

# 3D NYOMTATOTT PRÓBATESTEK MECHANIKAI VIZSGÁLATA

## MECHANICAL TESTING OF 3D PRINTING SPECIMENS

Ádám Balázs<sup>1\*</sup>, Polgár Balázs<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

3D nyomtatás  
PLA  
FDM/FFF  
nyomtatási paraméterek  
mechanikai tulajdonságok

### Keywords:

3D printing  
PLA  
FDM/FFF  
print settings  
mechanical properties

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. augusztus 7.  
Átdolgozva 2018. március 8.  
Elfogadva 2019. március 19.

---

### Összefoglalás

3D nyomtatásnál fontos a megfelelő beállítások megválasztása, mert befolyásolni tudják a nyomtatott termék mechanikai szilárdságát. PLA szálból FDM/FFF típusú nyomtatóval próbatestek lettek kinyomtatva három hőmérsékleten, két sebességgel, és két felépítési struktúrával. Az eredmények azt mutatták, hogy az építési szálorientáció hatása a legnagyobb, kisebb, de jól kimutatható a hőmérséklet hatása, és nem egyértelmű, így további vizsgálatokat igényel a sebesség hatásának pontosítása.

### Abstract

In 3D printing, it is important to choose the right settings because they can influence the mechanical strength of the printed product. From PLA fiber, FDM/FFF type printer was used to print specimens. The changing parameters were three temperatures, two speeds, and two building structure. The results showed that the impact of the construction of fiber orientation was the greatest. The effect of temperature is less influencing, but it is well demonstrated. The effects of speed is not clear, so further studies are required.

---

## 1. Bevezetés

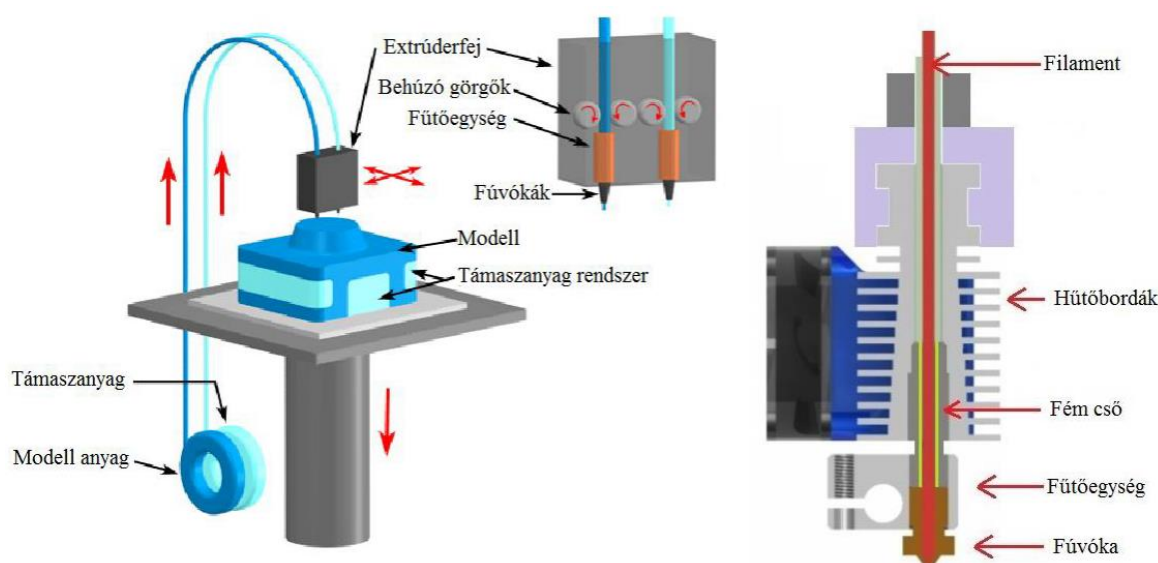
A gyors prototípusgyártás, vagy elterjedtebb nevén 3D nyomtatás napjainkra nemcsak egyre népszerűbbé, hanem egyúttal elérhetőbbé is vált. Már nem csak a nagyobb vállalatok engedhetik meg maguknak, hogy vizuális modelleket, funkcionális prototípusokat, gyors szerszámelőállítás [1] valósítsanak meg, hanem magánszemélyek is vásárolhatnak az elérhető árral rendelkező 3D nyomtatók közül, és így saját maguk is előállíthatnak különböző dekor termékeket, ajándéktárgyakat. A minőség azonban ugyanolyan fontos, bármilyen típusú felhasználásról van szó, ezért nagyon fontos, hogy megvizsgáljuk a rendelkezésre álló nyomtatók beállítási lehetőségeit és természetesen az adott berendezéshez használható nyomtatóanyagokat is.

Többféle 3D nyomtatási technológia van, ezek lényege, hogy a legyártani kívánt termék virtuális modelljét a nyomtató szoftvere rétegekre darabolja, majd valamilyen eljárással újra felépíti rétegről rétegre [2]. A különböző technológiák közül az FDM (Fused Deposition Modelling), vagy FFF (Fused Filament Fabrication) névvel ellátott eljárás az, amit egyaránt használ az ipar és a magánszektor, mert a gyártók különböző minőségű és árú termékeket hoznak forgalomba, lehetőséget adva a magánszemélyek részére is a vásárlásra, ami nagyban hozzájárult a 3D nyomtatás népszerűségének növeléséhez.

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76 516 395  
E-mail cím: adam.balazs@gamf.uni-neumann.hu

Az FDM/FFF technológia működését, és a nyomtatófej felépítését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Az FDM/FFF gyártástechnológia működési elve és fejelepítése [1]

A feltekercselt hőre lágyuló polimer szál behúzó görgők segítségével jut el a fűtött nyomtatófejbe, ahol ömledék állapotba kerül és a fűvőkán keresztül a nyomtató a megadott helyre fekteti le a megömlesztett szálát. Egy réteg elkészítése után a tálca lentebb süllyed és a síkban szabadon mozgó fej elkezd lefektetni a következő réteg szálait. Ha a nyomtató rendelkezik két fejjel, akkor lehetőség van támaszanyag használatára, vagy többszínű termék nyomtatására.

A legtöbb nyomtatóhoz a gyártó felkínál egy úgynevezett gyári beállítást, ami a nyomtatás optimális minőségét biztosítja, de természetesen van lehetőségünk a paramétereket módosítani. A nyomtatás hőmérsékletének, sebességének a megváltoztatásával befolyásolni tudjuk a korábbi és a friss rétegek közötti hőátadást, ami befolyásolja az összehegedési folyamatokat, a zsugorodást, és kristályos anyagoknál a kialakuló kristályszerkezetet. De ugyanilyen fontos, hogy a szálakból milyen módon építjük fel a terméket, milyen irányokat, orientációt alkalmazunk. Ezeknek a paramétereknek a megfelelő megválasztásával növelni tudjuk a nyomtatott tárgy minőségét, esztétikáját és mechanikai szilárdságát is.

A nyomtatáshoz többféle alapanyag használható, az FDM/FFF technológia egyik kiemelkedő anyaga a PLA (Poly-Lactic Acid), a politejsav. A PLA biopolimer, ami azt jelenti, hogy természetes anyagokból állítható elő, és ipari körülmények között, magas páratartalom és hőmérséklet mellett komposztálással biológiailag lebomló polimer. Napjainkban a környezetvédelem egyre fontosabb szerepet játszik, ráadásul a mechanikai tulajdonságai (60 MPa húzószilárdság, 3 GPa rugalmassági modulus) is kedvezőek, ezeknek köszönhetően elterjedt nyomtató alapanyaggá vált. [3-5]

A PLA részben kristályos, hőre lágyuló poliészter, előállításának az alapja a tejsavas erjesztés, a fermentálás. Két izomerje fordul elő, az L-laktid és a D-laktid. A kereskedelmi forgalomban kapható PLA anyagok kopolimerek, melyek L-laktidot (PLLA, Poly-L-Lactic Acid) és D,L-laktidot (PDLLA, Poly-D,L-Lactic Acid) is tartalmaznak. Ezek különböző arányai miatt eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek. [4-7]

Jelen cikkünkben kereskedelmi forgalomban kapható PLA nyomtatószálból, különböző nyomtatási paraméterekkel készült próbatestek vizsgálatát végeztük el, arra keresve a választ, hogy a különböző nyomtatási hőmérsékletek, sebességek és építési orientációk alkalmazása hogyan befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat.

## 2. Kísérleti rész

### 2.1. Alapanyag

A nyomtatószálak közül a Filament 1,75 mm átmérőjű, zöld színű PLA szálára esett a választás, ami a Bitshapes Webáruházon keresztül lett megrendelve. [8]

### 2.2. Nyomtató

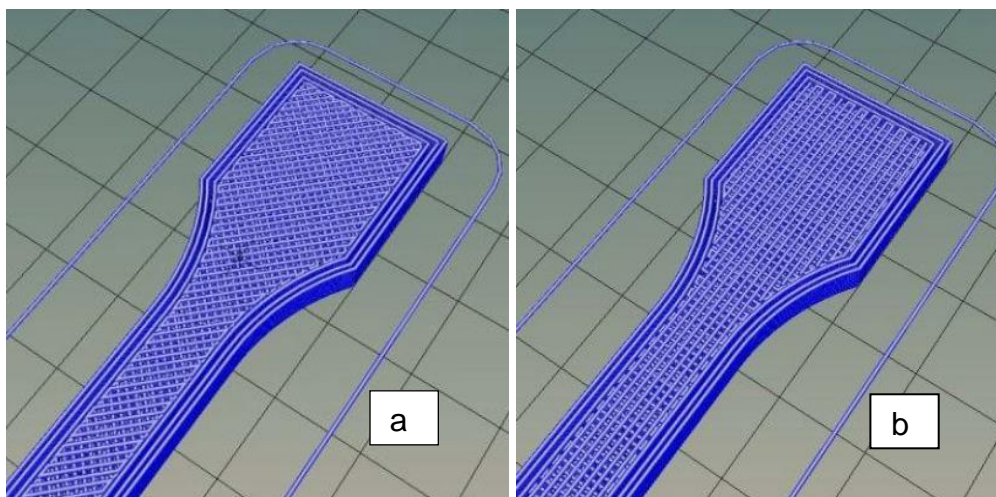
A nyomtatáshoz a Neumann János Egyetem Anyagtechnológia Tanszék Craftbot PLUS típusú FFF technológiával működő 3D nyomtatóját használtuk. A nyomtató X és Y irányban 4 mikron, Z irányban 2 mikron pontossággal tud mozogni, a rétegek vastagsága 50 és 300 mikron között állítható. A nyomtatási tér alapterülete 250x200 mm, magassága 200 mm. A nyomtató 1,7 mm átmérőjű szálát képes feldolgozni, a maximális nyomtatási sebesség 200 mm/s, és a nyomtatófej fűvóka átmérője 0,4 mm. Az elérhető maximális hőmérséklet a nyomtatófej esetén 250°C, a nyomtatótálcánál pedig 110°C. [9]

### 2.3. Nyomtatási paraméterek

A vizsgálatokhoz két különböző felépítési struktúra, két nyomtatási sebesség, és három nyomtatási hőmérséklet lett kiválasztva. Az első struktúránál az egyik réteg megegyezik a próbatest hossz tengelyével, a másik merőleges rá, így építve fel a vizsgálandó darabot, elnevezése 90°-os orientáció. A második struktúránál az egyik réteg 45°-os, a rá következő erre szintén merőleges, elnevezése 45°fokos orientáció. A két sebesség 40 és 60 mm/s. A három hőmérséklet pedig 205, 215 és 225°C volt.

Egy beállításból öt darab szakító és öt darab ütő-hajlító próbatest került nyomtatásra, vizsgálati keresztmetszetük 4x10 mm. A beállítások elnevezése tartalmazza először az orientációt, majd azt követi a sebesség, végül pedig a hőmérséklet. Például a 90°-os orientációjú, 60 mm/s-os sebességgel és 225°C-on gyártott próbatest jelölése 90-60-225, a 45°-os orientációjú, 40 mm/s-os sebességgel és 205°C-on gyártott próbatest jelölése pedig 45-40-205.

A két nyomtatási struktúra a 2. ábrán látható.



2. ábra. Nyomtatási struktúrák, a) +45/-45°, b) 0/90°

### 2.4. Vizsgálati eljárások

A nyomtatott próbatetekeken szakító és Charpy ütő-hajlító vizsgálatokat végeztünk a Neumann János Egyetem akkreditált Anyagvizsgáló és Méréstechnikai Laboratóriumában. A szobahőmérsékleten végzett szakító vizsgálatához Instron 3366 univerzális vizsgálóberendezést (vizsgálási sebesség 50 mm/perc), a Charpy ütő-hajlító vizsgálatokhoz Ceast Impactor II ütőgépet használtunk (5 kJ-os kalapács). [10, 11]

### 3. Eredmények és kiértékelés

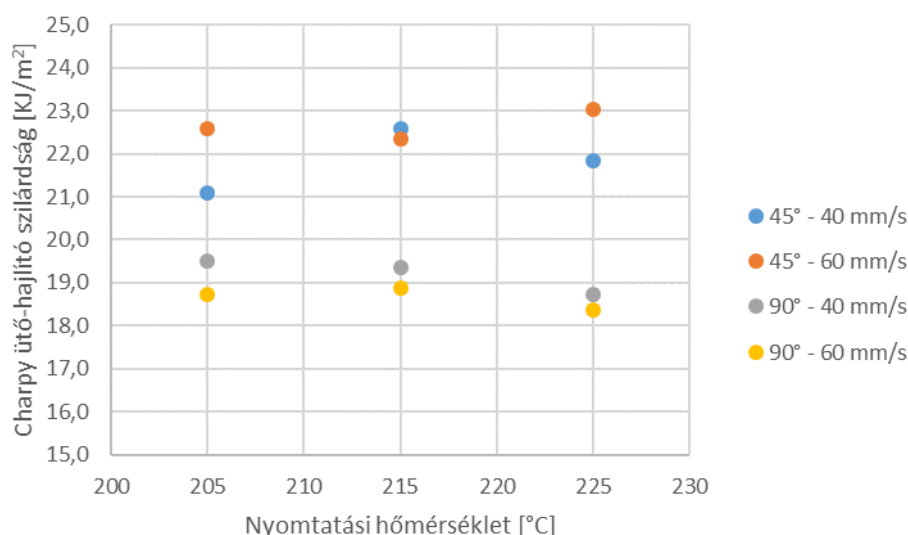
#### 3.1. Ütő-hajlító szilárdság

Az 1. táblázatban láthatóak a különböző nyomtatási beállítások során mért ütő-hajlító szilárdság értékek átlag és szórás eredményei.

1. Táblázat. Charpy ütő-hajlító szilárdság eredményei

Nyomtatási beállítás	Ütő-hajlító szilárdság	
	átlag [kJ/m <sup>2</sup> ]	szórás [kJ/m <sup>2</sup> ]
45-40-205	21,1	1,8
45-40-215	22,6	0,9
45-40-225	21,9	1,4
45-60-205	22,6	1,3
45-60-215	22,3	2,2
45-60-225	23,0	3,2
90-40-205	19,5	7,6
90-40-215	19,4	1,3
90-40-225	18,7	2,4
90-60-205	18,7	1,0
90-60-215	18,9	0,7
90-60-225	18,4	2,2

A 3. ábra szemlélteti az ütő-hajlító szilárdság változását a hőmérséklet, az orientáció és a nyomtatási sebesség függvényében.



3. ábra. Charpy ütő-hajlító szilárdság változása

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a 45°-os orientáció alkalmazásával nagyobb ütő-hajlító szilárdság érhető el, rugalmasabban viselkedik, mint a 90°-os, és jól láthatóan el is különül egymástól a két struktúra. A 90°-os orientáció esetén a hőmérséklet és a sebesség növelése kismértékben csökkentette az ütő-hajlító szilárdságot, míg 45°-nál a paraméterek növelésének hatása nem egyértelmű, de a tendencia növekvő, bár ennek igazolására több, különböző hőmérsékleten való nyomtatás eredményeire lenne még szükség.

### 3.2. A szakító vizsgálat eredményei

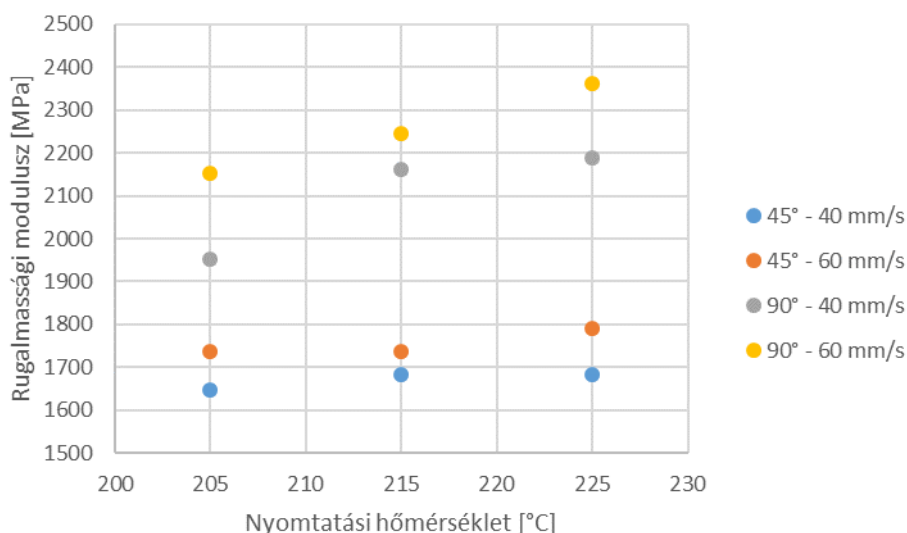
A 2. táblázatban láthatóak a szakító vizsgálat eredményei, a különböző nyomtatási beállítások mérése során kapott húzó rugalmassági modulusz, szakító szilárdság és szakadási nyúlás értékek átlag és szórás eredményei.

2. Táblázat. A szakító vizsgálat eredményei

Nyomtatási beállítás	Rugalmassági modulusz		Szakító szilárdság		Szakadási nyúlás	
	átlag [MPa]	szórás [MPa]	átlag [MPa]	szórás [MPa]	átlag [%]	szórás [%]
45-40-205	1646	30,8	51,3	3,8	3,9	0,33
45-40-215	1684	23,2	55,4	1,9	4	0,07
45-40-225	1684	23,2	55	2	4,1	0,09
45-60-205	1738	239,3	52,1	1	3,8	0,22
45-60-215	1738	239,3	54,8	0,7	3,7	0,07
45-60-225	1792	190,9	55,6	1,6	3,9	0,11
90-40-205	1952	249,2	48,1	1,5	3,5	0,22
90-40-215	2161	66,2	47,4	1,2	3,3	0,12
90-40-225	2189	91,7	50	1,4	3,4	0,08
90-60-205	2154	65,4	46,5	0,9	3,3	0,07
90-60-215	2246	110,5	48,4	1,3	3,4	0,07
90-60-225	2362	51,3	48,9	0,7	3,3	0,09

### 3.3. Rugalmassági modulusz

A 4. ábra mutatja a rugalmassági modulusz változását a hőmérséklet, a nyomtatási sebesség, és az orientáció függvényében.

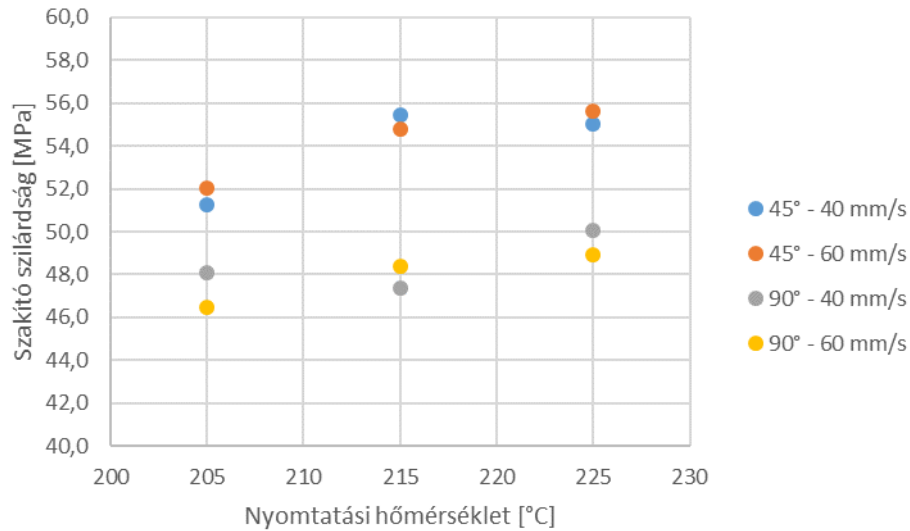


4. ábra. Rugalmassági modulusz változása

A rugalmassági modulusz változása jól illeszkedik az ütés-szilárdság eredményeihez, a 90°-os orientáció alacsonyabb fajlagos ütmunkája ridegebb viselkedésre utalt, és ezt a kapott magasabb rugalmassági modulusz értékek jól igazolják. A paraméterek közül a hőmérséklet és a sebesség növelésével is minden esetben növekszik a rugalmassági modulusz.

### 3.4. Szakító szilárdság

A 5. ábra szemlélteti a szakító szilárdság változását a hőmérséklet, az orientáció és a nyomtatási sebesség függvényében.

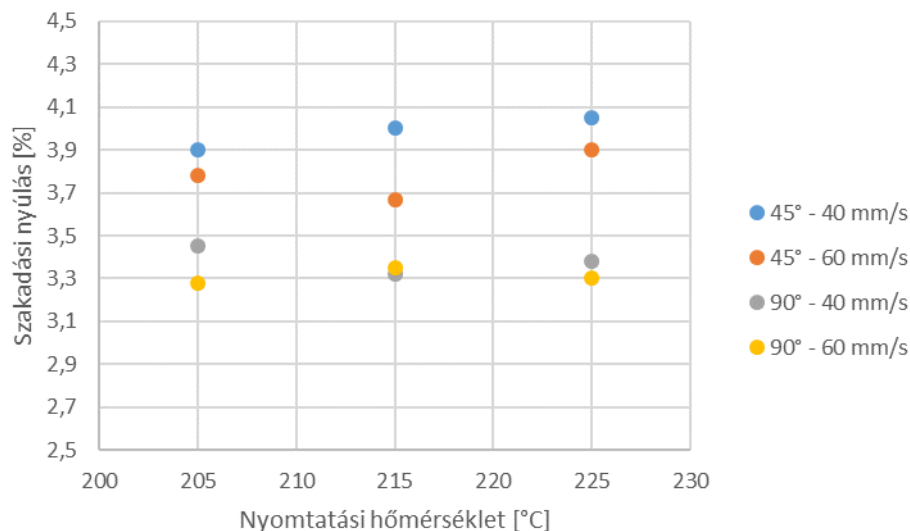


5. ábra. Szakító szilárdság változása

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a 45°-os orientáció alkalmazásával nagyobb szakító szilárdság érhető el, mint 90°-os esetén, és a két struktúra jól láthatóan el is különül egymástól. A hőmérséklet növelése minden esetben növelte a szakító szilárdságot, de a sebesség növelése már nem egyértelmű. A 215°C-on nyomtatott próbatestek eredményei különböznek a másik két hőmérsékleten mért értékektől, így több, különböző hőmérsékleten való nyomtatás eredményeire lenne még szükség a sebesség hatásának pontosabb igazolására.

### 3.5. Szakadási nyúlás

Az 6. ábra mutatja a szakadási nyúlás változását a hőmérséklet, a nyomtatási sebesség, és az orientáció függvényében



6. ábra. Szakadási nyúlás változása

A szakadási nyúlás eredményei alapján megállapítható, hogy a 45°-os itt is elkülönül a 90°-os orientációtól, és bár minden beállítás a PLA-ra jellemző rideg viselkedést mutatja, 45°-os szálorientáció és lassabb, 40 mm/s-os sebesség alkalmazásával érhetjük el, hogy még ha tized

milliméterekkel is, de tovább nyúljon a nyomtatott termék húzóigénybevétel esetén. A hőmérséklet növelés hatása kismértékű, de növekvő tendenciát mutat 45°-nál, és gyakorlatilag nem változik 90° esetében. A sebesség növelése csak a 45°-os orientáció esetén egyértelmű, ott csökkenti a nyúlás értékeit, 90° alkalmazásánál a három vizsgált hőmérséklet közül kettőnél is inkább csökkentő hatást fejt ki, de a tényleges változás igazolásához itt is több mérési pontra lenne szükség.

#### 4. Összefoglalás

A mérési eredményekből az állapítható meg, hogy az alkalmazott változtatások, 45°-os és 90°-os építési orientáció, 40 és 60 mm/s-os nyomtatási sebesség és 205, 215, valamint 225°C-os nyomtatási hőmérséklet közül a legnagyobb befolyásoló hatása az építési struktúrának van. A 45°-os szálorientáció a húzó rugalmassági moduluszon kívül minden esetben magasabb értékeket mutatott, nagyobb ütő-hajlító szilárdsággal, nagyobb szakító szilárdsággal és nagyobb szakadási nyúlással rendelkezett.

A hőmérséklet változtatás volt a következő paraméter, aminek a hatása a legtöbb esetben egyértelműen kimutatható volt. A nyomtatási hőmérséklet növelése a szakító vizsgálat eredményeit pozitívan befolyásolta, tehát a magasabb nyomtatási hőmérséklet hatására a szálak összehegedése javul, és így a húzóigénybevételnek jobban ellen tud állni a nyomtatott termék. 45°-os szálorientáció esetén kismértékben, de az ütő-hajlító szilárdságra is növelő hatással van.

A nyomtatási sebesség változtatásának a hatása a legtöbbször nem volt egyértelmű, csak a rugalmassági modulusz esetén volt kimutatható, hogy a sebesség növelése növeli a rugalmassági moduluszt, a többi esetben további mérésekre lenne szükség a pontos hatás igazolásához.

Összeségében tehát elmondható, hogy a szálak összehegedéséért leginkább felelős paraméterek, mint a hőmérséklet és a sebesség csak kismértékben változtatta meg a mechanikai tulajdonságokat, sokkal jelentősebb a hatása az építési struktúrának, szálorientációnak. Nagy valószínűség szerint a 45°-os orientáció esetén a szálak részben fel tudják venni a próbatest hossz tengelyével megegyező és arra merőleges terhelő erőket is, míg a 90°-os orientáció esetén a hossz tengelyre merőlegesen elhelyezkedő szálak mind ütő-, mind húzóigénybevétel esetén könnyen, hamarabb elválnak egymástól, és a termék szilárdságát inkább a hosszirányú szálak biztosítják. Ennek a ténynek az igazolására további vizsgálatokra van szükség.

#### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

#### Irodalomjegyzék

- [1] Polimer termékek kisszériás gyártása, Jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék, változat: 3.6 kiadva: 2017.03.22.
- [2] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [3] Pál Károlyné: Komposztálható és az élő szervezetben lebomló politejsav alkalmazása, <http://www.muanyagipariszemle.hu/2012/01/komposztalhato-es-az-elo-szervezetben-lebomlo-politejsav-alkalmazasa-17.pdf>
- [4] Dr. Tábi Tamás: Biopolimerek, biopolimer kompozitok, Budapesti Műszaki Egyetem előadás, [www.pt.bme.hu/futotaryak/57\\_BMEGEPTMG12.../Biopolimerek\\_eloadas\\_2015.pdf](http://www.pt.bme.hu/futotaryak/57_BMEGEPTMG12.../Biopolimerek_eloadas_2015.pdf)
- [5] Dr. Bodnár Ildikó: Lebomló polimerek, Debreceni Egyetem előadás [www.eng.unideb.hu/userdir/bodnari/lebonthato%20muanyagok/lbm-ea-2014.pdf](http://www.eng.unideb.hu/userdir/bodnari/lebonthato%20muanyagok/lbm-ea-2014.pdf)
- [6] L.-T. Lim, R. Auras, M. Rubino: Processing technologies for poly(lactic-acid), Progress in Polymer Science 33 (2008) 820-852
- [7] Anders Södegard, Mikael Stolt: Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition, Progress in Polymer Science 27 (2002) 1123-1163
- [8] <http://www.bitshapes.hu/shop/alapanyagok/philament-pla/pla-175-zold-philament-1kg>
- [9] <http://bitshapes.hu/shop/nyomtatok/craftbot-plus-3d-nyomtato>
- [10] MSZ EN ISO 527-1 Műanyagok. A húzási tulajdonságok meghatározása.
- [11] MSZ EN ISO 179-1 Műanyagok. A Charpy-féle ütési jellemzők meghatározása.