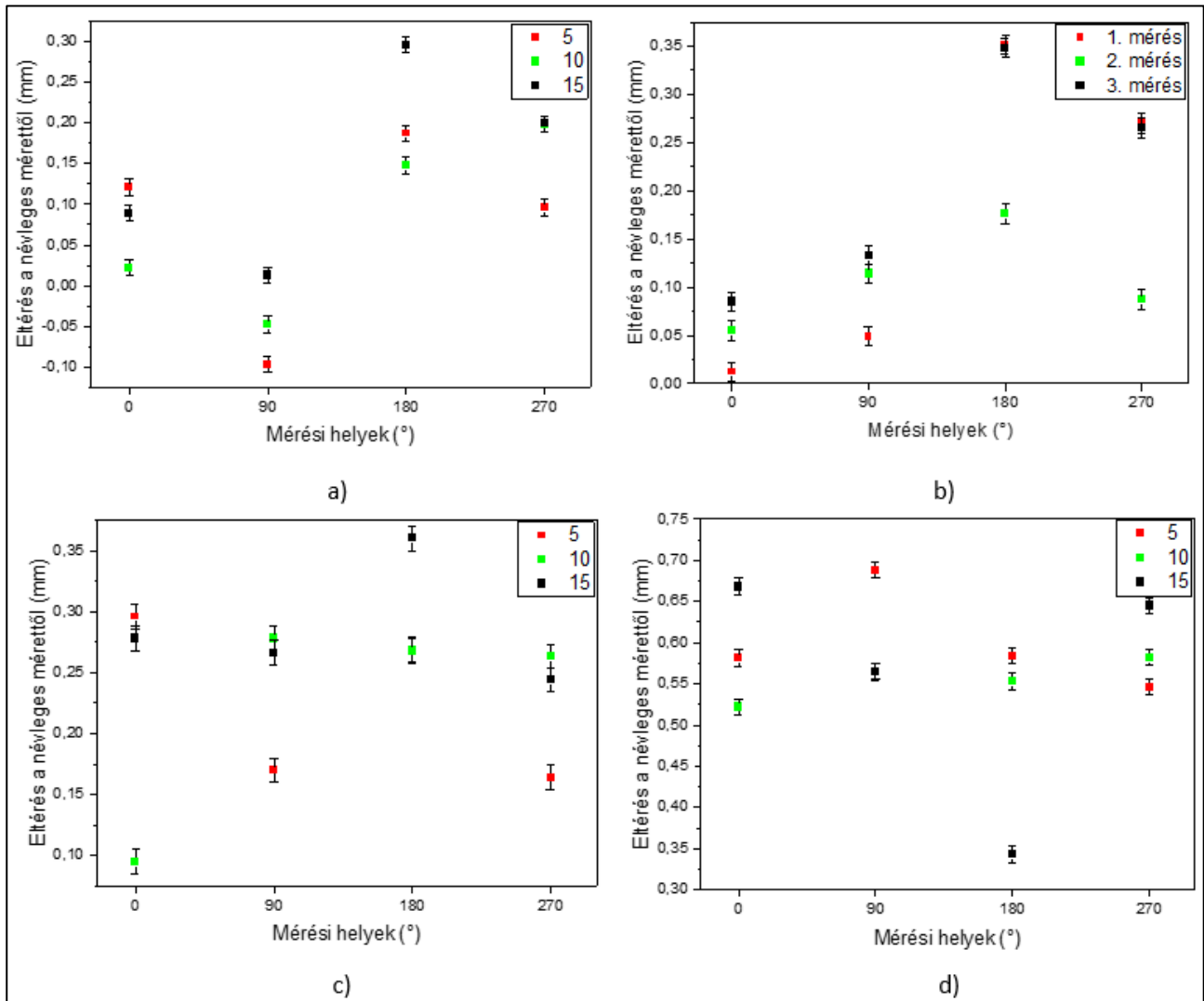
Az egyes rétegvastagságú próbatesteken mért hengeresség paramétere a 6. táblázatban láthatók.

6. Táblázat. Hengeresség a rétegvastagságok függvényében álló tájolás esetén

Rétegvastagság (mm)	Alsó határméret (mm)	Felső határméret (mm)	Tűrésmező szélesség (mm)
0,05	-0,155	0,002	0,157
0,1	-0,091	0,06	0,151
0,2	-0,035	0,111	0,146
0,4	-0,300	-0,178	0,122

3.2.2. Fekvő tájolás

A fekvő tájolású munkadarabokon mért névleges mérettől való eltérések a 11. ábrán láthatók az egyes rétegvastagságok esetén. A mérés elve itt is azonos, mint az álló darabok esetén.



11. ábra: Alakhiba az egyes rétegvastagságok esetén
Megjegyzés: a) 0,05; b) 0,1; c) 0,2 és d) 0,4 rétegvastagság

Az egyes rétegvastagságú próbatesteken mért hengeresség paramétereit a 7. táblázatban láthatók.

7. Táblázat. Hengeresség a rétegvastagságok függvényében fekvő tájolás esetén

Rétegvastagság (mm)	Alsó határméret (mm)	Felső határméret (mm)	Tűrésmező szélesség (mm)
0,05	-0,097	0,296	0,393
0,1	0,012	0,352	0,34
0,2	0,095	0,36	0,265
0,4	0,343	0,688	0,345

4. Analízis

4.1. Érdességmérés eredményei

Álló tájolású darabok esetén megállapítható, hogy az érdesség növekszik a rétegvastagsággal. Azonban ez a felületi érdesség romlás nem arányos a rétegvastagság növelésével, hiszen ahogyan ez a 8. ábrán és a 4. táblázatban is látható, a 0,1 mm-es és a 0,2 mm-es rétegvastagságú próbatestek közötti fellépő felületi érdesség növekedés csekély. Ez a megfigyelés egy optimumot enged feltételezni, ha a nyomtatási időt, azon keresztül a költséget arányosítom a nyomtatási minőséggel. Természetesen a 0,05 mm-es rétegvastagsággal nyomtatott munkadarabnak lett a legjobb felületi minősége, azonban ehhez négyszer annyi nyomtatási időre is van szükség, mint a 0,2 mm-es rétegvastagságú munkadarabhoz egységnyi térfogat esetén. A rétegek a profilon egyértelműen csak a 0,4-es rétegvastagság esetén mutatkoznak meg, azonban a 0,2 mm-es rétegvastagság esetén is megfigyelhető már. Ezt a jelenséget a rétegek megolvadása és egymáshoz való kötődés befolyásolhatja.

Alapvetően a két tájolással nyomtatott próbatestek felületi érdessége nem összehasonlítható, hiszen az álló próbatestek esetében a rétegekre merőlegesen, míg a fektetett próbadaraboknál rétegekkel párhuzamosan történt a mérés. Azonban a fent említett optimum ebben az esetben nem mondható el, itt a 0,1 mm-es rétegvastagsággal nyomtatott próbatesten értük el a legjobb felületminőséget, ahogyan az a 9. ábrán és az 5. táblázatban is megmutatkozik.

4.2. Alakhibamérés eredményei

Az álló tájolású próbatestek alakhibára vonatkozó mérési eredményei a 10. ábrán és a 6. táblázatban figyelhetők meg. Amint az látható, a hengerességre vonatkozó tűrésszélesség értéke a rétegvastagság növelésével folyamatosan csökken, ami azt jelenti gazdaságossági szempontból, hogy nagyobb rétegvastagsággal gyorsabban és szűkebb tűréssel lehet gyártani. Azonban az is megfigyelhető, ahogyan növelve van a rétegvastagság, úgy lett egyre kisebb a tényleges átmérő a névleges átmérőhöz képest. Viszont, ha ezt a hibát a tervezés során ismerve ki lehet küszöbölni, akkor a nagyobb rétegvastagsággal szűkebb hengeresség tűréssel lehetséges a gyártás.

A fekvő tájolású próbatestek alakhibára vonatkozó mérési eredményei a 11. ábrán és a 7. táblázatban tekinthetők meg. Mivel ezen próbatestek esetén támaszanyag nyomtatására is szükség volt, melyeket utána mechanikus úton el kellett távolítani, ez nagy bizonytalanságot vitt a mérésbe. Egyedül csak a 0,4 mm-es rétegvastagságú próbatest esetén lehetett kézzel letörni épségben a támaszanyagot úgy, hogy a felületen látszólag semmilyen sérülés nem keletkezett. Ez alapján elmondható, hogy csak ebben az esetben tekinthetők egzaktnak az eredmények. A többi esetben a támaszanyag köszörüléssel volt eltávolítva, emiatt a mért eredményekbe biztosan változást okozott. Ez a procedúra kiküszöbölhető lehetett volna 2 fejes nyomtatóval történő nyomtatással és támaszanyagként PVA (Polivinyl Alcohol – vízdékony polimer) alkalmazásával. Általánosságban megfigyelhető, ahogyan növelve volt a rétegvastagság, úgy lett nagyobb a tényleges méret a névleges mérettől, azonban a tűrésmező szélessége csökkent, kivéve a 0,4 mm-es rétegvastagságnál, ahol újra emelkedni kezdett.

5. Összegzés

Összegzésként elmondható, hogy a jelen geometria esetében az álló tájolású nyomtatás kedvezőbb eredményt hozott és kevésbé problémás eljárás, mint a fekvő tájolású nyomtatás, ahol a nyomtatást követően el kell távolítani a támaszanyagot, ami nyomot hagy a nyomtatott termék felszínén, így rontva annak esztétikai milyenségét, illetve maga a nyomtatási folyamat is komplikáltabb, ahogyan az a 6. ábrán is látszik.

Általánosságban elmondható, hogy a felületi érdességnek optimuma van mindkét tájolás esetén a nyomtatási idő függvényében. Ez nagy mértékben befolyásolja a gépidő révén a nyomtatási költségeket.

Megfigyelhető ezzel összefüggésben, hogy a rétegvastagság növeléssel a hengeresség tűrésmezőjének szélessége csökken, ezáltal ha mérettorzulást a tervezés során sikerül kompenzálni, akkor pontosabb termékeket lehet gyártani.

Irodalomjegyzék

- [1] H. Alzyod and P. Ficzer, "The Influence of the Layer Orientation on Ultimate Tensile Strength of 3D Printed Poly-lactic Acid," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 16, no. 3, 2022.
- [2] B. Ádám and Z. Weltsch, "Thermal and Mechanical Assessment of PLA-SEBS and PLA-SEBS-CNT Biopolymer Blends for 3D Printing," *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 6218*, vol. 11, no. 13, p. 6218, Jul. 2021, doi: 10.3390/APP11136218.
- [3] "Tribological Behaviour Comparison of ABS Polymer Manufactured Using Turning and 3D Printing megtekintése | International Journal of Engineering and Management Sciences."
<https://deenkdev.lib.unideb.hu/ojs/IJEMS/article/view/5154/4883> (accessed Jun. 08, 2022).
- [4] G. Krolczyk, P. Raos, and S. Legutko, "EXPERIMENTAL ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS AND SURFACE TEXTURE OF MACHINED AND FUSED DEPOSITION MODELLED PARTS," 2012.
- [5] T. Yao, Z. Deng, K. Zhang, and S. Li, "A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations," *Composites Part B: Engineering*, vol. 163, pp. 393–402, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2019.01.025.
- [6] J. T. Cantrell *et al.*, "Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 811–824, 2017, doi: 10.1108/RPJ-03-2016-0042/FULL/XML.
- [7] "Műszaki alapismeretek | Sulinet Tudásbázis."
<https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/mezogazdasag/muszaki-alapismeretek/alakturesek/alakturesek> (accessed Jun. 09, 2022).
- [8] J. Jos´ *et al.*, "Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, pp. 2423–2443, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03532-5.
- [9] A. Nugroho, R. Ardiansyah, L. Rusita, and I. L. Larasati, "Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1130, no. 1, p. 012017, Nov. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1130/1/012017.
- [10] G. K. Maharjan, S. Z. Khan, S. H. Riza, and S. H. Masood, "Compressive Behaviour of 3D Printed Polymeric Gyroid Cellular Lattice Structure," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 455, no. 1, p. 012047, Dec. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/455/1/012047.