

3D NYOMTATOTT IPARI MŰANYAGOK ANYAGVIZSGÁLATA A MŰSZAKI GYAKORLATBAN

MATERIAL TESTING OF 3D PRINTED INDUSTRIAL PLASTICS IN TECHNICAL PRACTICE

Molnár Tamás Géza*, Zsótér Brigitta**

ABSTRACT

Our research was made with the 3D printing the mechanics characteristics of plastic components, concerned they examines the opportunities of his technical application. We put tearing test bodies on with different printing technologies to this, from different stocks and made change in with printing parameters. It was ready test bodies onto the plastics valid, ISO we submitted it to a tearing examination pulled according to 527 standards. The stock we compared the results of examinations with the tearing solidity of the die-cast products, based on what the capacity of components was made with the 3D printing averagely 25-35%-al lower. The productivity differences compared to the die-cast, concerned because of the form freedom of the printing the printing technology primarily small series and merchandising test production means a suitable solution in his case. The collected results serve as a basis onto the printing to the modeling of planned components and his sizing.

1. BEVEZETÉS

A XXI. században a technológia fejlődése megköveteli a mesterséges mérnöki anyagok teljesítőképességének növekedését. A mérnökök által megtervezett konstrukciók kialakításának és teherbíró képességének a felhasznált anyagok tulajdonságai szabnak határt [1]. A gépészeti tervezők eszköztárát nagymértékben szélesítik a napjainkban is folyamatosan fejlődő kompozit anyagok [2], amelyek alkalmazásával egyes szerkezetek, berendezések nagyobb hatékonysággal és élettartammal üzemelhetnek [3]. Ebből a szempontból kiemelkedően fontos szerepe van a polimer szerkezeti anyagoknak [4] [5] [6], amelyeket egyéb polimerekkel, fémekkel vagy kerámiákkal társítva nagyteljesítményű kompozit struktúrák állíthatók elő [7].

Kutatásunk a 3D nyomtatással készült műanyag alkatrészek mechanikai tulajdonságait [8] [9], illetve azok műszaki alkalmazásának lehetőségeit vizsgálja [10] [11]. Ehhez szakító próbatesteket készítettünk eltérő nyomtatási technológiákkal, különböző alapanyagokból

és változtatott nyomtatási paraméterekkel. Az elkészült próbatesteket a műanyagokra érvényes, ISO 527 [12] szabvány szerinti húzva szakító vizsgálatnak vetettük alá. Az alapanyag vizsgálatok eredményeit a fröccsöntött termékek szakító szilárdságával vetettük össze [13], ami alapján a 3D nyomtatással készült alkatrészek terhelhetősége átlagosan 25-35%-al alacsonyabb. A fröccsöntéshez viszonyított temelékenységi különbségek, illetve a nyomtatás formabeli szabadsága miatt a nyomtatási technológia elsősorban kisszerű és termékfejlesztési próbagyártás esetében alkalmas megoldást jelent [14] [15]. A gyűjtött eredmények alapul szolgálnak a nyomtatásra tervezett alkatrészek modellezéséhez és méretezéséhez.

A mindennapi és a műszaki életben is egyre nagyobb mennyiségben alkalmaznak polimereket, piacuk az évtized elején lezajlott gazdasági válságot követően újra növekedésnek indult. Az erősítetlen polimerek mellett a kompozitok is egyre nagyobb népszerűségnek örvendenek, köszönhetően annak, hogy kis sűrűségük mellé viszonylag nagy szilárdság párosul. A növekvő igény nem csak a térhálós mátrixú kompozitokat érinti, hanem a hőre lágyuló kompozitokat is [16], hiszen ezekből az anyagokból viszonylag kevés energia befektetéssel, könnyen lehet nagy mennyiségben különféle háromdimenziós termékeket előállítani fröccsöntés segítségével, melyek gyártási pontossága is jobban beállítható a száltartalomnak köszönhetően [17] [18].

Kutatásunk célja a 3D nyomtatással készült műanyag alkatrészek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata, a kapott eredmények alapján bővebb információt nyerni a technológia alkalmazásának lehetőségeiről és korlátairól a jelenleg legelterjedtebb műanyag gyártó eljárásokhoz képest. A kísérlet során fröccsöntött műanyag termékek vizsgálata a alkalmazott szabványos [12] próbatesteket készítettünk különböző 3D nyomtatási technológiákkal, különböző 3D nyomtatók segítségével [19], többféle, fröccsöntésben is alkalmazott alapanyagokból.

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: a 2. fejezet az alkalmazott anyagokat és módszereket írja le, ezt követően a 3. fejezetben ismertetjük a vizsgálataink

* főiskolai docens, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar Gépészeti Intézet

** egyetemi docens, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar Mérnöki Menedzsment és Ökonómiai Intézet

eredményeit és azok értékelését. A 4. fejezetben az összefoglalás található.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A próbatetek két csoportra tagolódnak. Az első csoport a nyomtatható alapanyagok és a két legáltalánosabb műanyag 3D nyomtatási technológia (FDM és SLS) segítségével létrehozott termék vizsgálatát célozza. A második csoport próbatetei segítségével a meghatározó nyomtatási paraméterek változtatásának az elkészült termékre gyakorolt hatását vizsgáljuk, ehhez nyomtatási mérősorokat hozunk létre. A nyert adatok segítséget nyújtanak a modellek nyomtatása való optimalizálására, illetve nyomtatással legyártandó alkatrészek modellezésére, tervezésére és méretezésére során.

2.1. A kutatásunk során felhasznált berendezések

Sindoh 3DWOX 200

FDM technológiájú 3D nyomtató. Zárt munkaterének, és fűthető munkaasztalának köszönhetően PLA és ABS anyagok nyomtatására alkalmas (1. ábra). Használható munkatere 200x200x185 mm, az elérhető legkisebb rétegvastagság 0,05 mm. Alapanyagként sztenderd 1,75 mm átmérőjű filamentet használ, melyet az egyedi, kazetta alapú betöltő rendszer automatikusan adagol. A fájljelőkészítéshez a Sindoh saját slicere a 3DWOX Desktop alkalmazható, de az elterjedt freewave slicer programok, mint a Cura, vagy a Simplfy3D is kiválóan használhatóak.



1. ábra Sindoh 3DWOXDP200 nyomtató (saját forrás)

Intamsys Funmat HT

A Funmat HT egy kínai gyártmányú, FDM technológiájú 3D nyomtató. Felszereltségét tekintve ipari nyomtatónak tekinthető (2. ábra). Munkatere 260x260x260 mm, elérhető rétegvastagsága 0.05 mm. Cserélhető extrúdere lehetővé teszi magas hőmérsékletű, 450°C-ig fűthető extrúder alkalmazását. Fűthető zárt, szigetelt munkatere 90°C-os kamrahőmérsékletet tesz lehetővé. Üveg munkalapja 150°C-ig fűthető. Üveg

munkalapot használ, mely megfelelő előkészítése széleskörű alapanyag választékot tesz lehetővé. Felszereltségének köszönhetően az egyszerűbb alapanyagoktól, mint az ABS, a PLA vagy a PETG, a műszaki műanyagokig, mint a PA, vagy a PC egyaránt alkalmas berendezés.



2. ábra Intamsys Funmat HT nyomtató (saját forrás)

Makerbot Replicator+

A Replicator+ szintén FDM technológiájú nyomtató (3. ábra). Kihasználható munkatere 252x199x150 mm, minimális rétegvastagsága 0,1 mm. Flexibilis munkaasztala a modell kiváló tapadását és könnyű eltávolítását teszi lehetővé. Nyílt munkatere miatt kizárólag PLA alapanyag használatára képes. A modell előkészítése kizárólag a gyártó saját slicer programjával, a Makerbot Print-el lehetséges.



3. ábra Makerbot Replicator+ nyomtató (saját forrás)

2.1.1 Vizsgálat során felhasznált alapanyag műszaki jellemzői

PLA:

A poli-tejsav, vagy PLA a legáltalánosabb FDM 3D nyomtatásban alkalmazott alapanyag. Kristályos szerkezetű, polikondenzációval előállított termoplasztikus polimer, monomerje $(C_3H_4O_2)_n$. Viszonylag alacsony, 180-205°C megfolyási hőmérsékletének és előnyös nyomtatási tulajdonságainak köszönheti széleskörű elterjedését. Jellemzően jól tapad a munkaasztalhoz, nem hajlamos a felhajlásra, deformációra. A PLA alapanyag kiválóan színezhető, töltőanyagokkal kiválóan keverhető. Ennek köszönhetően elérhető szinte bármilyen színben, és a legkülönbözőbb speciális tulajdonságokkal, mint például áttetszőség, vagy fluoreszcencia. Általános célzatú alapanyagként tekinthető, kiválóan alkalmazható legtöbb esetben bármilyen nyomtatott modell elkészítésére.

ABS:

Az akrilnitril-butadién-sztirol, vagy röviden ABS egy amorf termoplasztikus kopolimer. Szerkezetét hosszú polibutadién láncok alkotják, melyeket rövidebb akrilnitril-sztirol kopolimer keresztkötések kapcsolnak össze. Három alkotó monomerje alapján kémiai képlete $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$. Az ABS 190-210°C közti hőmérsékleten ömlik meg, így a legtöbb nyomtató probléma mentesen képes vele dolgozni. ABS használatakor a sikeres nyomtatás érdekében ajánlott zárt légterű nyomtató és szükséges a 60°C hőmérsékletű, fűtött munkaasztal. Ezzel kiküszöbölhető, hogy a modell a kihűlés során kialakuló belső feszültségek következtében leváljon a munkaasztalról és tönkretegy a nyomtatást.

PC:

A polikarbonát az általános rendeltetésű PLA-hoz és ABS-hez képest igen jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, magasabb szakító szilárdságának és kis szakadási nyúlásának köszönhetően műszaki felhasználásra is alkalmas. Hátránya, hogy sikeres nyomtatásához megfelelően felszerelt nyomtató szükséges, ugyanis 220-240°C nyomtatási hőmérséklete mellett a deformáció és felválás elkerülése érdekében szükséges a 160°C-ra fűtött munkaasztal és a zárt, 90°C hőmérsékletű légtér.

PA:

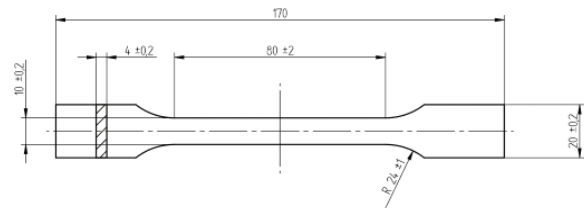
A poliamidok a műszaki polimerek, melyek monomerjei amid kötéssel kapcsolódnak egymáshoz. A polimerek molekulái lineáris polimerláncban karboxi-amidcsoportokat tartalmaznak, amelyek szabályos távolságban ismétlődnek. A poliamidoknak több változata is létezik, melyeket a monomerben a nitrogénatomok közt elhelyezkedő szénatomok száma különböztet meg egymástól [20]. A különböző variációkat a PA anyagjelzés utáni szám jelöli, vagyis a PA6 monomere 6 darab szénatomot tartalmaz, vagy a

PA6.6 esetén kétféle, 6 darab szénatomot tartalmazó monomer építi fel a polimert. Feldolgozásuk során adalékanyagokkal igen jól keverhetők, így kompozit anyagok gyártására rendkívül alkalmas, például gyakran alkalmaznak poliamid-üvegszál kompozitot, amely nagyban növeli az alapanyag mechanikai tulajdonságait [21][22].

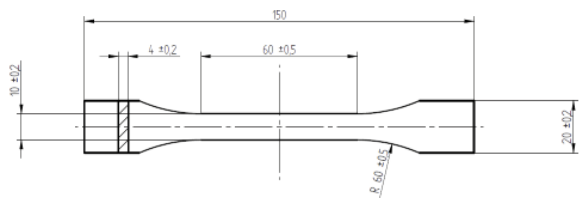
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Próbatetek kialakítása a vizsgálatokhoz

Az additív gyártó eljárásokat magába foglaló ISO/ASTM 52900 szabvány [23] jelenleg csupán az alapvető terminológiák meghatározását tartalmazza, főbb elemei az elkövetkező években kerülnek kiadásra. Ezért a műanyag szakító próbateteket a termék tekintetében legközelebb álló, illetve az eredmény összehasonlítását képző fröccsöntési technológiára hatályos, ISO 527 szabvány alapján készültek [12]. A próbatetek a szabványban foglalt ISO 527 type1A („piskóta” alak, hosszú kivitel; 4. ábra) és ISO 527 type1B („piskóta” alak, rövid kivitel; 5. ábra) próbatetek méreteit követik.



4. ábra ISO 527 type1A szakító próbatet (saját forrás)



5. ábra ISO 527 type1B szakító próbatet (saját forrás)

3.1.1. Próbatet mérősorok kialakítása a vizsgálatokhoz

A szakító próbatetes mérésekkel két féle mérőcsoportot hajtunk végre. Az első csoport a különféle alapanyagokkal készített próbateteket foglalja magába. Ezekből három különböző (x; y; z) elhelyezésben készítünk, minden orientációban 3-3 próbatetet. Ezek FDM nyomtatás esetén 100% anyagkitöltéssel, 0,15 mm rétegvastagsággal és 0,8 mm

héjvastagsággal készülnek. Az SLS mintákat általános, 0,125 mm rétegvastagsággal nyomtatuk. A 15 darab minta (5-5 mindhárom orientációban) EOS 396 nyomtatón készültek PA2200 alapanyagból, amely az EOS általános műanyag SLS nyomtató alapanyaga, tulajdonképpen egy a dalékolt PA12 keverék. A második csoportban az alapvető nyomtatási paraméterek változtatásának hatását vizsgáljuk a nyomtatott munkadarabra. Ehhez egyszerű kezelhetősége miatt minden próbatétel esetében PLA alapanyagot használunk. A vizsgált paraméterek a következők: Kitöltési hányad, Rétegvastagság, Héjvastagság. Rögzített nyomtatási paraméterek mellett egy-egy paraméter változtatásával állítottunk fel mérési sorokat. A nyomtatási paramétereket az 1. 2. és 3. táblázat rögzíti (saját forrás). Ezen próbatételek ugyanazon Sinterit 3DWOX DP200 nyomtatóval készülnek, egyidejűleg egy nyomtatásban három darab próbatétellel (1.,2.,3. táblázat).

1. táblázat Változó kitöltésű próbatétel sor

Infill (%)	Rétegvastagság	Héjvastagság
5	0,15(mm)	0,8(mm)
10	0,15(mm)	0,8(mm)
15	0,15(mm)	0,8(mm)
20	0,15(mm)	0,8(mm)
25	0,15(mm)	0,8(mm)
35	0,15(mm)	0,8(mm)
50	0,15(mm)	0,8(mm)
60	0,15(mm)	0,8(mm)
80	0,15(mm)	0,8(mm)
100	0,15(mm)	0,8(mm)

2. táblázat Változó rétegvastagságú próbatétel sor

Infill (%)	Rétegvastagság	Héjvastagság
20	0,05(mm)	0,8(mm)
20	0,1(mm)	0,8(mm)
20	0,15(mm)	0,8(mm)
20	0,20(mm)	0,8(mm)
20	0,25(mm)	0,8(mm)
20	0,30(mm)	0,8(mm)
20	0,35(mm)	0,8(mm)

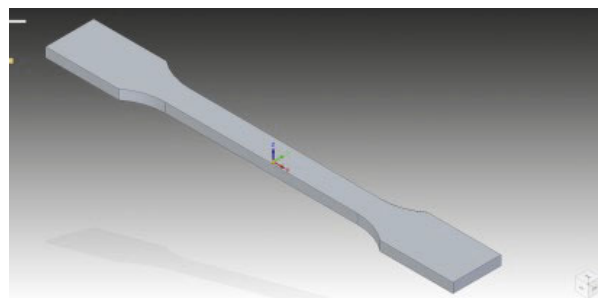
3. táblázat Változó héjvastagságú próbatétel sor

Infill (%)	Rétegvastagság	Héjvastagság
20	0,15 (mm)	0,4 (mm)
20	0,15 (mm)	0,8 (mm)
20	0,15 (mm)	0,12 (mm)
20	0,15 (mm)	0,16 (mm)
20	0,15 (mm)	0,20 (mm)

3.1.2. Nyomtatási folyamatok kialakítása a vizsgálatokhoz

A nyomtatási folyamat első lépéseként a próbatételek 3D modelljeit Solid Edge ST10 tervezőprogrammal

készítettük el. Mivel a tervező programok natív fájlformátumai a nyomtatási műveletekhez a legtöbb nyomtató esetében nem alkalmasak, ezért a modelleket STL (Standard Triangle Language) formátumba konvertáltuk (6. ábra). Az STL formátum az additív gyártási eljárások általánosan alkalmazott formátuma, amely a modell felületének koordinátapontjait tartalmazza konvertálástól függő sűrűségben, valamint a pontok által alkotott háromszögfelületek normálvektorait. A formátum a pontsűrűségtől függően adatvesztéssel, a felület kismértékű torzulásával jár, ám megfelelő pontsűrűségű fordítás esetén ez elhanyagolható.



6. ábra ISO 527 próbatétel modellje (saját forrás)

A kész próbatételek az egyszerű beazonosítás érdekében egyedi elnevezéseket kaptak. Az alapanyag próbatételek esetében ennek első tagja a nyomtató neve, második tagja az alkalmazott alapanyag, harmadik tagja pedig a nyomtatási orientáció, pl. 200 PLA X, vagyis a próbatétel a Sinterit DP200 nyomtatón készült, PLA alapanyagból és X irányú orientációval.

Paraméter mérősor próbatételeinek elnevezései:

PLA05%, PLA10%... PLA100% a kitöltési hányad mérősorának próbatételei paraméterértékkel.

Layer005, layer 010... layer 035 a rétegvastagság paramétersora megfelelő rétegvastagsággal jelölve.

Shell1, Shell2... Shell5 a héjvastagság próbatételei a megfelelő rétegszámmal jelölve (egy réteg 0,4mm).

Alapanyag mérések próbatételei:

Makerbot nyomtatón PLA alapanyagból X, Y és Z orientációval 3-3 próbatétel.

Sinterit DP200 nyomtatón PLA és ABS anyagból X és Y orientációval 3-3 próbatétel.

Funmat HT nyomtatón PC alapanyagból X és Y orientációval, PA6.6 alapanyagból X orientációban 3-3 próbatétel.

Sinterit LISA nyomtatón PA12 porból 3 darab 30°-ban elhelyezett próbatétel.

Az EOS nyomtatón készült poliamid alapanyagú X, Y és Z orientációjú próbatételek, 5-5 darab.

Paraméter mérősor próbatételei:

A változó kitöltöttségű mérősor minden próbatételéből 3-3 darab, összesen 30 darab próbatétel.

A változó rétegvastagságú mérősor minden próbatételéből 3-3 darab, összesen 21 darab próbatétel.

A változó héjvastagságú mérősor minden próbatestéből 3-3 darab, összesen 15 darab próbatest.

3.2. Alkalmazott berendezések és műszerek és vizsgálatok

Galdabini Quasar 100

A Galdabini Quasar 100 mechanikai anyagvizsgáló gép (7. ábra) a többféle igénybevételnek alávetett próbatestek mechanikai jellemzőinek meghatározására használható. Az általa használt berendezés asztali telepítésű, egyoszlopos gép, melynek terhelési tartománya 2,5kN-tól 100kN-ig terjed és roncsolásos statikus anyagvizsgálat végezhető el vele. A vizsgálatokat a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar anyagvizsgálatai laborjában végeztük el.



7. ábra Galdabini Quasar 100 szakító gép (saját forrás)

A mérés során állandó, 5mm/sec keresztfej mozgást alkalmaztunk, mely a próbatest tönkremeneteléig zajlott. A szoftver a mérés során rögzíti a berendezés által kifejtett terhelés értékét a keresztfej elmozdulásával szemben. A mérést követően a mérési eredményeket Excel formátumú jegyzőkönyvekbe exportáltuk, melyek tartalmazzák a próbatest megadott méretadatait, a maximális kifejtett erőt, a szoftver által számított szakító szilárdságot, valamint a Terhelés (N) / Keresztfej löket (mm) diagramot. Az alapanyag mérősorok eredményeként kapott grafikonok segítségével információ kapható az egyes alapanyagok 3D nyomtatási technológiával készült mechanikai tulajdonságairól. A mérések segítségével számíthatók a mechanikai jellemzők, mint a szakító szilárdság, a szakadási nyúlás, a Young-modulus, illetve a grafikon alakja is információval szolgál a tönkremenetel lefutásáról. A szakító szilárdság értéke a mérőszoftver által kiszámított érték, míg szakadási nyúlás a Terhelés / Keresztfej löket diagramról leolvasható, ám figyelembe kell venni, hogy az esetleges nem tökéletes próbatest befogás miatt a

húzóerő nem azonnal épül fel, így a grafikon az X tengelyen némileg eltolódhat. A Young-modulus olyan anyagjellemző, amely egy anyag rugalmasságát adja meg. Fémek esetében ez a szakító diagram rugalmas szakaszának elemzésével határozható meg. Polimerek esetén ez a módszer nem teljesen pontos, de jó közelítést ad. Ennek oka az, hogy a polimereket alkotó hosszú láncú molekulák a feszültség hatására részlegesen rendeződnek, így a polimerek plasztikus és elasztikus viselkedést mutatnak. A polimerek elasztó-plasztikus viselkedésének feltárására a legalkalmasabb módszer a DMA, vagyis dinamikus mechanikai analízis, amely megadja az anyag veszteségi és tárolási modulusát a hőmérséklet viszonylatában, amelyek segítségével többek között az alapanyag különböző átalakulási tulajdonságára lehet következtetni. Jelen esetben a szakító diagram kezdeti szakasza szolgál a legtöbb információval. A rugalmassági modulus az anyag megnyúlásához szükséges feszültség arányaként a dódik.

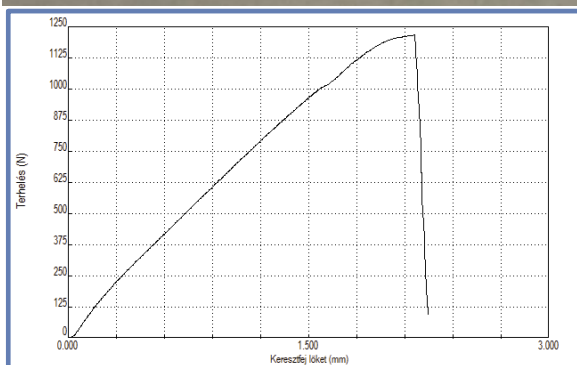
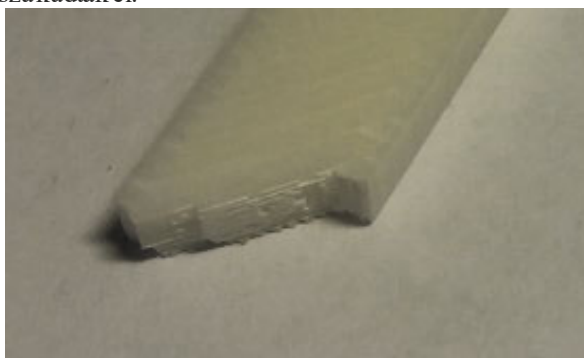
A 4. táblázatban az alapanyag mérések eredményeinek kiértékelése alapján kapott adatokat összesítettük.

4. táblázat Alapanyag vizsgálati próbatestek mérési eredményeinek összesítő táblázata

	Szakító szilárdság [MPa]		Szakadási nyúlás [mm]		Young-modulus [GPa]	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
Rep PLA X	31,97	+/- 2,21	3,13	+/- 0,50	1,211	+/- 0,086
Rep PLA Y	30,03	+/- 3,45	2,20	+/- 0,44	1,213	+/- 0,075
Rep PLA Z	33,61	+/- 2,15	2,40	+/- 0,26	1,357	+/- 0,050
200 PLA X	35,71	+/- 2,36	3,50	+/- 0,50	1,029	+/- 0,101
200 PLA Y	28,59	+/- 0,94	6,07	+/- 0,67	1,040	+/- 0,049
200 PLA Z	-	-	-	-	-	-
200 ABS X	33,17	+/- 0,38	5,93	+/- 0,89	0,743	+/- 0,018
200 ABS Y	31,32	+/- 3,77	4,90	+/- 0,55	0,812	+/- 0,024
200 ABS Z	-	-	-	-	-	-
fun PC X	43,84	+/- 2,46	4,70	+/- 0,17	1,095	+/- 0,010
fun PC Y	43,27	+/- 1,46	4,70	+/- 0,17	1,180	+/- 0,031
fun PC Z	-	-	-	-	-	-
fun PA6.6 X	37,36	+/- 4,40	261,33	+/- 18,04	0,282	+/- 0,007
fun PA6.6 Y	-	-	-	-	-	-
fun PA6.6 Z	-	-	-	-	-	-
lisa xy 30	18,03	+/- 2,05	3,91	+/- 0,93	0,334	+/- 0,002
eos x	38,49	+/- 1,19	27,80	+/- 4,31	1,111	+/- 0,006
eos y	37,14	+/- 1,69	25,60	+/- 2,19	1,132	+/- 0,037
eos z	36,20	+/- 1,28	12,70	+/- 3,83	1,026	+/- 0,007

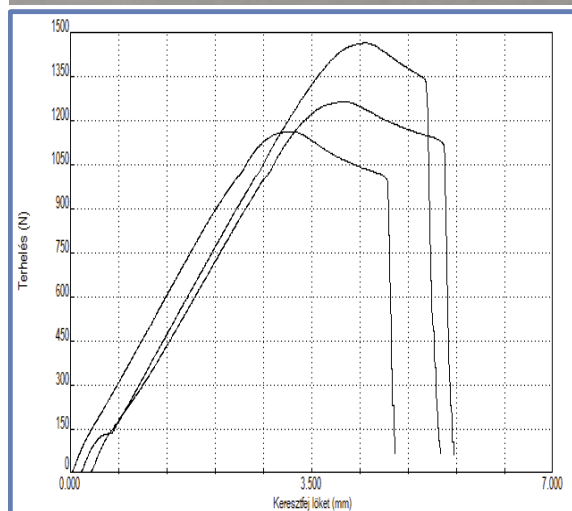
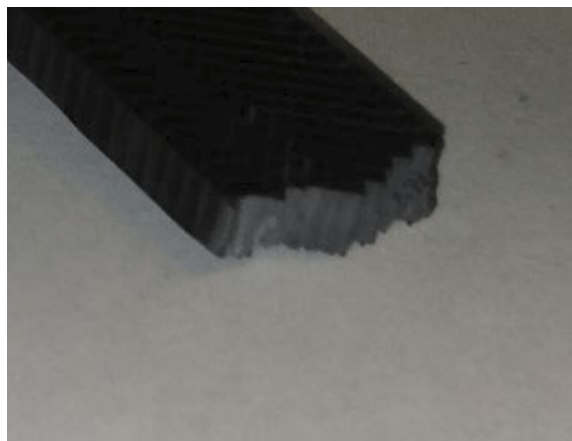
A PLA alapanyagok méréseinek kiértékelésére az összesítő táblázat (4. táblázat) adatait, a próbatestek mérései alapján az alapanyag 3D nyomtatott formájában 30-35 MPa szakítószilárdsággal rendelkeznek. A PLA fröccsöntött formájának átlagos szakító szilárdsága 47 MPa. Az érték 30% esésének nyilvánvaló oka a nyomtatott test inhomogenitásában keresendő. A szálakból álló szerkezet miatt bizonyos anyagszálak hamarabb szakadnak el a feszültség hatására, ezzel göcpontot képezve a próbatest tönkremenetelének. A

mért értékek igen erős eltéréseket mutatnak. Ennek egyik oka a két alkalmazott alapanyag (Makerbot filament; Sindoh filament) összetételének eltérése, másrészt a szakítóvizsgálati grafikonok vizsgálatával két szakadási típus lezajlása figyelhető meg (8. ábra). Az első esetben a próbatest szakítószilárdságát elérve a test teljes keresztmetszetében, pillanatszerűen eltörik, míg a második esetben a szakítószilárdság elérésével egy részleges tönkremenetel megy végbe, ám a anyagszálak egy része csak a további húzás hatására szakadnak el. Ezen esetben a szakadási nyúlás értéke lényegesen nagyobb. A szakadás során az összes próbatest esetében megfigyelhető, hogy a kitöltés keresztirányú szárainak mentén terjedt a repedés. Míg egyik irányból a szálak teljes mértékben a rétegek közt váltak el, addig a rá merőleges irány szálai egyenesen, szinte vágás szerűen szakadtak el.



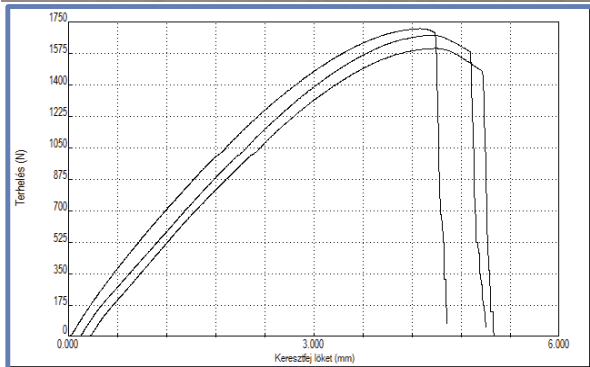
8. ábra PLA próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

Az ABS minták adatait az összesítő táblázat (4. táblázat) ABS anyagra vonatkozó sorai, az eredmények alapján az 3D nyomtatott ABS szakító szilárdsága 30-33MPa, vagyis a PLA-val közel megegyező szilárdságú alapanyag. A tömör, fröccsöntött ABS 45MPa szakítószilárdságához képest ezen esetben is tapasztalható a szálak struktúrából következő 25%-os csökkenés. Az ABS törése a mérések minden esetében a PLA-nál megfigyelhető, elnyújtott módon zajlott. (9. ábra), töreti képén azonban a törés iránya többször irányt vált, a törésvonal nem folytonos.



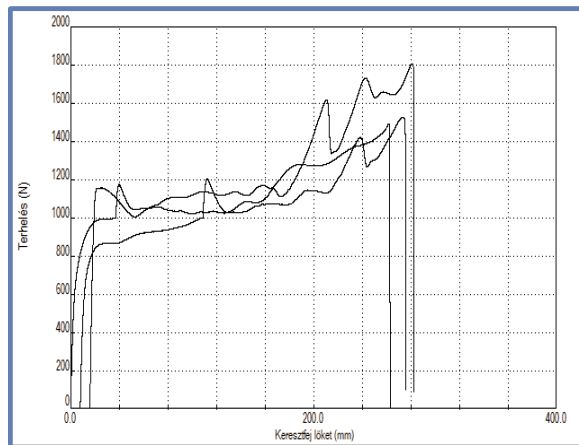
9. ábra ABS próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

A PC alapanyag méréseinek összesített eredményeit az összesítő táblázat (4. táblázat) fun_PC_X és fun_PC_Y sorai, a mérési eredmények alapján a nyomtatott PC alapanyag szakítószilárdsága 43-44 MPa, vagyis a technológiából a dódó 33%-os esés ebben az esetben is tapasztalható. A vizsgálati görbék alapján (10. ábra) a törés a szakítószilárdság elérését követően rövid lefutással, hirtelen megtörténik. A próbatest tönkremenetele során a héjban és a kitöltésben nem egyenletesen fellépő feszültség hatására a próbadarab a két zóna határán hosszanti irányban felhasadt. A törés vonala fogazott, többszörösen irányt vált, de folyamatosan a kitöltés 45°-os iránya mentén halad.



10. ábra PC próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

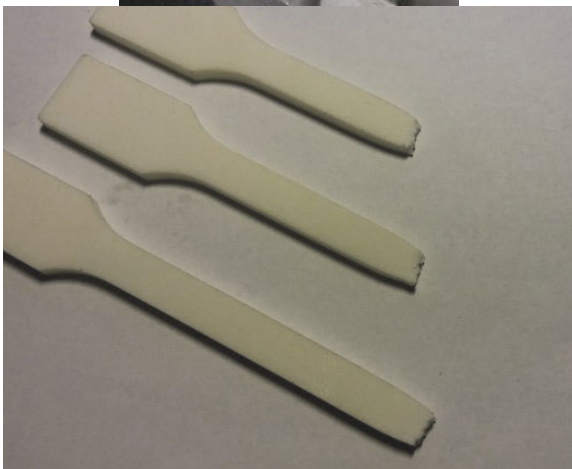
A poliamid 6.6 próbatestes mérésének eredményét az összesítő táblázat (4. táblázat) fun_pa6.6_X sora, A vizsgálat során az anyag rendkívüli mértékű megnyúlást mutatott. Egy kezdeti, rugalmasnak tekinthető alakváltozású szakaszt követően a próbatesten megjelent a törésre utaló elvékonyodás, befűződés. Azonban a törés nem következett be, ellenben a keskeny szakasz a próbatest hosszában növekedni kezdett, végül a teljes próbatest elvékonyodott. A próbatesten megfigyelhető, ahogy a keresztirányú anyagszálak szinte teljes mértékben kiegyenesedtek. A folyamat során a szakító görbe folyamatosan növekedése figyelhető meg, melyen véletlenszerű feszültségcsúcsok helyezkednek el, melyek a belső szerkezet fokozatos átalakulására, elmozdulására, illetve a nagyobb terhelésnek kitett szálakban a polimer láncok megnyúlhatnak és orientálódnak, amely az anyag felkeményedését okozza. A mérés végére a próbatest teljes hosszában végbement a láncok hosszirányú orientálódása, az anyag a kezdeti enyhe sárgás, vajszerű megjelenéséhez képest lényegesen kivilágosodott. Ezt a grafikonon a szakadást megelőző utolsó feszültségcsúcs jelzi. A próbatesten mért szakító szilárdság érték 37 MPa, azonban a próbatest deformációja már 25-28 MPa feszültség hatására megkezdődött.



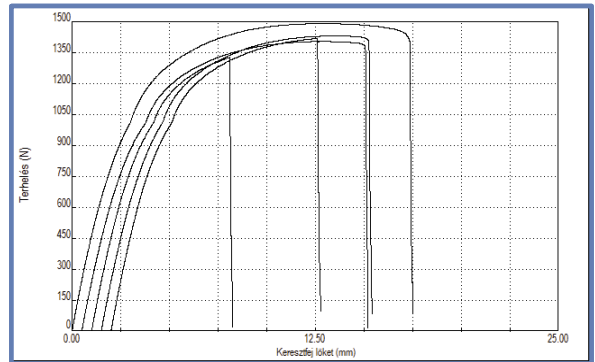
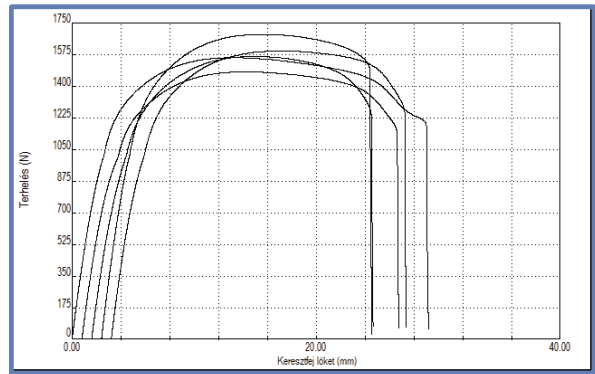
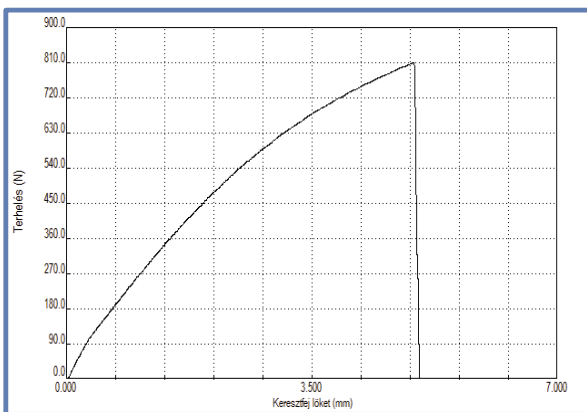
11. ábra PA6.6 próbatest törete, szakító diagramja (saját forrás)

A PA12 poliamid por alapanyagokkal végzett mérések eredményeit az összesítő táblázat (4. táblázat). A Sinterit LISA nyomtatóval készült próbatestek szakító szilárdsága mindössze 18 MPa, míg az EOS nyomtatón készültéké 35-37 MPa. A kettő közötti nagymértékű eltérésnek több oka is lehet, többek között az alapanyag összetétele, az alapanyag szemcsemérete, a szinterezéshez alkalmazott lézerteljesítmény, az anyag hőmérséklete szinterezés közben, a réteg vastagság, a nyomtatás során alkalmazott gázatmoszféra.





12. ábra Eltört Sinterit PA12 és EOS PA12 próbatest és törete (saját forrás)



13. ábra Sinterit PA12, EOS PA12 (X, Y, Z orientáció) szakító diagramja

3.3. Paraméter mérések eredményei

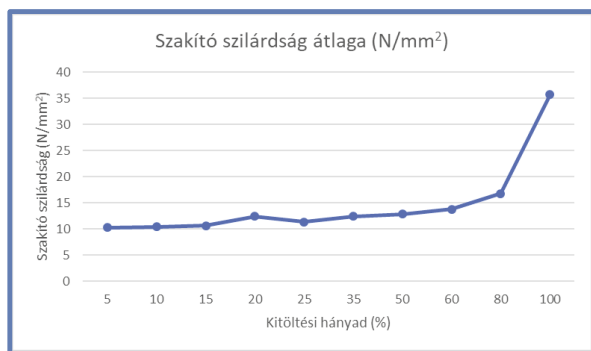
A gyártási paraméter befolyásoló hatásának vizsgálata a legcélszerűbb, összehasonlításra alkalmas mérőszám a szakítószilárdság. Mivel minden próbatest esetében ugyanazon nyomtatót és ugyanazon gyártó PLA a anyagát használtuk a gépi, vagy anyagtulajdonságbeli fő zavaró hatásokat kizártuk a mérésekből.

3.3.1 Kitöltési mérések eredményei

A kitöltési mérősor szakító szilárdság adatait az 5. táblázat és 14. ábrán látható grafikonon összesíti. Az anyag kitöltési hányad változása a mért adatok alapján 80%-os kitöltöttség alatt minimális mértékben befolyásolja a test szakítószilárdságát. A kitöltési hányad növelése ugyan kis mértékben növelte a szakítószilárdságot, ám az eredmények alapján jól látható, hogy nem az infill régió az elsődleges teherviselő szerkezeti elem.

5. táblázat Kitöltési hányad mérősor mérési eredményeinek összesítése

Kitöltési hányad (%)	Szakító szilárdság átlaga (N/mm ²)	Szórás
5	10,29	± 0,13
10	10,48	± 0,15
15	10,68	± 0,53
20	12,44	± 1,73
25	11,40	± 0,87
35	12,47	± 1,08
50	12,86	± 0,61
60	13,81	± 0,91
80	16,82	± 1,48
100	35,70	± 2,36



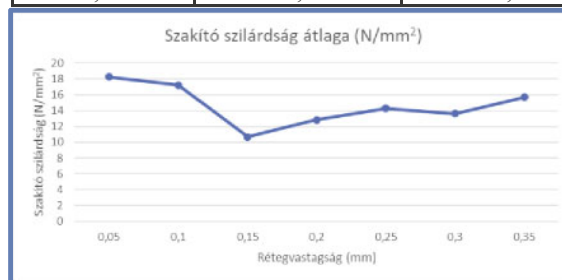
14. ábra Szakítószilárdság változása a kitöltési hányad függvényében

3.3.2 Rétegvastagság mérések eredményei

A rétegvastagság mérősor szakító szilárdság adatait a 6. táblázat és 15. ábra szemlélteti. A rétegek vastagságának mérése során, érdekes módon az eredmények nem mutatnak különösebb törvényszerűséget vagy trendet a rétegvastagság és a szakító szilárdság között. Ennek oka lehet, hogy a rétegek a terhelés irányára párhuzamosak, ám sajnos a Z irányú, vagyis „álló” próbatetek nyomtatása nem volt sikeres. Amennyiben a terhelés irányára merőleges rétegfelépítésű próbatetek sikeresen elkészülnek, a mérés információval szolgálhatna a rétegvastagság és a rétegek a dhéziójának viszonyáról.

6. táblázat Rétegvastagság mérősor mérési eredményeinek összesítése

Rétegvastagság (mm)	Szakító szilárdság átlaga (N/mm ²)	Szórás
0,05	18,28	± 1,20
0,1	17,22	± 0,97
0,15	10,68	± 0,53
0,2	12,84	± 0,65
0,25	14,29	± 0,43
0,3	13,6	± 0,56
0,35	15,68	± 0,27



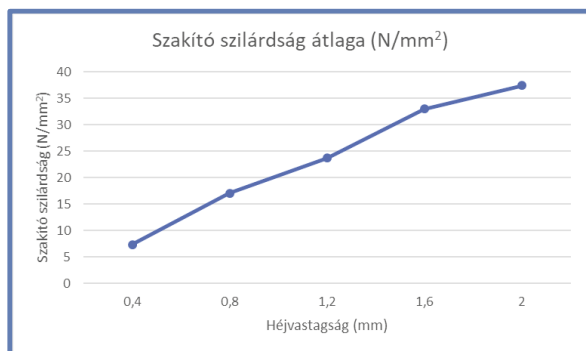
15. ábra Szakítószilárdság változása a rétegvastagság függvényében

3.3.3 Héjvastagság mérések eredményei

A héjvastagság mérősor szakító szilárdság adatait a 7. táblázat és 16. ábra szemlélteti. A mért értékek alapján a héjvastagság változtatása okoz tényleges változást a nyomtatott test szilárdságára. A héj vastagságának növelésével a test szakítószilárdsága egyenes arányban növekedik. Ennek oka a nyomtatott test felépítésében keresendő. A test terhelt keresztmetszetében húzási irányra párhuzamos, a shell-t felépítő szálak, illetve az infill átlósan elhelyezkedő száalai találhatóak. A shell növelésével a keresztmetszet felülete is nagyban növekedik. Az utolsó, 2mm falvastagságú próbadarabok esetében ez a 100%-os kitöltöttségű próbatestet eredményez, amely csupán nyomtatási irányait tekintve tér el a 100% kitöltöttségű próbatesttől, valamint annak mért értékétől való eltérése a mérések szórásán belül esik.

7. táblázat Héjvastagság mérősor mérési eredményei

Héjvastagság (mm)	Szakító szilárdság átlaga (N/mm ²)	Szórás
0,4	7,38	± 0,25
0,8	17,10	± 0,65
1,2	23,75	± 1,01
1,6	33,04	± 0,68
2	37,45	± 2,63



16. ábra Szakítószilárdság változása a rétegvastagság függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerkezeti anyagok választékában a polimerek és kompozitjaik alkalmazása, azok kiváló mechanikai, fizikai és kémiai tulajdonságai miatt, igen elterjedt. A kis sűrűség és az ahhoz tartozó viszonylag nagy szilárdság, a csillapító és szigetelőképeség, a vegyszer és korrózióállóság, a tervezhető anizotrópia stb. napjaink legnépszerűbb anyagává tették a szintetikus polimereket. Alkalmazásukkal nemcsak energiát takaríthatunk meg, hanem a fenntartható fejlődés zálog is ez az anyagcsalád. A mai polimertechnikai kutatások arra irányulnak, hogy olyan anyagokat fejlesszünk, amelyek környezetbarátabbak, csökkentik az energia felhasználást, könnyebbé és komfortosabbá teszik a hétköznapi életünket.

Munkánk során 3D nyomtatással készült műanyag alkatrészek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatát végeztük el, amellyel szerettünk volna bővebb információt kapni a technológia alkalmazásának lehetőségeiről és korlátairól. Első lépésként fröccsöntött műanyag termékek vizsgálatára alkalmazott szabványos próbatesteket készítünk különböző 3D nyomtatási technológiákkal, különböző 3D nyomtatók segítségével, többféle, fröccsöntésben is alkalmazott alapanyagokból. A próbatestekkel két eredménycsoportot kívántunk elérni. Elsőként az FDM és SLS technológiák alapanyagainak mechanikai tulajdonságát vizsgáltuk. A másik eredménycsoport az FDM nyomtatással készült alkatrészek gyártási paramétereinek hatását hivatott feltárni. Ehhez a fő gyártási paraméterek (kitöltési hányad, rétegvastagság, héjvastagság) változtatásával mérősorozatokat hoztunk létre. A mérések során az összes FDM nyomtatással készült alanyag esetében megfigyelhető volt a szakító szilárdság értékének 25-35%-os esése a fröccsöntött alanyag szilárdságához képest. Ez beláthatóan az FDM technológia anyagszálakból történő modellfelépítésének következménye. Az elkészült testek szerkezeti inhomogének, ami a próbatestek törésein megjelenő

száírányú repedési orientációkon is jól megfigyelhető. Az SLS próbatestek esetében az alapanyag fröccsöntött formájának szilárdságához képest a próbatestek lényegesen gyengébbek voltak. A paraméterek változtatásának hatását a második próbatest csoport vizsgálta. Ezek eredményei alapján meglepő eredményt hozott, hogy a test kitöltési hányada szinte alig befolyásolja az alkatrész szilárdságát, illetve a három vizsgált paramétercsoport közül egyedül a héjvastagság növekedése segíti elő a szakító szilárdság növekedését. Az eredmények fényében elmondható, hogy a nyomtatott alkatrészek esetében a testet érő terhelés eloszlása nem egyenletes, az elsődleges terhelő elem a héjszerkezet, míg a kitöltés csupán másodlagos terhelőként van jelen. A kapott eredmények alapján a vizsgált 3D nyomtatási technológiák jelenleg nem képesek a fröccsöntéssel megegyező szilárdságú termék előállítására, olyan technológiai sajátosságok, mint a tervezett alkatrész nagyfokú formaszabadsága egyéb alkalmazási lehetőségeket nyit meg.

Ennek megfelelően a jövőben is folytatjuk az elkezdett munkát, amely az eddigi kutatási eredményeink gyakorlati alkalmazási lehetőségeit lesz hivatott feltárni.

5. IRODALOM

- [1] NAIJU C.D., ADITHAN M., RADHAKRISHNAN P.: *Investigation on Surface Roughness and Dimensional Accuracy of Direct Metal Laser Sintered (DMLS) Tooling Inserts for Injection Molding*, Proceedings of the International Conference on Design and Advances in Mechanical Engineering (ICDAAME 2011), SKP Engineering College, Tiruvannamalai, TN., India. 16-17 December, (2011), pp. 239-244.
- [2] SWOLFS Y., GORBATIKH L., VERPOEST I.: Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 67, (2014), pp. 181–200, doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.08.027
- [3] FRIEDRICH K., FAKIROV S., ZHANG Z.: *Polymer Composites*, Springer US, Boston, 2005
- [4] CZVIKOVSKY T., NAGY P., GAÁL J.: *A polimertechnika alapjai*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2006
- [5] DEOPURA B. L., ALAGIRUSAMY R., JOSHI M., GUPTA B.: *Polyesters and polyamides*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2008, eBook ISBN: 9781845694609
- [6] JANCAR J., DOUGLAS J. F., STARR F. W., KUMAR S. K., CASSAGNAU P., LESSER A. J., STERNSTEIN S. S., BUEHLER M. J.: Current issues in research on structure-property relationships in polymer nanocomposites, *Polymer*, Vol. 51, No. 15, (2010), pp. 3321–3343, doi.org/10.1016/j.polymer.2010.04.074

- [7] TREWIN E.: *The advanced composites industry - Global markets, technology trends and applications*, Materials Technology Publications, Watford, UK, 2003
- [8] BAEK GY. J., SHING Y., LEE K. Y., SHIM D. S.: Mechanical Properties of Tool Steels with High Wear Resistance via Directed Energy Deposition, *Metals*, Vol. 9, No. 3, (2019), doi:10.3390/met9030282 2019
- [9] ROSATO D. V., ROSATOT D. V.: *Reinforced Plastics Handbook*: Third edition, Elsevier, Oxford, 2004, ISBN 1 8561 74506
- [10] GEBHART A., HÖTTER J. S.: *Additive Manufacturing, 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*, Hanser Publications, Munich, 2016
- [11] RAFIEE M. A., RAFIEE J., WANG Z., SONG H., YU Z. Z., KORATKAR N.: Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content, *ACS Nano*, Vol. 3, No. 12, (2009), pp. 3884–3890, doi.org/10.1021/mn9010472
- [12] ISO 527-1:2019 ISO 527-1:2019 Plastics — Determination of tensile properties
- [13] HASSAN A., SALLEH N. M., YAHYA R., SHEIKH M. R. K.: Fiber length, thermal, mechanical, and dynamic mechanical properties of injection-molded glassfiber/polyamide 6,6: plasticization effect, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 6, (2011), pp.488–498, doi:10.1177/0731684410397898
- [14] BERÉNYI L., SOLTÉSZ L.: Evaluation of Product Development Success: A Student Perspective, *Administrative Sciences*, Vol. 12, No. 2. (2022), pp. doi.org/10.3390/admsci12020049
- [15] SOLTÉSZ L., BERÉNYI L., KAMONDI L.: Termékfejlesztési folyamatok fejlődési irányai, *Munkatársi Tudományos Közlemények: A Miskolci Egyetem Közleménye*, Vol. 11, No. 4, (2021), pp. 3–14, doi.org/10.35925/j.multi.2021.4.1
- [16] FORSDYKE K. L., STARR T. F.: *Thermoset resins-Market Report*, Rapra Technology Limited Shawbury, Shropshire, 2002, ISBN 1-85957-355-X
- [17] FU S., LAUKE B.: Effects of fiber length and fiber orientation distribution on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers, *Composites Science and Technology*, Vol. 56, No. 10, (1996), pp. 1179–1190, doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00072-3
- [18] MASUBUCHI Y., TERADAM., YAMANAKA A., YAMAMOTO T., ISHIKAWA T.: Distribution function of fiber length in thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, Vol. 134, (2016), pp. 43–48, doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.08.007
- [19] REDWOOD B., SCHÖFFER F., GARRET B.: *The 3D printing Handbook*, 3D Hubs, Amsterdam, 2017
- [20] BUNSELL A. R., HARRIS B.: Hybrid carbon and glass fibre composites. *Composites*, Vol. 5, No. 4, (1974), pp. 157–164, doi.org/10.1016/0010-4361(74)90107-4
- [21] MOUHMI B., IMAD A., BENSEDDIQ N., BENMEDAKHÈNE S., MAAZOUZ A.: A study of the mechanical behaviour of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: Experimental investigation. *Polymer Testing*, Vol. 25, No. 4, (2006) pp. 544–552, doi.org/10.1016/j.polymeresting.2006.03.008
- [22] WU S.-H., WANG F.-Y., MA C.-C. M., CHANG W.-C., KUO C.-T., KUAN H.-C., CHEN W.J.: Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6/clay nanocomposites. *Materials Letters*, Vol. 49, No. 6, (2001), pp. 327–333, doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00394-3
- [23] ISO/ASTM52900-2015 Additive manufacturing – General principles