

"

ÓBUDAI EGYETEM

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyag- és Gyártástudományi Intézet

SZAKDOLGOZAT

OE-BGK
2022.

János Ábel
T009443/FI12904/B



ÓBUDAI EGYETEM

**Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyag- és Gyártástudományi Intézet**

CAD tervezés 3D nyomtatáshoz

**OE-BGK
2022.**

Hallgató neve:
Hallgató törzskönyvi száma:

János Ábel
T009443/FI12904/B



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat/diplomamunka saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban/diplomamunkában található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2022.12.15

.....
hallgató aláírása



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyag- és Gyártástudományi Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: János Ábel

Szakdolgozat száma: SZD22052513069899

Törzskönyvi száma: T009443/FI12904/B

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: gépészmérnöki

Specializáció: gépészmérnöki - CAD-CAM-CNC

A dolgozat címe: CAD tervezés 3D nyomtatáshoz

A dolgozat címe angolul: CAD design for 3D printing

A feladat részletezése:

1. Mutassa be a 3d nyomtatás technológiáit, az alkalmazható anyagokat és az alkalmazási területeit!

2. Mutasson be az alkatrész gyártáshelyes kialakításának szempontjait és eszközeit!

3. tervezzen tesztalkatrészt a konstrukciós kialakítások vizsgálatára!

4. Tesztelje a megoldásokat, mérésekkel bizonyítsa hatásukat!

Intézményi konzulens neve: Ráczai Viktor Gergely

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 05. 15.

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2022. 10. 21.




Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom!

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés	6
1.1	Célkitűzés	8
2.	A 3D nyomtatás	9
2.1	3D nyomtatás technológiái	9
2.2	A 3D nyomtatásban használt anyagok	15
2.3	3D nyomtatott anyagok mechanikai tulajdonságai.....	19
2.3.1	FDM nyomtatás mechanikai tulajdonságai.....	19
3.	CAD tervezés 3D nyomtatáshoz.....	22
3.1	Mintadarabok tervezése	24
3.2	Mintadarabok nyomtatása	25
3.3	Mintadarabok kiértékelése	26
3.2.1	Furat mintadarabok kiértékelése.....	28
3.3.1	Négyszetes furat mintadarabok kiértékelése.....	34
4.	Koncentrált kitöltés bemutatása.....	38
5.	Összefoglalás	40
6.	Summary.....	42
7.	felhasznált irodalom.....	44

1. BEVEZETÉS

A 3D-nyomtatás egy olyan additív gyártási eljárás, amely közvetlenül a CAD-modellből, rétegről rétegre történő anyagadagolással hozza létre az alkatrészeket. A kereskedelemben különböző technológiák állnak rendelkezésre, amelyek közül a Fused Deposition Modeling (FDM) a legolcsóbb és a legelterjedtebb a piacon. A 3D nyomtatók ipara az utóbbi években gyorsan növekszik, és egyre több 3D nyomtató felhasználó van a világon. A 3D nyomtatásnak számos alkalmazási területe létezik, beleértve a gyors gyártást és prototípusgyártást, a terméktervezést, az orvostudományt, az oktatást, az építészetet és a művészetet.

Közel 25 évnyi kutatás után az additív gyártástechnológiák még mindig kezdetleges szakaszban vannak, és még mindig akadnak nehézségek és korlátok ezzel a technológiával. Az additív gyártástechnológia fő hátrányai abból fakadnak, hogy a fűvóka hőmérséklet-ingadozása a nyomtatási munka során nagy felületi érdességhez és deformációhoz vezethet, különösen más hagyományos gyártási technológiákkal összehasonlítva. Így, ahogy a gyors prototípusgyártás a folyamatok gyorsítása felé halad, egyre nagyobb igény mutatkozik a nyomtatott részek kiváló minőségű felületi érdességére és méretpontosságára, mivel ez jobban befolyásolja azt, hogy a vásárlók hogyan ítélik meg a végtermék minőségét. Éppen ezért ezen a területen szükséges annyira ismerni a technológiát, hogy az additív gyártási rendszerekkel történő alkatrészgyártás előkészítését és folyamatát úgy lehessen befolyásolni, hogy a végső alkatrész kívánt pontossága biztosítható legyen a megfelelő felületi minőség mellett is. A gépészeti gyakorlatban a gyártott alkatrészek méretpontosságát kell figyelembe venni, ami a leggyakoribb, de számolni kell az alak- és helytűrésekkel is.

A gyártók olyan információkat szolgáltatnak a nyomtatóikról, mint a minimális rétegvastagság, az abszolút pontosság, a nyomtatóágy mérete és egyéb műszaki paraméterek. Ez azonban nem feltétlenül vonatkozik minden, különböző geometriájú nyomtatott alkatrészre.

A legtöbb nyomtatónak vannak ajánlott beállításai, amelyeket a szeletelőprogramok profilján keresztül biztosítanak. A profilok csak a felhasznált anyagtól és a nyomtató típusától függenek, és rendelkeznek a nyomtatott geometria típusáról és tulajdonságairól.

A geometriai termékleírások (tűrések) nagyon fontos részét képezik a terméktervezésnek. A 3D nyomtatott alkatrészeknek is vannak különböző geometriai követelményeik, és a 3D nyomtatott alkatrészek geometriai pontosságát számos tanulmány vizsgálta. A nyomtatási pontatlanságokat utófeldolgozással oldják meg. A felület véglegesítésére alkalmazott technológia a gőzsimítás, de a méretpontosság rovására megy. Ebben az esetben el kell dönteni, hogy milyen kompromisszumokkal tudunk a megfelelő nyomtatáshoz eljutni. Vagy előre számolni kell az utófeldolgozás okozta méretváltozásokkal.

1.1 Célkitűzés

Dolgozatom során bemutatásra kerülnek a főbb 3D nyomtatási technológiák, az általánosan használt anyagok típusai és tulajdonságaik. Ezután felvázolok több technológiát érintő problémát, amelyeket a tervezési szakaszban lehet kiküszöbölni. A problémák kiküszöböléséhez szükséges mérésekhez bemutatom a saját tervezésű teszt alkatrészeket, melyek a vizsgálataim alapját képezik. Ezek után a teszt alkatrészeket kinyomtatom és bemutatom ezeknek az alkatrészeknek a nyomtatási paramétereiket, a használt szoftvert és nyomtatót. Célom a teszt alkatrészekkel, hogy az állítva kinyomtatott furatot és kivágásokat hogyan tudom úgy alakítani tervezési folyamat során, hogy a 3D nyomtatás során a méret és alakhelyességi különbségeket csökkentsem, ami esetleges későbbi illesztéseknél (csapágyak, csapok, rudak) a kiemelt fontosságú, esetlegesen teljes utómunka szakaszt tehet szükségtelenné.

Ezeket a vizsgálatokat egy általam készített mérési berendezéssel és egy későbbiekben definiált komplex mérési módszertannal mutatom be. A mérési módszer kialakításában fontos szempont volt, hogy a mérés könnyen megismételhető legyen minimális eszköz hátérrel, mivel a kapott eredményekből általános következtetéseket levonni egyértelműen lehetséges, azonban a pontos méretek az alkalmazott nyomtatási környezettől függően változnak. Így egy speciális felszerelést nem igénylő módszer elérhetővé teszi a kalibrációt nem csak ipari de amatőr környezetben is.

Mindezek után a 3D nyomtatás nyomtatási idejének csökkentésére mutatok be egy technikát, a koncentrált kitöltést. Koncentrált kitöltés alkalmazásával a 3D nyomtatás során jelentősen csökkenthetjük a felhasznált anyagot és ezen keresztül a nyomtathoz szükséges időt. Ezen módszer lehetővé teszi akár széles körben is, hogy azonos nyomtatási paraméterek mellett sokszorosára növeljük a nyomtatás termelékenységét. A technika alapja, hogy az automatikus kitöltés helyett elkülönítve nyomtatjuk a modell külső héját és belső kitöltését, utóbbit csak azokhoz a területekhez nyomtatjuk ki, amelyek terhelve lesznek, így jelentősen csökkentjük a nyomtatási felületet. A nyomtatási idő csökkentési módszer olyan mértékben helyzet függő (elsősorban terhelés és nyomtatási idő csökkentésének igénye határozza meg), hogy általános mérése rendkívül nehézkes, illetve kevésbé célravezető. Ezért a működését és hatékonyságnak mértékét egy általam megvalósított példán keresztül mutatom be.

2. A 3D NYOMTATÁS

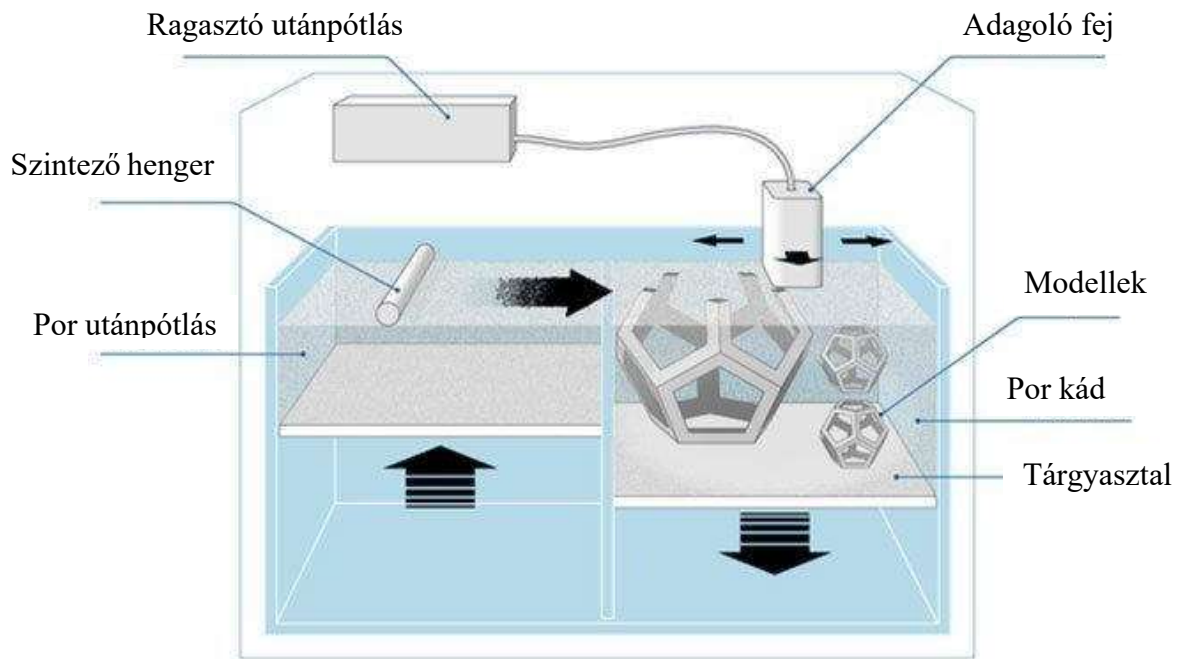
Az additív gyártási folyamatok egy számítógéppel segített tervezési (CAD) fájlból veszik az információkat, amelyeket később a sztereolitográfia (STL) fájlként mentenek. Ebben a folyamatban a CAD szoftverben készült rajzot háromszögekkel közelítjük és szeleteljük, tartalmazza az egyes nyomtatandó rétegek információit. Diskurzus folyik a vonatkozó adalékanyag-gyártás folyamatiról és alkalmazásairól. A repülőgépipar könnyebb szerkezetek gyártásának lehetősége miatt alkalmazza a 3D nyomtatást, különböző szerkezetek súlyának csökkentésére. Az additív gyártás átalakítja az orvostudomány gyakorlatát is, valamint megkönnyíti az építészek munkáját. 2004-ben a Gyártómérnökök Társasága osztályozta a különféle technológiákat, és azóta legalább további négy jelentős technológiát adott hozzá 2012-ben. A következő alfejezetben bemutatom azokat a technológiákat, amelyeket az additív gyártásban alkalmaznak. Az additív gyártás előtt azonban még sok munkát és kutatást kell elvégezni mielőtt ezek a technológiák szabványossá válnak a gyártóiparban, mert nem minden általánosan használt gyártási anyag teszi lehetővé a 3D nyomtatás alkalmazását. A pontosság javításra szorul, hogy ne legyen szükség a befejező folyamatra. Folyamatos és növekvő elterjedése a kezdetek óta tapasztalható és a máig tartó sikeres eredmények optimizmusra adnak okot, az additív gyártás jelentős helyet foglal el a gyártás jövőjében. [1]

2.1 3D nyomtatás technológiái

Különböző funkciókkal rendelkező 3D nyomtatási technológiákat fejlesztettek ki. Az ASTM az F2792 szabvány [2] szerint, hét csoportba sorolta a 3D nyomtatási technológiákat, beleértve a kötőanyag sugárzó, irányított energia lerakás, anyagextrudálás, anyagsugaras, porágyas fúzió, lemez laminálás és kád fotopolimerizáció. Nincs vita arról, hogy melyik gép vagy technológia működik jobban, mert mindegyiknek célzott alkalmazási területei vannak. Manapság a 3D nyomtatási technológiák már nem korlátozódnak a prototípus-használatra, hanem egyre gyakrabban használják különféle termékek előállítására is. [3]

A kötőanyag sugárzás egy gyors prototípuskészítési és 3D nyomtatási eljárás, amelyben folyékony kötőanyagot használnak, amely megkötö a rétegesen felvitt porszemcséket. A kötőanyag-sugárzó technológia sugárzással felvitt vegyi kötőanyagot használ mely a szórt porral réteget alkot [4]. A kötőanyag fúvóka alkalmazása az öntési minták

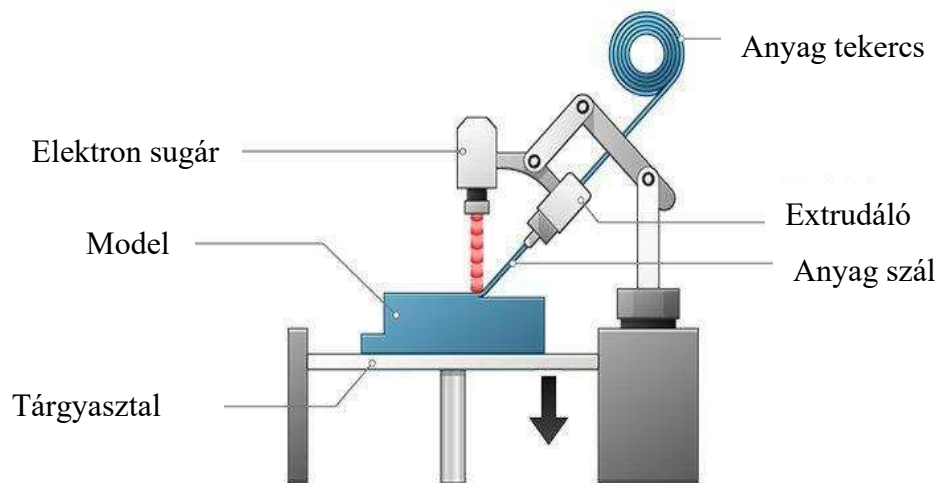
előállítására, nyers homokból készült termékek szinterezésére vagy hasonló nagy volumenű termékek előállítására kiválóan alkalmas.



1. ábra: Kötőanyag sugárzás sematikus rajza [5]

A kötőanyag-sugárzással különféle anyagok nyomtathatók, beleértve a fémeket, homok, polimereket, hibrid és kerámia anyagokat. Egyes anyagok, például a homok, nem igényelnek további feldolgozást. A kötőanyag-sugárzó folyamat egyszerű, gyors és olcsó, mivel a porszemcséket összeragasztják, valamint kötőanyag-sugárzás előnye még, hogy képes nagy méretű termékek nyomtatására (1. ábra).

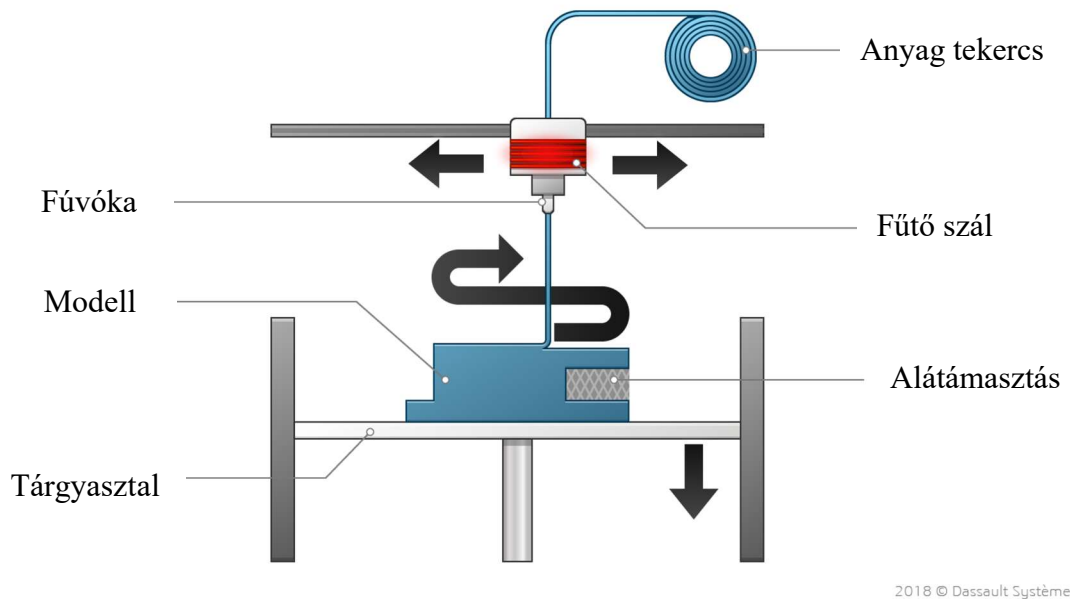
Az irányított energiás leválasztás egy bonyolultabb nyomtatási eljárás, amelyet általában javításra vagy további anyag hozzáadására használnak a meglévő alkatrészekhez [5]. Az irányított energetikai lerakódás nagymértékben szabályozza a szemcseszerkezetet, és kiemelkedően jó minőségű tárgyat eredményezhet.



2. ábra: Irányított energiás leválasztás sematikus rajza. [7]

Az irányított energialeakódás folyamata elvében hasonló az anyagextrudáláshoz, de a fűvóka nincs egy meghatározott tengelyhez rögzítve (2. ábra), és több irányba tud mozogni. Továbbá az eljárás kerámiákkal, polimerekkel, de jellemzően fémekkel és fémalapú hibridekkel is használható, akár drótból, akár porból. Ennek a technológiának a példája a lézeres leválasztás és a lézeres hálóformázás [5]. A lézeres leválasztás feltörekvő technológia, és felhasználható milliméterben vagy gyártására, vagy javítására. A lézeres leválasztási technológia egyre nagyobb vonzerővel rendelkezik a szerszámgyártás, a járműipar, a repülőgépipar és az olaj- és gázágazatban is, mert skálázhatóságot és változatos képességeket tud biztosítani egyetlen rendszerben [6]. Eközben a lézerlencse felhasználhatja a hőenergiát az öntés során történő megolvadáshoz, és az alkatrészek ezt követően elkészülnek. [7]

Az anyagextrudáláson alapuló 3D nyomtatási technológia több anyag és több színű nyomtatásra is használható és alkalmazható anyagai lehetnek műanyagok, élelmiszerek vagy akár élő sejtek [8]. Ezt az eljárást széles körben alkalmazzák, és a költsége nagyon alacsony. Ráadásul ez a folyamat alkalmas teljesen működőképes alkatrészek felépítésére [5].



3. ábra: Anyagextrudáló 3D nyomtatás sematikus rajza [11]

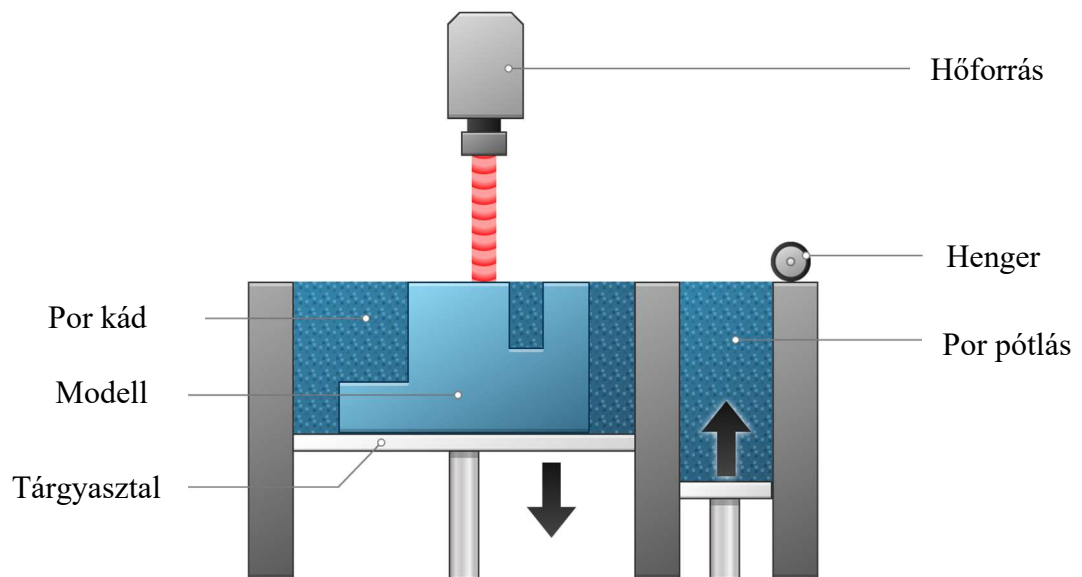
A fuzionált depozíciós modellezés (FDM) az első példa az anyagextrudáló rendszerre. Az FDM-et 1990 elején fejlesztették ki, ez a módszer polimert használ fő anyagként [9]. Az FDM rétegről rétegre építi fel az alkatrészeket (3. ábra) alulról felfelé hőre lágyuló szál melegítésével és extrudálásával.

Az FDM műveletei a következők:

- Hőre lágyuló műanyagot, melyet félig folyékony állapotra hevítenek, és ultrafinom szálként rakja le az extrudálási út mentén [10].
- Ahol támogatásra vagy pufferelésre van szükség, a 3D nyomtató eltávolítható anyagot helyez el, amely állványként működik. Például az FDM kemény műanyagot használ a folyamat során a térben elhelyezkedő vázat állít elő a modell támaszasztására [10].

Az ASTM szabványok szerint az anyagsugárzás egy 3D nyomtatási eljárás, amelyben az építőanyagot cseppenként szelektíven helyezik el az adott réteg felületén. Anyagsugárzás esetén a nyomtatófej olyan fényérzékeny anyag cseppjeit adagolja, amelyek megszilárdulnak ultraibolya (UV) fény hatására, így építve fel rétegről rétegre a modellt [11]. A technológia nagyon sima felületű és nagy méretpontosságú alkatrészeket hoz létre. Az anyagsugárzás során felhasználható anyagok választéka nagyon széles, úgy mint a polimerek, kerámiák, kompozitok, biológiai anyagok és hibridek [5].

A porágyas fúziós eljárás magában foglalja az elektronsugaras olvasztást (EBM), a szelektív lézeres szinterezést (SLS) és a szelektív hőszinterezés (SHS) nyomtatási technikát. Ez a módszer elektronsugarat vagy lézert használ az anyag olvasztásához (4. ábra). Az eljárás során felhasznált anyagok például fémek, kerámia, polimer, kompozit és hibrid.

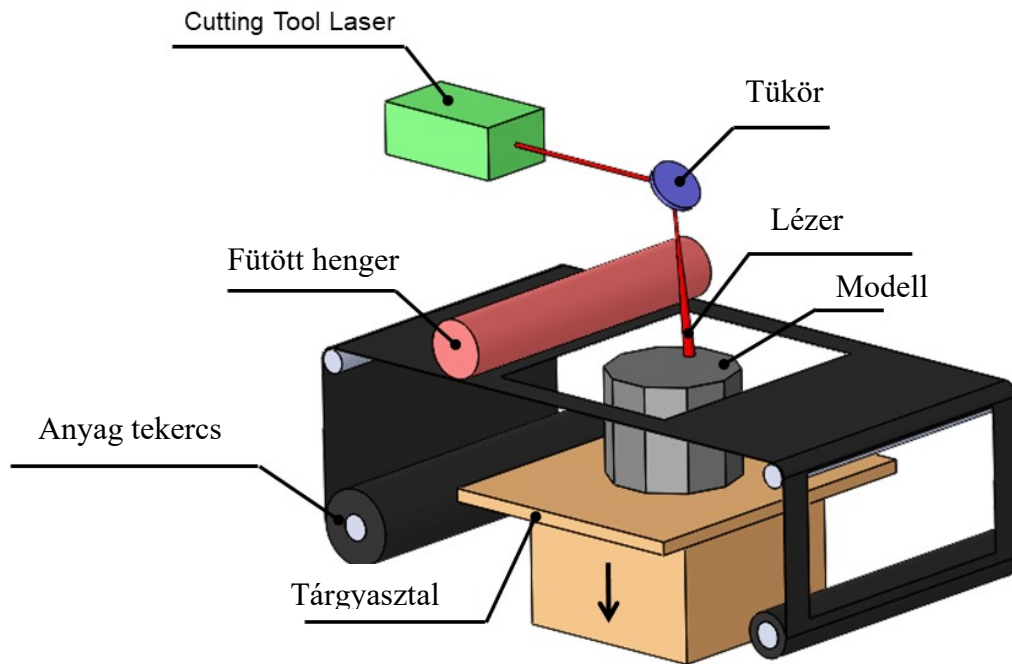


4. ábra: Porágyas fúziós 3D nyomtatás sematikus rajza [15]

A por alapú 3D nyomtatás fő példája a szelektív lézerszinterezés (SLS) technológia. Carl Deckard 1987-ben fejlesztette ki az SLS technológiát. Az SLS egy 3D nyomtatási technológia, amely funkcionálisan nagy sebességű, nagy pontosságú és változó felületi minőségű alkatrészek előállítására alkalmas [12]. A szelektív lézeres szinterezéssel fémeket lehet létrehozni, műanyag és kerámia tárgyakat [13]. Az SLS nagy teljesítményű lézert használt polimer por szemcsék szinterezésére a 3D termék előállításához. Eközben az SHS technológia a 3D nyomtatás egy másik része, amely hőnyomtatást használ, a folyamat során megolvasztja a hőre lágyuló port, hogy 3D nyomtatott objektumot hozzon létre. Végül az elektronsugaras olvasztás növeli a hőmérsékletet az anyag felmelegítéséhez [13].

Az ASTM definíciója szerint a lap laminálás az a 3D nyomtatási eljárás, amelyben az anyagok lapjait összeragasztják, hogy létrehozzák az objektum egy részét [11]. Ezt a folyamatot alkalmazó 3D nyomtatási technológia példája a laminált tárgy gyártás (LOM)

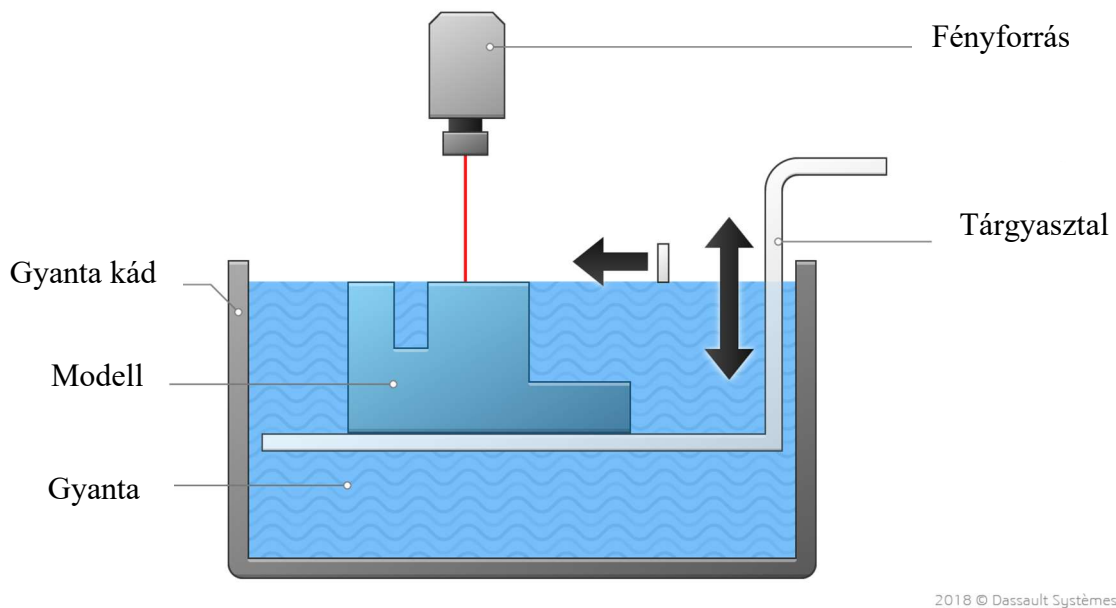
és ultrahang additív gyártás (UAM) [5]. Ennek az eljárásnak az előnyei a következők: a laplaminálással színes nyomatok készíthetők, viszonylag olcsó, könnyen kezelhető és a felesleges anyag ú Vágó lézer



5. ábra: Lap lamináló 3D nyomtatás sematikus rajza [18]

A laminált tárgygyártás (LOM) bonyolult geometriai alkatrészek gyártására képes alacsonyabb gyártási költséggel és rövidebb üzemidővel [14]. Az ultrahang additív gyártás (UAM) egy innovatív folyamattechnológia, amely hangot használ a jellegtelen fóliaanyagból húzott fémrétegek egyesítésére (4. ábra).

A leggyakrabban használt 3D nyomtatási technika a fotopolimerizáció, amely általában a fotoreaktív polimerek keményítése lézerrel, fénnel vagy ultraibolya (UV) alkalmazásával [15]. Jó példa a fotopolimerizációt alkalmazó technológiákra a sztereolitográfiában (SLA) és a digitális fényfeldolgozás (DLP). Az SLA-t befolyásolja a fotoiniciátor, a besugárzott expozíció sajátos körülményei, valamint az esetleges színezékek, pigmentek vagy egyéb hozzáadott UV-abszorberek [9].



6. ábra: Fotopolimerizációs 3D nyomtatás sematikus rajza [21]

Eközben a digitális fényfeldolgozás hasonló folyamat sztereolitográfiához, mely fotopolimerekkel működik, de a fő különbség a fényforrás. A Digital Light Process a hagyományosabb fényforrásai lehetnek például ívlámpa vagy folyadékkristályos kijelzőpanel. Az egész nyomtató felületet bevilágíthatja, a fotopolimer gyanta tartályának felülete egyetlen menetben lefedésre kerülhet (6. ábra), ami általában gyorsabb, mint a sztereó litográfia [16]. A VAT fotopolimerizáció fontos paraméterei az expozíció ideje, a hullámhossz és a teljesítmény mennyisége. A kezdetben használt anyagok folyékonyak, és megkeményednek, ha a folyadékot ultraibolya fénynek teszik ki. A fotopolimerizáció alkalmas prémium termék előállítására, jó részletekkel és kiváló felületminőséggel [8].

2.2 A 3D nyomtatásban használt anyagok

Mint minden gyártási folyamathoz, a 3D nyomtatáshoz is kiváló minőségű anyagokra van szükség, amelyek megfelelnek az egységes előírásoknak konzisztens, jó minőségű eszközök előállítására alkalmasak. Ennek biztosítására az anyagi ellenőrzésekre vonatkozó eljárások, követelmények és megállapodások az anyag szállítói, vásárlói és végfelhasználói között jönnek létre. A 3D nyomtatási technológia alkalmas teljesen működőképes alkatrészek előállítására anyagok széles skálájából, beleértve a kerámiát, fémeket, polimereket és azok kombinációjából álló hibridek, kompozitok vagy funkcionálisan osztályozott anyagok (FGM) formájában [5].

A fém 3D nyomtatási technológia sok figyelmet kap a repülőgépiparban, az autópiparban, az orvosi alkalmazásokban és a feldolgozóiparban, mivel az eljárásoknak számos előnye van [17]. A fémek kiváló fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, és ezek az anyagok felhasználhatóak összetett gyártmányok esetén az emberi szervek nyomtatásától a repülőgép-alkatrészekig. Ilyen anyagok például az alumíniumötvözetek [18], a kobalt alapú ötvözetek [19], a nikkel alapú ötvözetek [20], rozsdamentes acélok [21] és titánötvözetek [22] [23]. A kobalt alapú ötvözetek alkalmasak a fogászati célú 3D nyomtatáshoz. Ennek az az oka, hogy nagy a fajlagos merevsége, rugalmassága, nyúlása és kedvező hőkezeléssel elérhető tulajdonságai [19]. Ezenkívül a fém 3D nyomtatási technológia alkalmas repülőgép-alkatrészek előállítására nikkel alapú ötvözetek [20] felhasználásával. A nikkelalapú ötvözetek felhasználásával készült 3D-nyomtatott objektumok veszélyes környezetben is használhatók. Ennek az az oka, hogy nagy a korrózióállósága, és magas hőmérsékletnek (1200 °C-ig) is ellenáll [17]. Végül, a 3D nyomtatási technológia titánötvözetek használatával is tud tárgyat nyomtatni. Titán ötvözeteknek kiemelkedő tulajdonságai vannak, mint pl. alakíthatóság, jó korrózió, oxidációállóság és alacsony sűrűség. Magas mechanikai feszültség, magas üzemi hőmérsékletek és nagy igénybevételek esetén használják például az űrrepülőgép-alkatrészekben [22] és orvosi biológiai iparban [23].

A 3D nyomtatási technológiákat széles körben használják polimer alkatrészek előállítására a prototípusoktól a nehéz geometriájú funkcionális alkatrészekig [24]. A Fused Deposition Modeling (FDM) használatával 3D alkatrészt alkothat extrudált hőre lágyuló szál, például tejsav egymást követő rétegeinek lerakásával nyomtatva (PLA), akrilnitril-butadién-sztirol (ABS), polipropilén (PP) vagy polietilén (PE) [24]. Mostanában hőre lágyuló műanyagokként a magasabb olvadási hőmérsékletű filamentek, mint például a PEEK és a PMMA is felhasználhatók 3D-s anyagként nyomtatási technológiával [25]. A folyékony halmazállapotú vagy alacsony olvadáspontú 3D nyomtatási polimer anyagokat széles körben használják 3D-nyomtatási iparban, alacsony költségük, kis súlyuk és feldolgozási rugalmasságuk miatt [26]. Leggyakrabban használt anyagok a polimerek, melyek fontos szerepet játszottak a bioanyagok fejlesztésében és orvostechnikai eszközök előállításában, gyakran inert anyagokként, hozzájárulva az eszközök hatékony működéséhez, valamint számos ortopédiai implantátum mechanikai alátámasztásának előállításához [20].

Napjainkban a 3D nyomtatási technológia kerámia és beton felhasználásával képes 3D nyomtatott tárgyakat előállítani valamint, a nagy pórusok vagy repedések elkerülhetőek a paraméterek optimalizálásával és a jó mechanikai tulajdonságok beállításával [27]. A kerámia erős, tartós és tűzálló anyag. Kötés előtti folyékony állapotának köszönhetően a gyakorlatilag bármilyen felületre felhordható geometriától és formától függetlenül, és nagyon alkalmas a jövőbeli építkezések és épületek létrehozására [27]. A kerámiák hasznosak a fogorvosi és repülési alkalmazásokban is [28]. Ezen anyagok például a következők, alumínium-oxid [29], bioaktív üvegek [30] [31] és cirkónium-oxid [32]. Ezek közül talán a legfontosabb az alumínium-oxid, kiváló kerámia-oxid, nagyon széles körű felhasználási területtel, többek között katalizátorok, adszorbensek, mikroelektronika, vegyipar, repülőgépipar és egyéb csúcstechnológiájú iparágak [33]. Az alumínium-oxid keményedése nagy [28]. 3D nyomtatási technológia alkalmazásával összetett alakú timföld alkatrészekkel nagy sűrűségű a szinterezés után nyomtatható [29]. A mechanikai szilárdság növelésének lehetősége megnyílik a bioaktív üveg alkalmazásával, a releváns klinikai struktúrákban, például állványokban és csontokban. Használva a Sztereolitográfiai kerámiagyártást (SLCM), gyakran szilárd ömlesztett kerámiákat állítanak elő magas sűrűség, nagyon homogén mikrostruktúra, nagy nyomószilárdság elérésére [31]. Eközben a cirkónium-oxidok a fő építőanyagok az atomenergia-ágazatban, elemcsövekhez használnak. A hafniummentes cirkónium nagyon alkalmas erre az alkalmazásra, mert alacsony a sugárzásérzékenysége és alacsony termikus neutronja is abszorpcióra alkalmasak [32].

Kompozit anyagok kivételes sokoldalúsággal, kis tömeggel és testre szabható tulajdonságokkal rendelkeznek, forradalmasíthatják a nagy teljesítményű iparágakat. A kompozit anyagok, például a szénszál erősítésű polimer kompozitok [34] és üvegszállal erősített polimer kompozitok [35]. Szénszál erősítésű polimerek a kompozit szerkezeteket széles körben használják a repülőgépiparban, mivel nagy fajlagos merevségük, szilárdságuk, jó korrózióállóság és kifáradási teljesítményük van [43]. Ugyanakkor az üvegszál erősítésű polimer kompozitokat széles körben használják különféle 3D nyomtatási alkalmazásokban [35], és nagy lehetőségek rejlenek alkalmazásukban első sorban a költséghatékonyság és a nagy teljesítmény miatt [36]. Az üvegszál magas hővezető képességgel rendelkezik és viszonylag alacsony hőtágulási együtthatóval.

Ezenkívül az üvegszál nem éghet, és nem is befolyásolja a gyártási folyamatokban használt kikeményedési hőmérséklet, ezért kiválóan alkalmas a 3D nyomtatáshoz [36]. Az intelligens anyagokat úgy határozzák meg, hogy ezek az anyagok képesek megváltoztatni a tárgy geometriáját és alakját, külső körülmények, például hő és víz hatására [37]. Egy 3D-s nyomtatott objektum például képes lehet intelligens anyagok felhasználásával önmagukban fejlődő szerkezeteket és puha robotikai rendszereket létrehozni. Intelligens anyagok a 4D kategóriába is sorolhatók nyomdai anyagok is. A csoportos intelligens anyagok példái az alakmemória ötvözetek [38] és az alakmemória polimerek [39]. Egyes alakmemóriás ötvözetek, például a nikkel-titán [38] felhasználhatók az orvosbiológiai implantátumok és a mikro elektromechanikai eszközök alkalmazásában [27]. 3D nyomtatott termékek nikkel-titán felhasználásával történő gyártása során, az átalakulási hőmérséklet, a mikrostruktúra és a sűrűség reprodukálhatósága kiemelkedően fontos kérdés. Eközben alakmemória polimer (SMP) egyfajta funkcionális anyag, amely reagál olyan ingerekre többek között, mint a fény, az elektromos hő és különböző vegyszerek [39]. A 3D nyomtatási technológia használatával a bonyolult formájú alakmemória polimer könnyen és kényelmesen előállítható. Ennek az anyagnak a minőségi értékelésének egyik mérőszáma a méretpontosság, melyet a felületi érdességet és az alkatrész sűrűségét figyelembe véve határozhatunk meg [39].

Példák a speciális anyagokra:

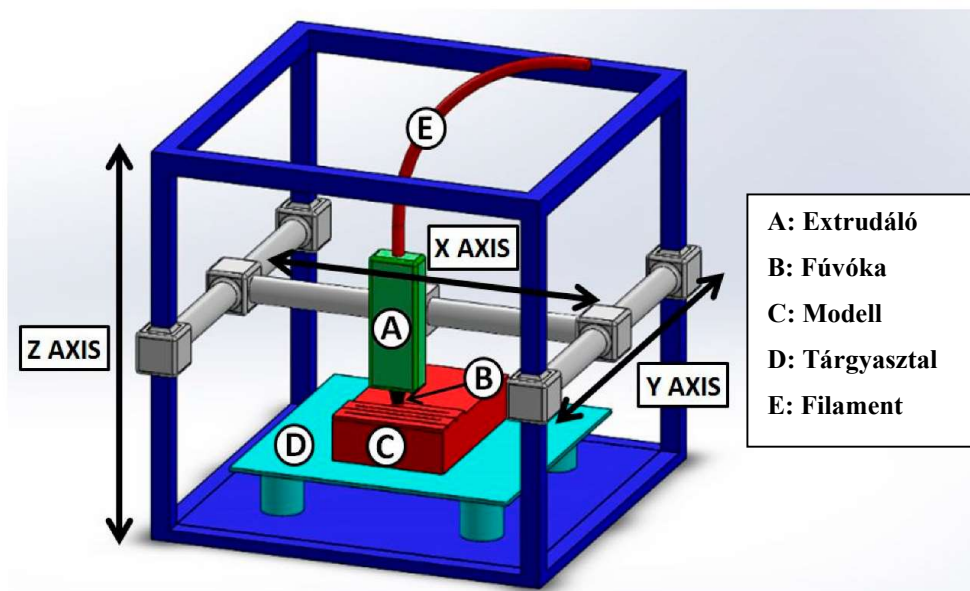
- Étel: A 3D nyomtatási technológia élelmiszeripari anyagok felhasználásával képes feldolgozni és előállítani a kívánt formát és geometriát, mint a csokoládé, hús, cukorka, pizza, spagetti, különböző szoszok [40]. A 3D-s élelmiszernyomtatás képes előállítani egészséges ételeket, mert ez a folyamat lehetővé teszi az ügyfelek számára, hogy pontosan meghatározzák az anyagok összetevőit és az összetevők tápanyag tartalmát és ízét. [41].
- Lunar por: A 3D nyomtatási eljárás képes közvetlenül többretegű részeket előállítani a holdporból, amely technológia lehetséges alkalmazhatósága a jövőbeni holdtelepülés kiépítése. [42].
- Textil: A 3D nyomtatási technológiával az ékszer- és ruhaipar a 3D textilnyomtatás fejlesztésével fejlődhet tovább. A 3D nyomtatási technológia előnye a divatiparban a rövid feldolgozási idő a termék gyártáshoz, a csomagolással

kapcsolatos költségek csökkentése és az ellátási lánc költségeinek minimalizálása [7].

2.3 3D nyomtatott anyagok mechanikai tulajdonságai

2.3.1 FDM nyomtatás mechanikai tulajdonságai

Az FDM-mel előállított alkatrészek mechanikai tulajdonságai nagymértékben függenek a nyomtatási architektúrától (7. ábra). Emiatt a 3D nyomtatás számos feldolgozási változójának bevezetése előtt értékelni kell az nyomtatott szál tulajdonságait az extrudálás után. A 3D nyomtatott minták húzó-, hajlító-, nyomó- és ütési tulajdonságait ezután és egymástól külön-külön is figyelembe veszem, hogy a kapott adatok jelentősebb összehasonlítást tegyenek lehetővé.

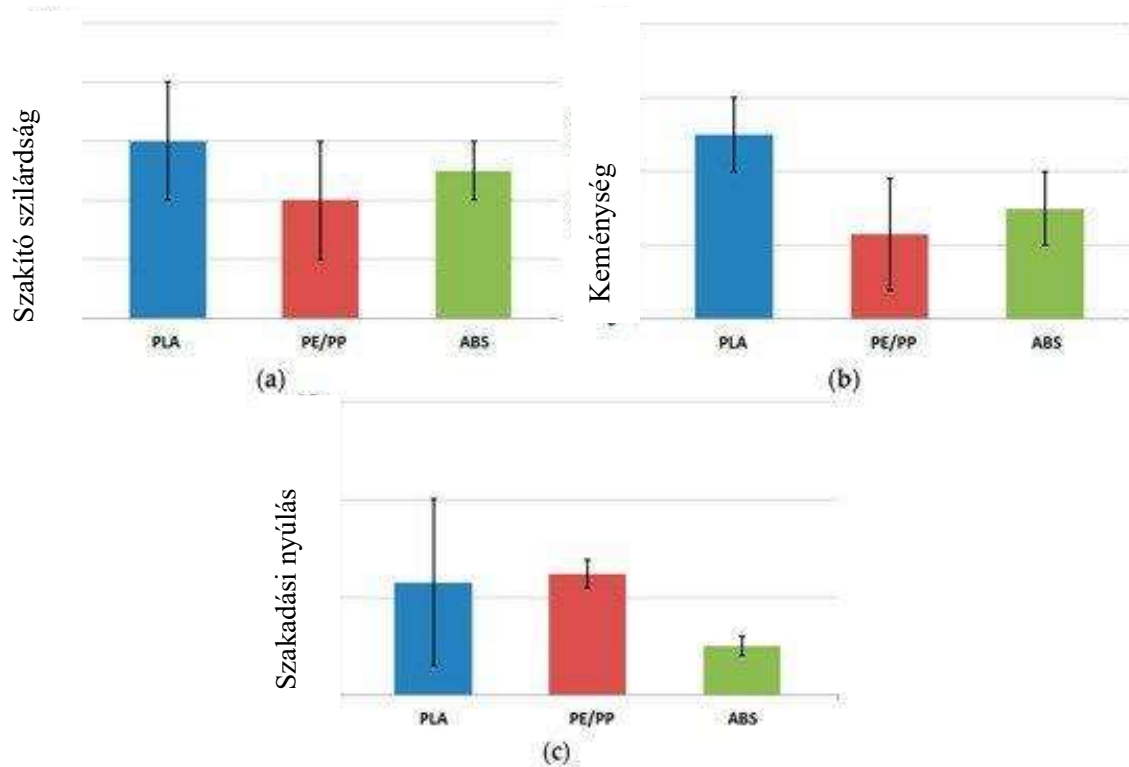


7. ábra: FDM nyomtató sematikus ábrája [43]

Minden publikált közleményben a mintákat az ömlesztett anyagokra érvényes szabványok szerint alakították ki. Annak ellenére, hogy ez elsőre helytelennek tűnhet, figyelembe kell venni, hogy a 3D nyomtatott alkatrészekre nincs külön szabvány.

A tudományos irodalomban néhány kutató foglalkozott a filamentek szakítójellemzésével (8. ábra). Harakeke és kenderrosttal töltött PP-t tanulmányozták [44] [45] -ben, és kimutatták, hogy a szilárdság és a merevség is növekszik a természetes rosttartalommal. A harakeke erősebb hatást fejtett ki, mint a kender, ami körülbelül 50%-os szakítószilárdság-növekedést eredményezett körülbelül 30 tömeg%-os harakeke tartalom

mellett, miközben a merevség több mint kétszeresére nőtt. Egészen más a helyzet a PLA esetében: a 10 tömegszázalékos faliszt töltelék nagyon kis szilárdságnövekedést eredményezett [46], de magasabb fatartalom mellett jelentősen csökkent.



8. ábra: PLA/PE-PP/ABS anyagok statikai tulajdonságai [43]

Érdekes módon ez nem a PLA hidrotermikus lebomlásának tudható be, mivel a szerzők óvatosan szárították meg az alapanyagokat a feldolgozás előtt. Hasonló helyzetet találtak a kakaóhéjjal (CSW) töltött PCL-lel [47] és a kereskedelmi fa/PLA szálakkal [48] is. Ennek az eltérésnek megmagyarázása érdekében nem feltétlenül a mátrix kémiai természete az egyetlen szempont, amelyet figyelembe kell venni. Valójában, több forrás szerint [43], a poliolefin szálak átmérője nagyobb, mint 2,4 mm, így lényegesen vastagabbak voltak, mint a poliészterszálak, amelyek átmérője 1,75 mm volt. Bár ez az utolsó méret a leggyakrabban a 3D nyomtatóknál megkövetelt méret, előfordulhat, hogy ez nem teszi lehetővé a szálak megfelelő nedvesítését magas töltőanyag-tartalom mellett. Másodszor, annak ellenére, hogy mindkét szál hasonló száltartalma (azaz körülbelül 40 tömeg%), ez közel van a PLA maximális szálterheléséhez, míg a poliolefinnek akár 70 tömegszázalékig is elfogadják a fa kitöltését. Figyeljük meg azt is, hogy a biofiller negatív hatása független a töltőanyag geometriájától. Valójában Depuydt [49] elemezte a len- és

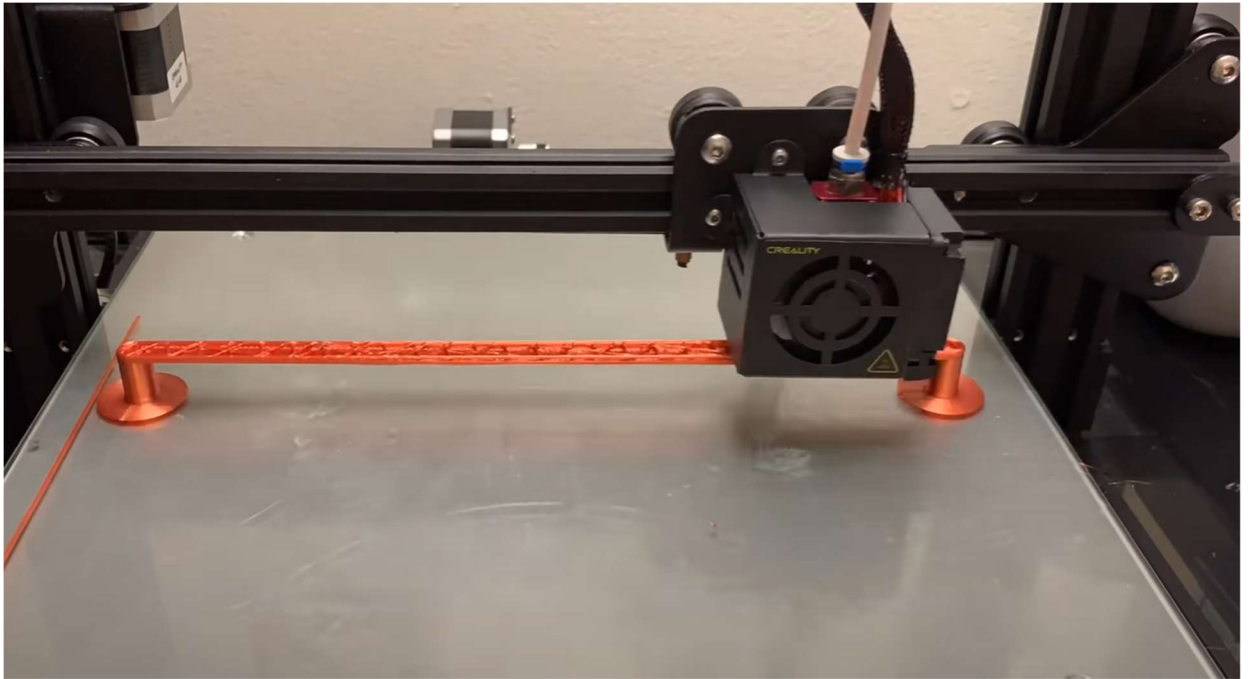
bambuszrosttal töltött PLA-t az erősítés hossz-átmérő arányának (L/D) függvényében. Annak ellenére, hogy eredményeik azt mutatták, hogy az L/D arány jelentős hatással volt a merevségre (a hosszabb szálak 215%-kal növelik), a szilárdságra nem volt ugyanolyan hatással, és egyébként is a tiszta PLA tulajdonságai sokkal magasabbak voltak. Ugyanezek a szerzők két különböző lágyító hatását értékelték, nem találtak releváns hatást, és befejezték a filament jellemzését a vákuumszáritás által kiváltott porozitáscsökkenés igazolásával a kompaundálás végén. A rostkezelés hatásait illetően Filgueira [50] termomechanikus cellulózsálakkal (TMP) töltött PLA alapján értékelte a filamentek szilárdságát, amelyeket két különböző enzimátikus módosításnak vetettek alá, nevezetesen a lakkáz-asszisztált graftozásnak (LG) és a lakkáz-közvetített graftozásnak (OG). Az OG-módosított kompozitok adták a legnagyobb szilárdságot az összes filament közül, valószínűleg a TMP és a PLA közötti jobb határfelületi adhézió miatt. Ezzel szemben az összes többi biokompozit szilárdsága kisebb volt, mint a tiszta PLA-é, és ezt a filament porozitása igazolta, amit elektronmikroszkópos analízis is megerősített.

3. CAD TERVEZÉS 3D NYOMTATÁSHOZ

A 3D nyomtatás FDM típusú eljárása során a hevített fűvókában átáramló folyékony, vagy félig folyékony alapanyag, a 3D nyomtató filament a fűvókát elhagyva még rendelkezik némi folyékonysággal. Ezen folyékonyság segíti hozzá a fej mozgása és az alapanyagtovábbítás (extrudálás) során kiáramló, vonalakként meghúzott alapanyagot a korábban kijuttatott alapanyaghoz kötődését, amely a részleges egybeolvadást, részleges adhéziót kialakítja a vonalak, rétegek, valamint az asztallap között. Ezen tulajdonsága és az adhézió fontossága miatt az első réteg esetén sok esetben nem használnak tárgyhűtést, hogy a lehető legforróbb állapotú alapanyag érintkezzen az asztallappal.

Az általam is, a dolgozathoz végzett munkám során próbatestek gyártása folyamán alkalmazott PLA (poli-lactic-acid, azaz poli-tejsav) alapanyag egy olyan anyag, amelyhez elengedhetetlen a tárgyhűtés alkalmazása. Ez annak köszönhető, hogy az alapanyag üvegesedési hőmérséklete (amely alatt kifejezetten alacsony deformáció is már maradandó alakváltozást okoz) kifejezetten alacsony hőfokon, 60 °C-on található [55], nemsokkal efelett már képes megfolyni az anyag, vagy saját súlyánál fogva a gravitációs erő hatására deformálódni. Azonban a nyomtatási hőmérséklet ennél jóval magasabb, gyakran 190-215 °C között található [56]. Az anyagot gyorsan le kell hűteni, hogy nehogy megfolyjon, ezért alkalmazzák a tárgyhűtést a PLA alapanyagnál.

Vannak olyan alapanyagok is, mint például az ABS (akrilnitril-butadién-sztirol), amely részben a magas üvegesedési hőmérséklete (~110 °C), részben a nagy hőtágulási együtthatója miatt tárgyhűtés alkalmazása esetén egyszerűen összetöredezik nyomtatás közben, nem alkalmazható a tárgyhűtés. Mitöbb, célszerű a 60-100 °C-ra melegíthető, zárt nyomtatási tér alkalmazása az ilyen nyomtatási hibák kiküszöbölése érdekében [57]. A rendelkezésre álló FDM 3D nyomtató berendezés belsejében található tárgyhűtés erőssége befolyásolja, hogy mekkora túlnyúlásokat, levegőben lebegő alaksajátosságokat képes kinyomtatni a berendezés [58]. Léteznek kifejezetten erős tárgyhűtési megoldások, amelyekkel akár jóval több, mint 100 mm széles „kanyonokat” lehet áthidalni (9. ábra) úgy, hogy a legalsó, hídképző réteg feletti rétegek már mind hibátlanul elkészülnek, míg a hídképző réteg maga sem mindig esztétikailag kifogásolható.



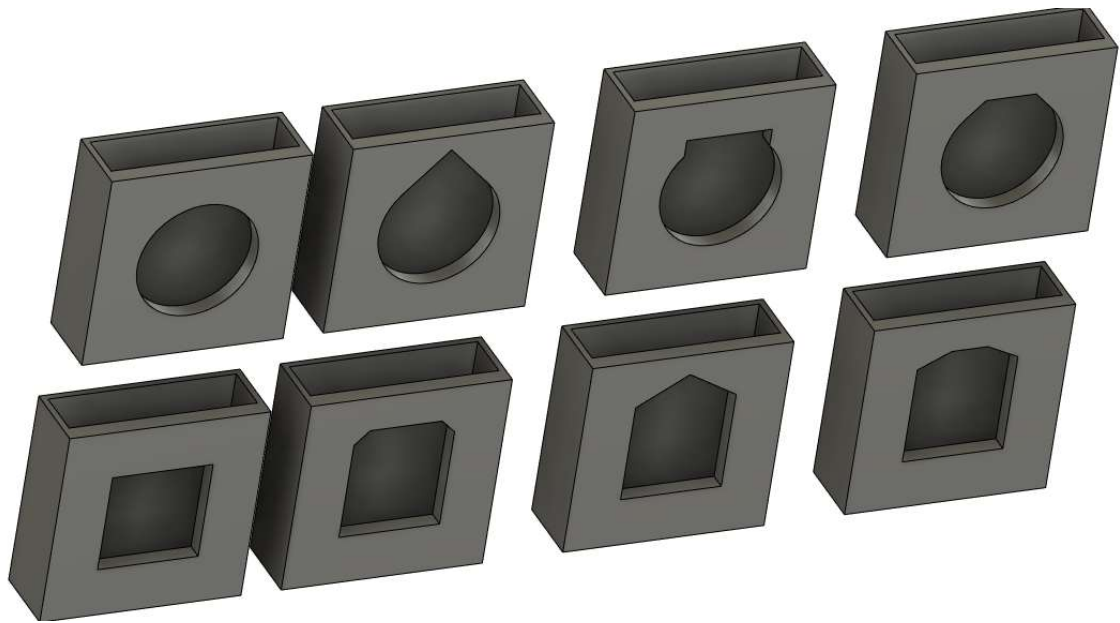
9. ábra: Egy hosszú áthidalás egy Creality Ender 3 típusú FDM 3D nyomtatón [59]

Az alulról felfelé építkező gyártások, akár gyorsprototípusgyártás, akár az építészet is, igényelnek, igényelhetnek alátámasztást a kinyúlások fölé, ettől kizárólag egyenes áthidalásnál lehet eltérni (9. ábra), alátámasztás mindenképpen szükséges abban az esetben, ha az nem csak egy egyenes híd, hanem akár egy kanyarodó híd, vagy csak egy „erkély”. A rendelkezésre álló 3D nyomtató is tesztelhető egyoldalú kinyúlások nyomtatási minőségét illetően, többféle modellt készítettek már ennek kivitelezésére a különböző 3D nyomtatós közösségek.

A dolgozat folyamán is egy híd jellegű alaksajátosság nyomtathatósági lehetőségeit fogom megvizsgálni. A vizsgálat célja kideríteni és ökölszabályt megfogalmazni, hogy mekkora eltérést kell alkalmazni a később bemutatott alaksajátosságok funkcionális működéséhez. Erre azért van szükség, mert bár sok esetben a kinyúlások és hidak hibás részei eltávolíthatók utólagos munkálatokkal, utókezelésekkel, ezek időigényes eljárások, amelyek kézi, emberi munkaerőt igényelnek. Sokkal jobb lenne, ha szándékosan olyan torz geometriát modellezni, amely tartalmazza a hiba ellenkompenzációját, és amennyiben a „hibás” modell kinyomtatja a berendezés, a gyártási hiba kiküszöböli a modell hibáját, ezzel funkcionálisan alkalmas, utómunkát nem igénylő alkatrészeket létrehozva.

3.1 Mintadarabok tervezése

A vizsgálat során olyan geometriájú modelleket szeretnék kinyomtatni és megvizsgálni, amelyek vizsgált alaksajátosságain alkalmazott javítások, módosítások alkalmasak lehetnek iránymutatásként a nyomtatási síkhoz függőleges falakon elhelyezkedő négyzetes és kör keresztmetszetű furatok, kivágások szerelhetővé tételére úgy, hogy ne igényelje utómunkát például egy csapágy, csap vagy egyéb illeszkedő termék behelyezése. Első lépésként megvizsgálom, hogy a névleges méretű kör, illetve négyzet kivágások a test függőleges falán mekkora eltérést mutatnak a gyártás után a modellhez képest, majd különböző módosításokat alkalmazok a kivágásokon, amelyekkel igyekszem megoldani az alátámasztás hiánya miatti benyúlását, hasasodását a hidak aljának.

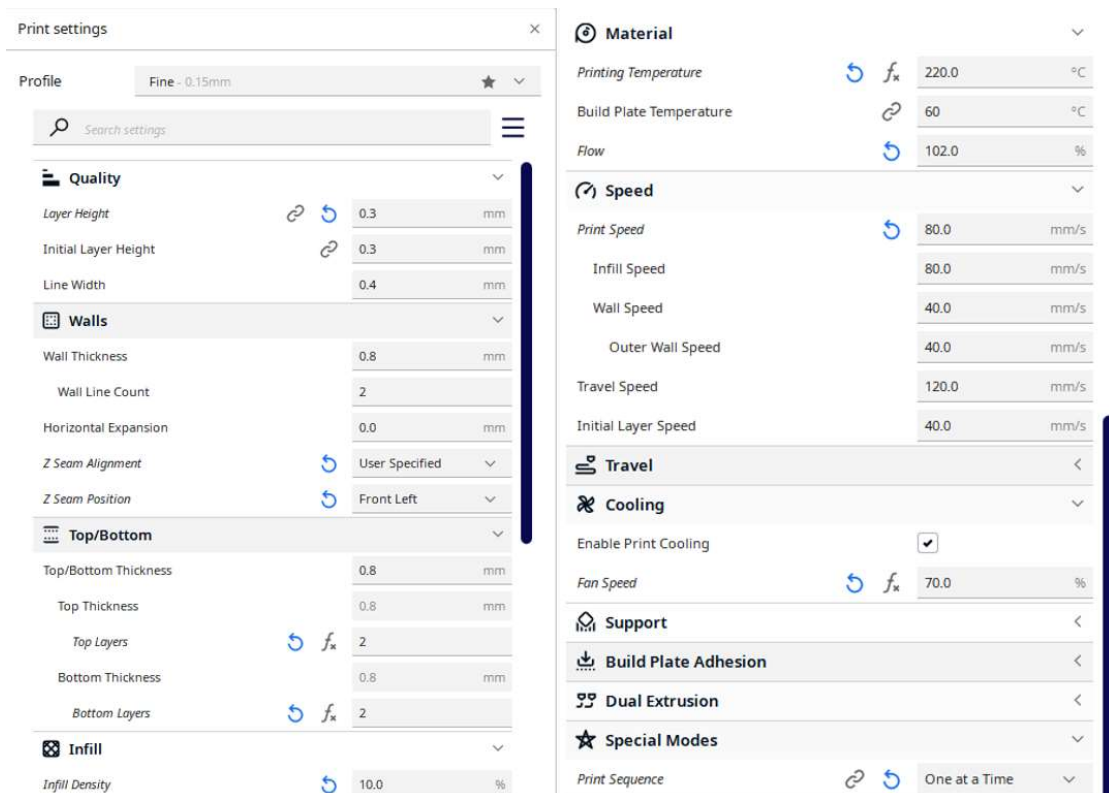


10. ábra: Tervezett mintadarabok

Mintadarabok tervezése kimetszési technikák tesztelésére Fusion 360 programmal történt. (10. ábra) A tervezés során elsődleges cél a mérni tervezett paraméterek hangsúlyozása és az egyéb esetlegesen felmerülő problémák eliminálása. A nyomtatáshoz használt gép Homer's Odysseus 3D nyomtató, ez egy széles körben elterjed típus bowden-extrudálású 220mmx220mmx250mm nyomtatási kapacitással, rendelkező, közép árkategóriás, a 3D nyomtatásban úttörő Prusa i3 FDM nyomtató másolata. Mivel a 3D nyomtatóm bowden extruder elrendezésű valamint a nyomtatófeje rossz hőátadási tényezővel működik, a mintadarabokat úgy terveztem hogy a nyomtatás során a réteg ne

szakadjon meg, így az esetleges retrakció hiba elkerülhető. Ilyen esetekben ugyanis a nyomtató fej átlépi a réteg kontúráját, és az alapanyag visszahúzás ellenére képes vékony szálakat és hibákat, kinövéseket produkálni a termék falán mind a kontúrból való kilépés, mind a belépés helyszínén. Ezt a problémát úgy oldottam meg, hogy üreges hasáb alakú testeket hoztam létre, amelyeknek csak az első falán látható kivágás, a hátsó fal pedig teljesen megszakítás nélküli. Erre azért volt szükség, mert az FDM 3D nyomtatáshoz alkalmazott szeletelőprogramokban mind van olyan lehetőség, amely kényszeríti a fej mozgásának pályáját olyan úton, hogy amennyiben két pont között van olyan út, ahol nem lép ki a fűtött fűvóka fej az adott réteg kontúrából, úgy a kontúron belül navigáljon el egyik pontból a másikba. Megadható az is, hogy ez mekkora mértékű útvonal nagybodás esetén hajtsa csak végre, amely nyomtatási időt tud csökkenteni, sok esetben a minőség kárára. A tervezés minden mintadarab vizsgálata után felmerülő észrevételek alapján több szakaszban valósult meg, ezen folyamat lépéseit a mintadarabok vizsgálata fejezetben részletezem.

3.2 Mintadarabok nyomtatása



11. ábra: Nyomtatási beállítások

A nyomtatás és a mérés során Fyberlogy R-PLA filamentet használok, ez egy kifejezetten könnyen használható filament típus mivel alacsony hőmérséklettel nyomtatható, minimális hőtágulása okán nem hajlik hűlés során, és homogén szerkezete miatt nem tömíti el a nyomtató fúvókáját. A próbatestek gyártásához és a legtöbbször alkalmazott beállításaimat alkalmazom (11. ábra), minimális változtatással. (11. ábra) A rétegvastagságot a gyakori 0,2-0,25 milliméterről 0,3 milliméterre növeltem, hogy az esetleges problémák feltűnőbbek és könnyebben mérhetőek legyenek. A nyomtatás hűtését alacsonyabbra vettem, hogy az esetleges kihajlásoknál felmerülő lehajlás meghatározóbb legyen. Ezen beállítások optimalizálásával csökkenthető az alakhelyesség eltérése, de én elsősorban a tervezési szakasz optimalizálására törekszem, nem a nyomtatási beállítások finomhangolására.

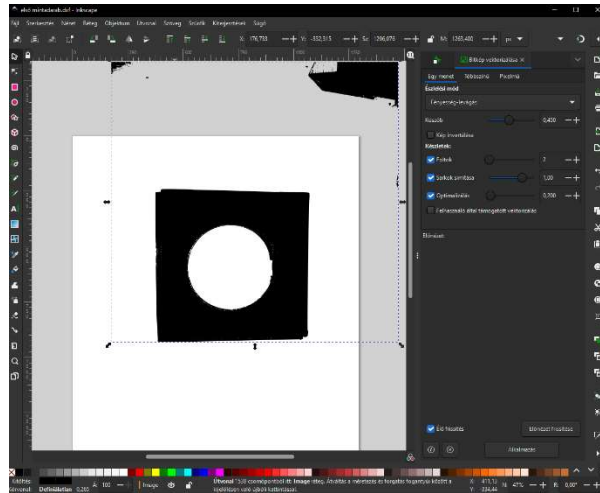
3.3 Mintadarabok kiértékelése

A megtervezett négyzet és kör keresztmetszetű modellekből 3-3 darabot nyomtattam ki a megbízhatóság és a sikeres mérési eredmény elérése érdekében. A mintadarabokat nyomtatás után lefényképeztem azonos távolságról azonos pozícióban. (12. ábra) Ezt egy nagy fókusz távolságú objektívvel felszerelt kamerával és egy erre a célra készített állvánnyal tudom biztosítani. A mintadarab háttérében elhelyezek egy referencia vonalat, amivel később a pontos méretezést fogom végezni. Lefényképezés után a mintadarab képét egy fénykép szerkesztő programmal (Inscape) átalakítom. (13. ábra)



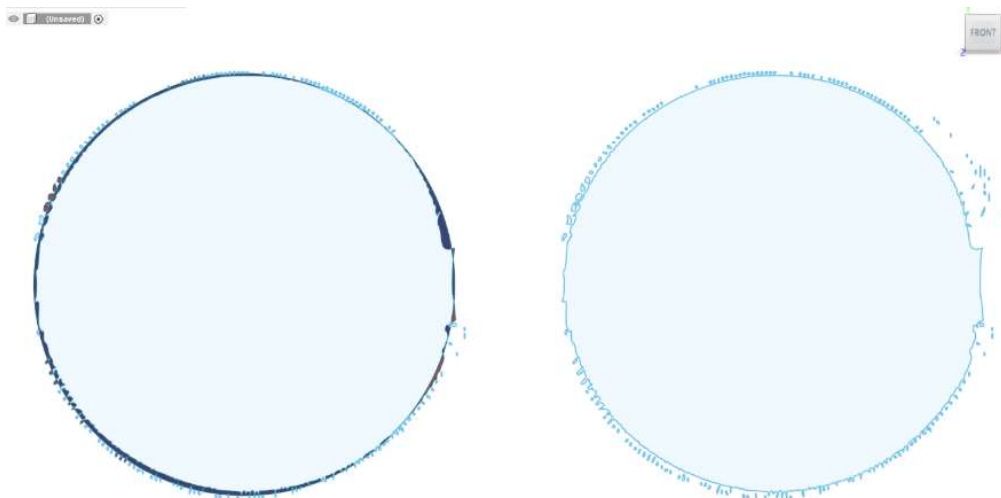
12. ábra: Mintadarab fénykép

A fénykép fehér egyensúlyának és kontrasztjának módosításával éles körvonalat tudok létrehozni a mintadarab képén, amit a program automatikusan felismer és DXF formátumban lementhető vektoros útvonalat húz rá.



13. ábra: Fénykép feldolgozása Inkscape programmal

Ezután a DXF file importálom Fusion 360 programba, ahol a referencia vonallal pontosan tudom méretezni és összevetni az eredeti mintadarab vonalaival. (14. ábra) Így meghatározhatom a maximális eltérést és az eltérés felületét is mm^2 -ben. Kiértékelésnél külön méretezem a negatív és pozitív eltérést, negatívként a tervezet vonalon kívül eső-, és pozitívként a vonalon belül található eltérést. Más szóval ez azt jelenti, hogy a pozitív eltéréssel a furat belső mérete kisebb lesz, tehát anyag többlet áll fenn, míg negatív eltérés esetén anyaghiány áll fenn, a belső méret nagyobb.



14. ábra: A referenciavonal és a DXF vonal

3.2.1 Kör urat mintadarabok kiértékelése

A kapott értékeket táblázatban összesítettem. (1. táblázat) A furaton mérés előtt négy elkülönülő szakasz deduktív módon kikövetkeztethető a két legmeghatározóbb faktor figyelembevételével melyek az ív szakasz által átmetszett rétegvonalak száma, és a folyékony filament extrudálás után a megfolyásának mértéke, amely első sorban az alátámasztás hiányával és a nyomtatási hőmérséklettel függ össze. Ez alapján a furatot 4 ív szakaszra bontottam (15-18. ábra):

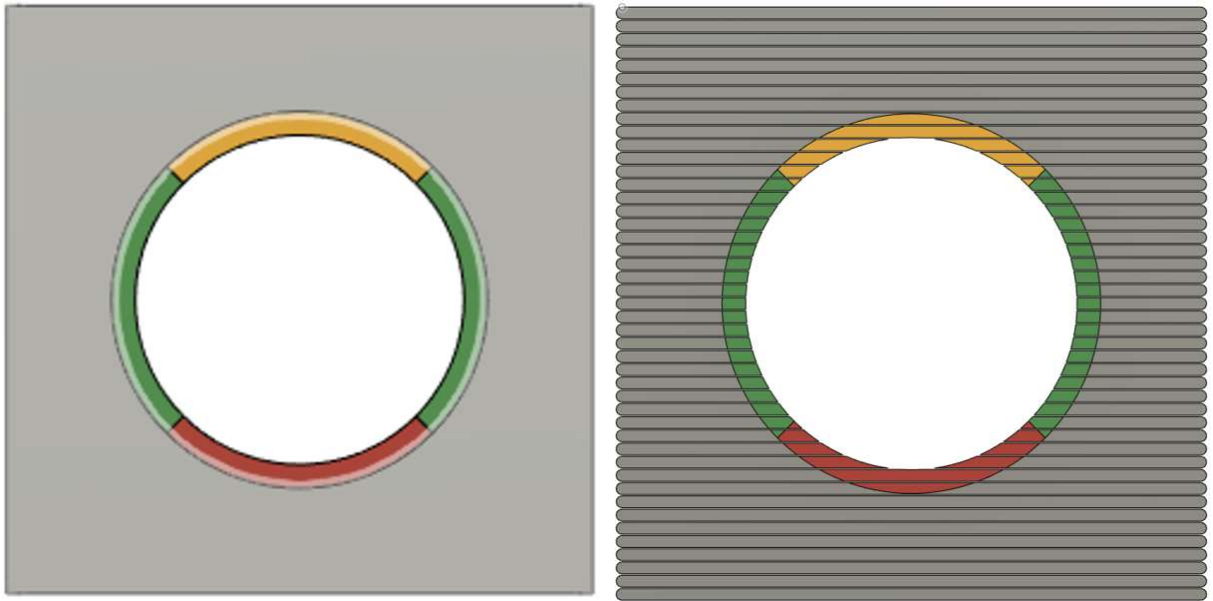
-felső ív (sárga)

-oldalsó ívek (zöld)

-alsó ív (piros)

A legnagyobb figyelem természetesen a sárga szakaszt övezi, hiszen az előző rétegek által nyújtott alátámasztás azt a szakaszt nem éri el már olyan mértékben, mint a zöld vagy piros szakaszokban. A szakasz kezdete mindkét oldalon a 45° alátámasztás felett kezdődik el, azaz annál a szakasznál, ahol a legtöbb alapértelmezett 3D nyomtatási profil már alátámasztást építene be azok alap beállításaiiban. Ezen területek színnel kiemelve az alább képen jelöltem (15. ábra), valamint mellette egy a nyomtatás során megjelenő rétegeket feltüntettem reprezentációs céllal.

Fontos megjegyezni, hogy az ábrákon az X irány az építés során a fej és az asztal relatív mozgásával egybeeső, tehát az ábrákon felfelé mutató irány, míg az Y irány az ábrákon oldalirányú irányt jelenti. Azaz az X irányú eltérés a kivágások középpontjából a sárga és piros irányokat foglalja magába, míg az Y irány a zöld szakaszokat veszi főként figyelembe.



15. ábra: A kör alakú kivágások tagolása

Az első mintadarabok vizsgálata után egyértelműen látszik, hogy változtatás első sorban a felső íven (sárga) szükséges (1. táblázat), ahogy ez feltételezhető volt a mérés előtt is, a korábban részletezett alátámasztás hiánya és a meg nem szilárdult alapanyagra ható gravitáció erő lehúzása miatt. Ezen szakaszon volt a legmeghatározóbb a körívtől való eltérés, amit első sorban a rétegek generálása során keletkező pontatlanság és az alátámasztás nélküli rétegek nyomtatása során megjelenő hasasodás okoz. A következő mintadarabokkal ezt két faktor próbálom meg limitálni a gyengén alátámasztott rétegek kihajlási szögének csökkentésével és az első teljes átívelő réteg felfelé elmozdításával. Az alsó ív (piros) legszámottevőbb alakhelyességi eltérését az okozza, hogy az alsó ív legalsó része kevés réteget metsz ezért komolyabb kerekítéssel generálja a slicer program (CURA) a nyomtatáshoz szükséges G-kódot. Ezt lehetséges kompenzálni kisebb rétegvastagsággal, azonban a jelenlegi feladat nem igényli ezt a módosítást. Azonban mivel minden réteg tökéletesen alátámasztással lett nyomtatva, az eltérés nem meghatározó a piros szakaszon, amennyiben eltekintek a rétegvastagság okozta pontatlanságaktól, amelyek szándékosan kerültek létrehozásra. A két oldalsó íven (zöld) az alátámasztás hiányának mértéke kisebb, mint hogy jelentős elváltozást okozzon, ezen felül az ív ezen a szakaszon metszi a legtöbb rétegvonalat, így a furat alakhelyessége itt a legjobb.

Ezek alapján a módosított furat tervezésénél elsődleges célom az lesz, hogy a felső ív behajlását és hasasodását csökkentsem, anélkül, hogy a furat negatív eltérését, azaz az érintett szakaszon mérhető belső méretet jelentősen növelném, ami esetleges későbbi illesztéseknél (csapágyak, csapok, rudak) a felfekvési felületet csökkentené.

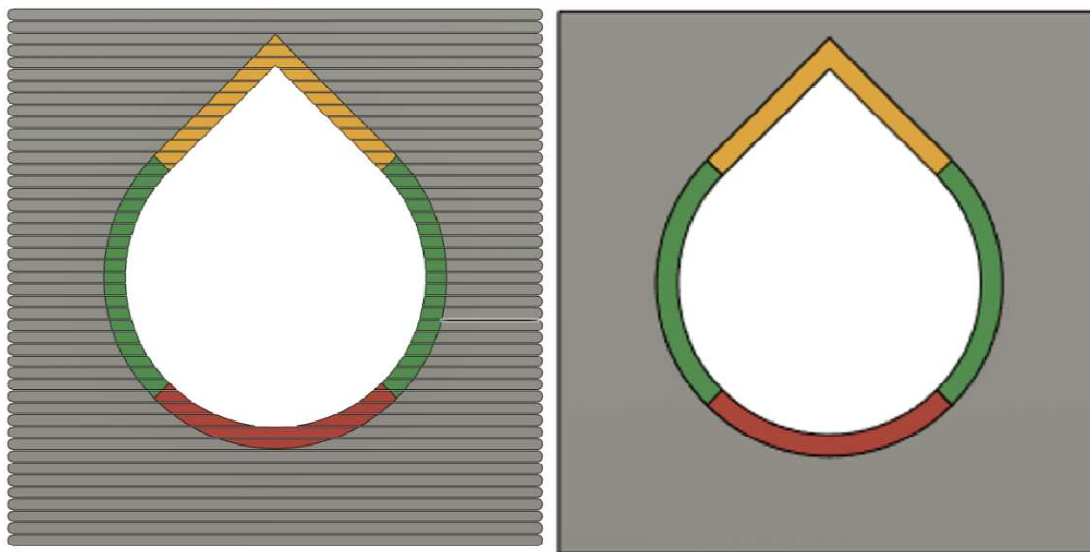
		Maximum eltérés X-tengelyen		Maximum eltérés y-tengelyen		Eltérés felülete	
		Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív
	Mintadarab1	0,623mm	0,070mm	0,235mm	0,100mm	9,663mm ²	7,154mm ²
	Mintadarab2	0,908mm	0,967mm	0,958mm	0,982mm	7,700mm ²	7,095mm ²
	Mintadarab3	0,945mm	0,058mm	0,971mm	0,011mm	10,561mm ²	6,508mm ²

1. táblázat: A furat munkadarabok mért értékei

Az első mérés eredménye alapján a függőleges irányú eltérés értéke jelentős, 0,6-1 mm mértékű átmérő csökkenést, azaz pozitív hibát jelent (1. táblázat). Ekkora hibával egy csapágy beszerelése gyakorlatilag nem lehetséges, a termék megsérülne, vagy akár el is törne az illesztés során. A függőleges irányú negatív hiba a második mérési mintán szintén jelentős mértékű, azonban a másik két darab eredménye alapján elmondható, hogy ez gyártási hibát, selejtet jelent, mivel az eltérések között egy teljes nagyságrendnyi hiba található.

A furat oldalirányú eltérése a névleges mérethez szintén jelentős mértékű a második minta esetén negatív irányban, közel egy nagyságrendnyi értékkel nagyobb a furat a névleges méretnél. Megfigyelhető itt is jelentős mértékű eltérés a pozitív irányú hibában is, amikor anyagtöbblet áll fenn. Ennek oka minden valószínűség szerint az, hogy az FDM nyomtatás során a tárgyak valamivel „húsosabbak”, mint a névleges modell. Erre a jelenségre a megfelelő kompenzációs eljárások már kidolgozásra kerültek, a szeletelőszoftverek képesek alkalmazni a legtöbb esetben.

Az eredeti test esetén a furat felső ívének közepe jelentős mértékben behajolt, amely lehetetlenné tenné a szerelést és illesztést, ezért a következő lépésben a felső ívszakaszon fogok módosításokat elvégezni annak érdekében, hogy a lehajlás, amennyiben nem is szűnik meg, ne okozzon szerelési összeférhetetlenséget.



16. ábra: Az első módosítás a kör kivágásokon

Az első módosítással a mintadarab tervezésénél a felső ív alátámasztottságának növelésével próbáltam a lehajlást felszámolni (16. ábra), valamint a felső keresztező szakasz eltüntetésével szüntettem meg a felmerülő hasasodást. Ennél a mintadarabnál ezt csak a körívtől való jelentős eltéréssel tudtam megvalósítani. (16. ábra)

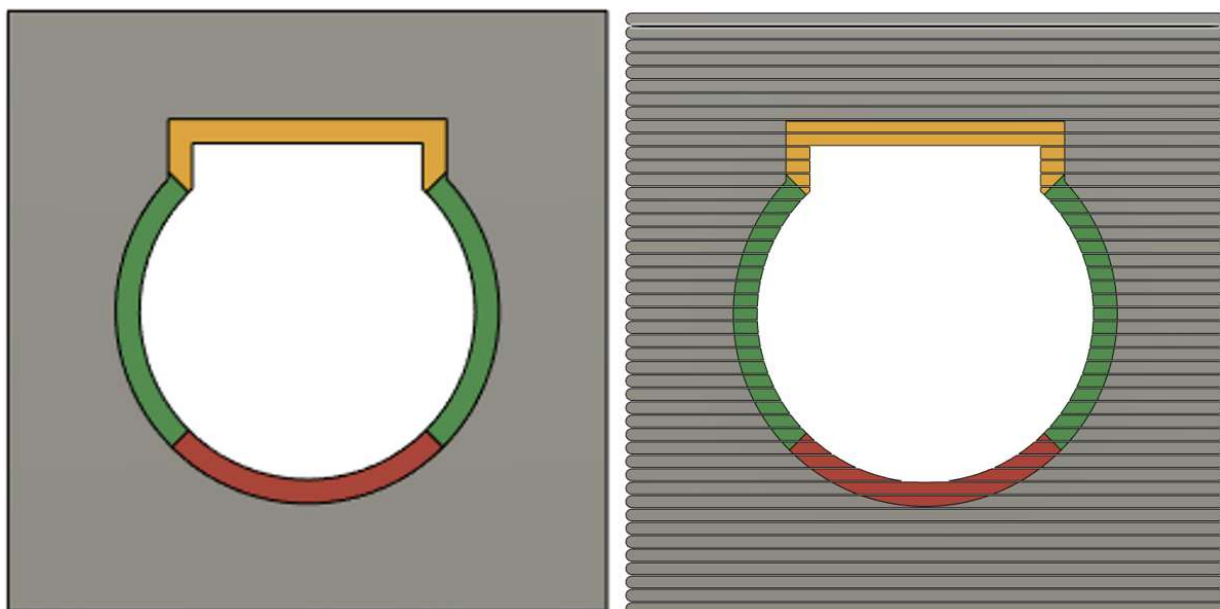
Az első mintadarab módosítással észrevehetővé vált, hogy a 45° -os felülettel az alátámasztás nélkül nyomtatott réteg kihajlásának hosszát olyan mértékben le lehet csökkenteni, hogy az ebből következő pontatlanság elenyészővé váljon, ezért a körív 45° -ot meghaladó szakaszában érintőt húztam mindkét oldalon, ezzel egy háromszög jellegű alakot létrehozva felül. A 45° -is felülettel maximalizáltam a kihajlás mértékét. A kapott alaksajátosság csepp alakú. A mért értékekből látszik (2. táblázat), hogy a pozitív eltérés a függőleges x-tengelyen nullához közelít (ami különbség mérhető az az alsó íven jelenik meg). Sikertült megszüntetni a függőleges irányú anyagtöbbletből és lehajlásból adódó túl szoros illesztés miatti szerelhetetlenséget a csepp alakú torzítással (2. táblázat. Ezzel a megoldással egy szerelt csap a hengeres palástjának háromnegyedén fekszik fel a kialakított fészekben.

Ezzel szemben a negatív különbség jelentősen megnőtt, hiszen jóval távolabb került a középponttól függőleges irányban a csepp alak csúcsa az eredeti körívtől. Az oldalirányú, Y tengelyű eltérések mértéke nem változott, mert nem állítottam be kompenzációs értéket a test tágulása ellen. Ez a dolgozat folyamán nem fog megváltozni.

		Maximum eltérés X-tengelyen		Maximum eltérés y-tengelyen		Eltérés felülete	
		Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív
	Mintadarab4	0,068mm	5,938mm	0,124mm	0,129mm	0,375mm ²	17,237mm ²
	Mintadarab5	0,026mm	5,927mm	0,941mm	0,979mm	3,426mm ²	18,808mm ²
	Mintadarab6	0,096mm	5,978mm	0,065mm	0,024mm	0,997mm ²	14,946mm ²

2. táblázat: A kör kivágások első módosításának eredményei

A furat első módosításával elértem, hogy a csapágy, csap, vagy egyéb kör keresztmetszetű illeszkedő tárgy sikeresen kapcsolódhasson a geometriába. Azonban ennek ára az volt, hogy jelentős mértékben eltért a kialakított kivágás alakja a kör keresztmetszettől.



17. ábra: A kör kivágás második módosítása

A második módosítással elsősorban a korábbi függőleges x-tengelyen mért meghatározó eltérést igyekeztem optimalizálni, a felső keresztező szakaszt 1mm-el megemeltem az eredeti kör felső pontjához képest, így a hasasodás során nem keletkezik jelentős pozitív eltérés (17. ábra), sőt, talán pont annyira hasasodik le az anyag, hogy a felső ponton meg is tudja támasztani az illesztett alkatrészt. Ezen felül a 45°-ot meghaladó ív szakaszt függőleges kimetszéssel való eltüntetésének hatását próbáltam megvizsgálni.

A második mintadarab módosítás vizsgálata során kiderült, hogy nem szükséges a függőleges felülettel való eltüntetés a 45°-nál nagyobb behajlású ívnek, mivel nem lett kevesebb pozitív eltérés, ellenben a keletkező felső keresztező szakasz hosszát jelentősen megnöveli. A hosszabb keresztező szakasz hossznövekedését elégségesen kompenzálta

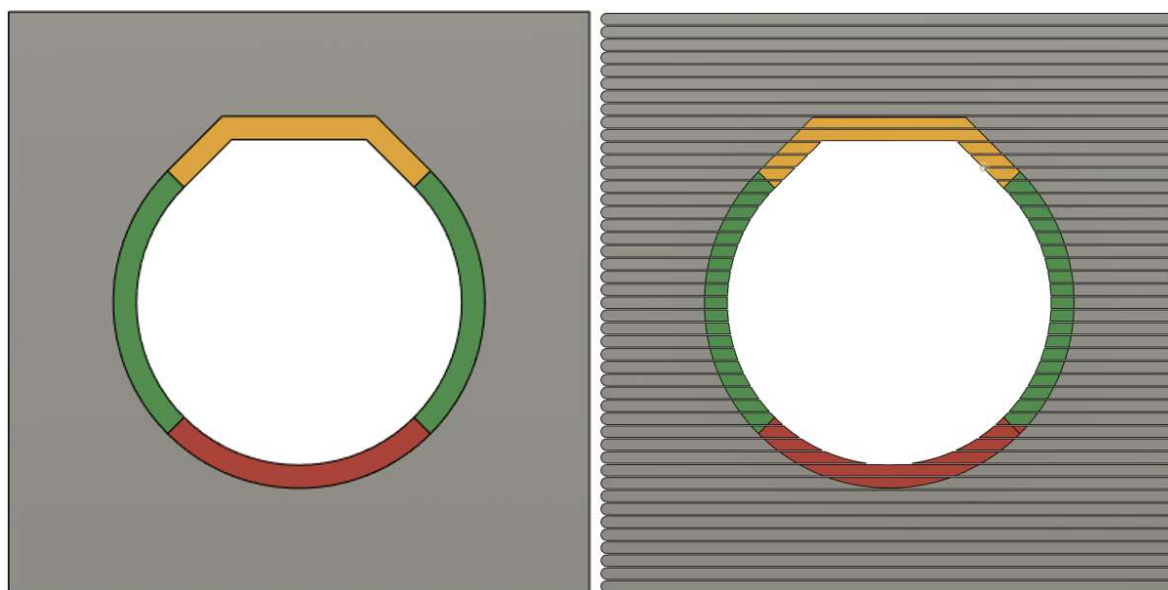
az 1mm-es eltérés a tervezett körívtől (3. táblázat), azonban emiatt felmerült a kérdés, hogy esetleges rövidebb átívelő szakaszon kisebb eltartással is biztosítani lehetne a pozitív eltérés növekedését.

		Maximum eltérés X-tengelyen		Maximum eltérés y-tengelyen		Eltérés felülete	
		Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív
	Mintadarab7	0,176mm	0,085mm	0,227mm	0,184mm	6,656mm ²	4,815mm ²
	Mintadarab8	0,941mm	0,979mm	0,958mm	0,971mm	5,941mm ²	5,338mm ²
	Mintadarab9	0,912mm	0,027mm	0,911mm	0,956mm	5,336mm ²	4,170mm ²

3. táblázat: Harmadik mintadarab mért értékei

A vizsgálat eredménye azt mutatja, hogy a légréssel kitöltött felület mértéke jelentősen csökkent az összes negatív eltérés felületét vizsgálva.

A harmadok módosítás tervezésekor, az előző módosított geometria vizsgálata során megállapítottam, hogy nem szükséges a függőleges kivágás, így az első és második módosítás sajátosságait ötvözöm egy olyan megoldásba, ahol a 45°-os kilógást megtartom, majd a csepp alak tetejét levágom egy vízszintessel (18. ábra), 0,5mm-el az eredeti kör alak felett, teret adva a kis méretű vízszintes alaksajátosság lehajlásának.



18. ábra: A kör kivágás harmadik módosítása

Ezzel a megoldással sikerült kiküszöbölni mindkét korábbi módosítás hibáit, megtalálva talán az arany középutat: a függőleges tengelyen jelentősen kisebb az eltérés az eredeti körhöz (4. táblázat), valamint az első módosításban létrehozott csepp alakhoz képest, mindemellett a vízszintes áthidalás hossza is jelentősen csökkent a második módosításban alkalmazotthoz képest. A rövid vízszintes szakaszon létrejött lehajlás, hasasodás mértéke

is kisebb lett, ezzel a modell is közelebb került az eredeti kör felső pontjához.

		Maximum eltérés X-tengelyen		Maximum eltérés y-tengelyen		Eltérés felülete	
		Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív
	Mintadarab10	0,197mm	0,196mm	0,279mm	0,257mm	2,588mm ²	3,722mm ²
	Mintadarab11	0,971mm	0,945mm	0,979mm	0,901mm	2,180mm ²	3,749mm ²
	Mintadarab12	0,089mm	0,075mm	0,983mm	0,902mm	2,202mm ²	3,707mm ²

4. táblázat: A harmadik kör módosítás mérési eredményei

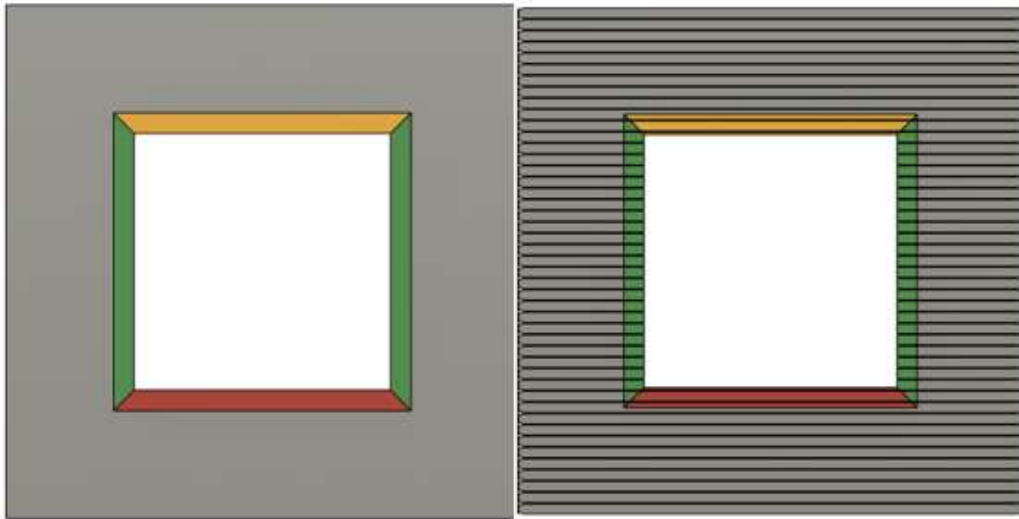
A mérési eredmények alapján a geometria megfelelő lehet az elvárásaimnak, ugyanis a függőleges irányú anyag többlet és anyaghiány mértéke is alacsony, valamint az eltérések felülete is igencsak alacsony tud maradni, egy nagyságrenddel kisebb, mint egyes korábbi modelleké.

3.3.1 Négyzetes furat mintadarabok kiértékelése

A kör keresztmetszetű kivágások vizsgálata után megvizsgáltam négyszögletű kivágások eltéréseit és javítási lehetőségeit is. A négyzetes furaton mérés előtt négy elkülönülő szakasz deduktív módon kikövetkeztethető a két legmeghatározóbb faktor figyelembevételével melyek az él szakasz által átmetszett rétegvonalak száma, és a folyékony filament extrudálás után a megfolyásának mértéke, amely elsősorban az alátámasztás hiányával és a nyomtatási hőmérséklettel függ össze. Ez alapján a furatot 4 ív szakaszra bontottam (19-21. ábra):

- felső él (sárga)
- oldalsó él (zöld)
- alsó él (piros)

Hasonlóképp a kör keresztmetszetű kivágáson végzett vizsgálathoz, itt is a felső, sárga él kerül a figyelem középpontjába. Ezen területek színnel kiemelve a 19. képen jelöltem, valamint mellette egy a nyomtatás során megjelenő rétegeket feltüntettem reprezentációs céllal.



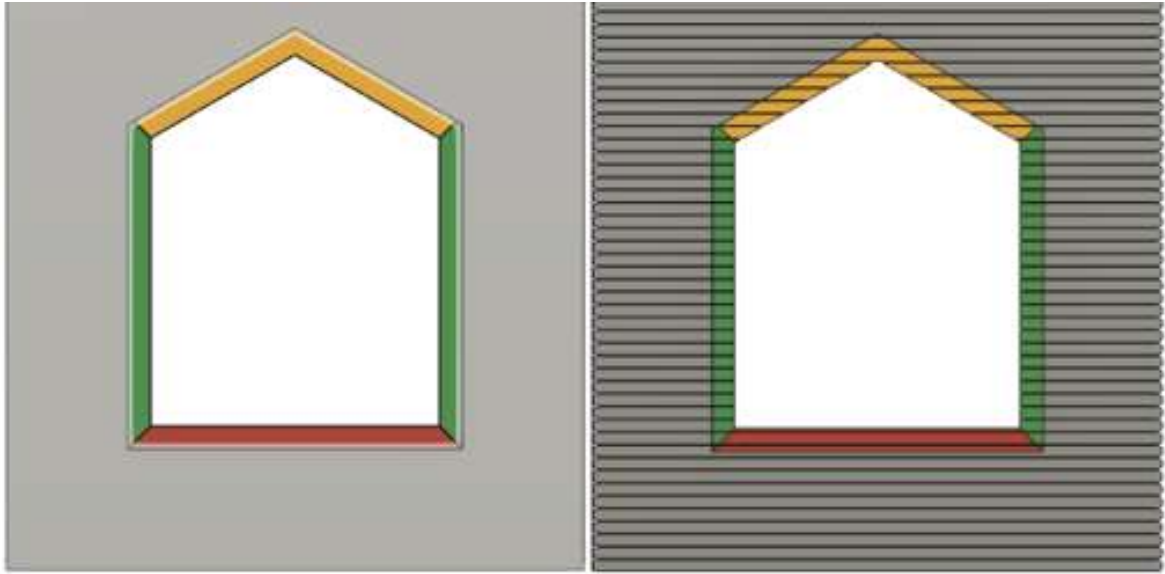
19. ábra: A négyzet keresztmetszetű kivágás

Az első mintadarab vizsgálata után egyértelműen látszik, hogy változtatás első sorban a felső síkon (sárga) (19. ábra) szükséges (a körívez hasonlóan), ez feltételezhető volt a mérés előtt is. Ezen szakaszon volt a legmeghatározóbb az egyenestől való eltérés, amit első sorban a rétegek generálása során keletkező pontatlanság és az alátámasztás nélküli rétegek nyomtatása során megjelenő hasasodás okoz (5. táblázat). A következő mintadarabokkal ezt két faktor próbálom meg limitálni a gyengén alátámasztott rétegek kihajlási szögének csökkentésével és a teljes átívelő réteg felfelé elmozdításával, ezzel kompenzálva a hasasodást.

Ezek alapján a módosított furat tervezésénél elsődleges célom az lesz, hogy a felső ív behajlását és hasasodását csökkentsem, anélkül, hogy a furat negatív eltérését jelentősen növelném, ami esetleges későbbi illesztéseknél (téglatestek, hasábok) a felfekvési felületet csökkentené.

		Maximum eltérés X-tengelyen		Maximum eltérés y-tengelyen		Eltérés felülete	
		Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív
	Mintadarab1	0,562mm	0,095mm	0,275mm	0,189mm	4,331mm ²	2,715mm ²
	Mintadarab2	0,951mm	0,924mm	0,975mm	0,981mm	7,289mm ²	2,580mm ²
	Mintadarab3	0,948mm	0,074mm	0,940mm	0,022mm	8,371mm ²	3,332mm ²

5. táblázat: A négyzet alakú kivágások mért értékei



20. ábra: A négyzet alakú kivágás első módosítása

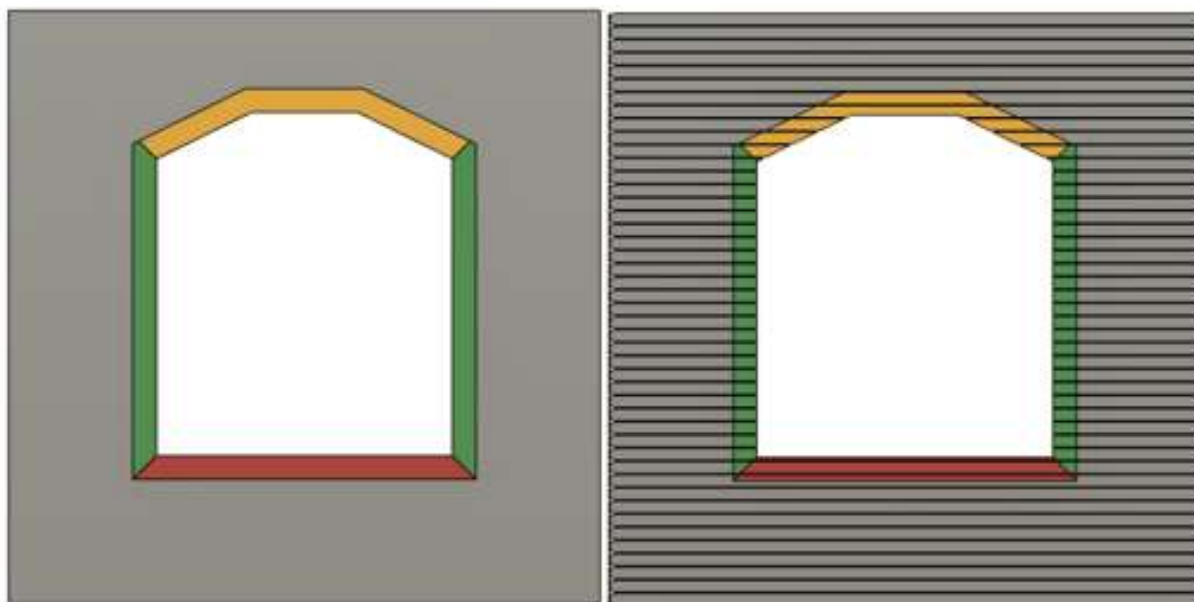
Az első módosítással a mintadarab tervezésénél a felső sík alátámasztásának növelésével próbáltam a lehajlást felszámolni (20. ábra), valamint a felső keresztező szakasz eltüntetésével szüntettem meg a felmerülő hasasodást. Ennél a mintadarabnál ezt csak a tervezett éltől való jelentős eltéréssel tudtam megvalósítani.

Az első mintadarab módosítással észrevehetővé vált, hogy a 60°-os felülettel az alátámasztás nélkül nyomtatott réteg kihajlásának hosszát olyan mértékben le lehet csökkenteni, hogy az ebből következő pontatlanság elenyészővé váljon. A mért értékekből látszik (6. táblázat), hogy a pozitív eltérés a függőleges x-tengelyen nullához közelít (ami különbség mérhető az az alsó íven jelenik meg) Ezzel szemben a negatív különbség jelentősen megnőtt.

		Maximum eltérés X-tengelyen		Maximum eltérés y-tengelyen		Eltérés felülete	
		Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív
	Mintadarab7	0,217mm	0,083mm	0,155mm	0,219mm	5,920mm ²	10,552mm ²
	Mintadarab8	0,967mm	0,933mm	0,926mm	0,929mm	1,211mm ²	3,098mm ²
	Mintadarab9	0,940mm	0,050mm	0,942mm	0,969mm	1,282mm ²	11,107mm ²

6. táblázat: A négyzet alakú kivágás első módosításának eredményei

A második módosítással elsősorban a korábbi függőleges x-tengelyen mért meghatározó eltérést igyekeztem optimalizálni. A felső keresztező szakaszt 0,5mm-el megemeltem így a hasasodás során nem keletkezik jelentős pozitív eltérés (21. ábra).



21. ábra: A négyzet alakú kivágás második módosítása

Ezen felül a 45° -ot meghaladó sík szakaszt függőleges kimetszéssel való eltüntetésének hatását próbáltam megvizsgálni. A második mintadarab módosítás vizsgálata során kiderült, hogy nem szükséges a függőleges felülettel való eltüntetés a 45° -nál nagyobb behajlású ívnek, mivel nem lett kevesebb pozitív eltérés (7. táblázat), ellenben a keletkező felső keresztező szakasz hosszát jelentősen megnöveli. A hosszabb keresztező szakasz hossznövekedését elégségesen kompenzálta az 0,5mm-es eltérés a tervezett síktól, azonban emiatt felmerült a kérdés, hogy esetleges rövidebb áthidaló szakaszon kisebb eltartással is biztosítani lehetne a pozitív eltérés növekedését.

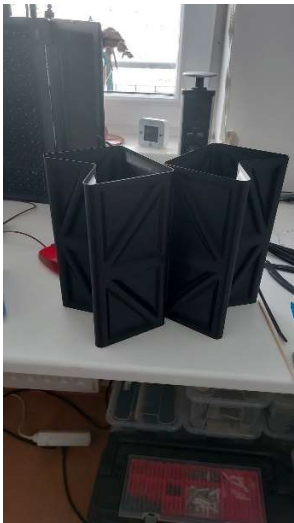
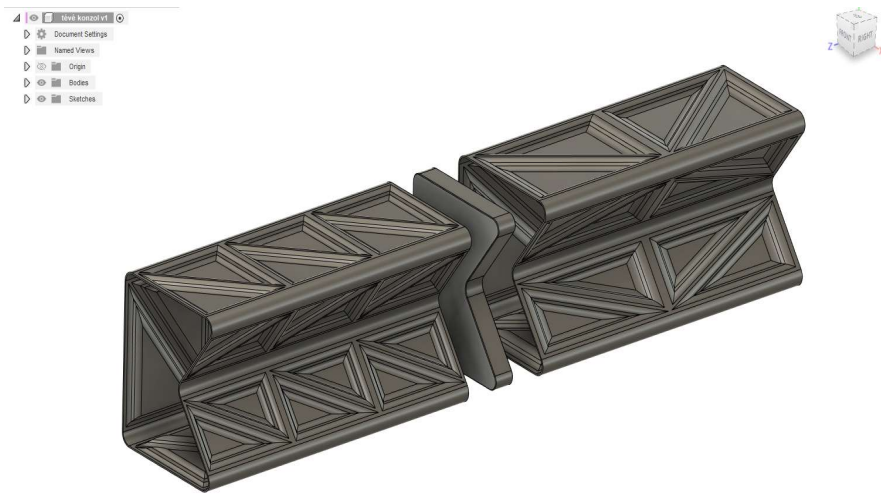
		Maximum eltérés X-tengelyen		Maximum eltérés y-tengelyen		Eltérés felülete	
		Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív	Pozitív	Negatív
	Mintadarab10	0,123mm	0,121mm	0,306mm	0,332mm	0,158mm ²	3,595mm ²
	Mintadarab11	0,979mm	0,137mm	0,695mm	0,998mm	0,970mm ²	3,425mm ²
	Mintadarab12	0,083mm	0,015mm	0,966mm	0,916mm	0,106mm ²	3,589mm ²

7. táblázat: Harmadik mintadarab mért értékei

4. KONCENTRÁLT KITÖLTÉS BEMUTATÁSA

Nyomtatási idő az egyik legmeghatározóbb limitáció a 3D nyomtatási technológiák alkalmazásában. Ezért a nyomtatási idő csökkentésére számos fejlesztés van folyamatban, ezek elsősorban az alkalmazott anyag kötési idejének csökkentését és a nyomtató fej mozgásának gyorsítását célozzák. Ezeknél sokkal jelentősebb különbséget lehet elérni, ha a nyomtatás előtt a technológia limitációit figyelembe véve tervezünk. A nyomtatási idő csökkentésére bemutatott technika egyezményes mérése a felhasználhatóság változatossága miatt adott példákon kívül nem megvalósítható, ezért lényegi leírással mutatom be a működését. A technika a koncentrált kitöltés. A technika elsődlegesen nyomtatott felületet csökkentésére alkalmas, amin keresztül nyomtatási időt csökkentünk (másodlagos előnye, hogy kevesebb anyagot használnak fel).

A koncentrált kitöltés lényege, hogy teljese kitöltés helyett a nyomtatás során külön nyomtatom a modell külső héját és a szükséges területeken a kitöltést, amit később szerelek össze. Ez a technika első sorban nagyobb testek nyomtatása során alkalmazható, mivel itt különíthető el hatékonyan a nagyobb alátámasztást nem igénylő terület az alátámasztással biztosítani szükségessé. Ezen technika alkalmazása látható a 22. ábrán, ahol a hosszú idomokat kitöltés, alsó felső réteg és többszörös fal nyomtatása nélkül nyomtattam és kitöltést csak a kisebb középső idomnál alkalmaztam. Így összesen 4 idom nyomtatása során a nyomtatási idő 4 nap 8 óra nyomtatás helyett összesen 16 óra nyomtatással minden idomot ki tudtam nyomtatni.



22. ábra Koncentrált kitöltés

A koncentrált kitöltés legnagyobb különbséget olyan nyomtatási technológiáknál okoz leginkább nagy különbséget, ahol az anyag megkötése kis felületen történik (pl.: FDM, LOM, kötőanyag sugárzás), mivel a nyomtatási út csökkentése ezen technológiáknál függ szorosan össze a nyomtatási idővel. Nyomtatási idő csökkentésére számos beállítás található a legtöbb szeletelő programban, ezen beállítások azonban jóval kisebb különbséget eredményeznek. Természetesen ez a technika csökkenti a nyomtatott modell statikai terhelhetőségét, de szemben azzal, hogy a belső kitöltés százalékát csökkentjük ezen technika alkalmazásával a terhelhetőség csak bizonyos területeknél csökken.

A

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatomhoz végzett mérési munkám során felvázoltam egy jelenséget, amellyel még napjainkban is szembeötlő nehézségeket tapasztalhatnak az amatőr és profi FDM 3D nyomtatás alkalmazása során. A probléma az eljárás során annak működési sajátosságából akad. A nyomtatás során a forró anyag megfolyik, és természetes módon a gravitáció hatására le szeretne folyni az alátámasztás nélküli, vagy gyengén alátámasztott helyekről. Ezzel a munkadarabok függőleges palástfelületein kialakított kivágások alakját képes torzítani. Ez a jelenség akár olyan mértékeket is ölthet, amely meggátolja, hogy a nyomtatott termék szerelhetővé váljon az illeszteni kívánt alkatrészekkel, amennyiben nem végeznek el rajta jelentős mértékű, emberi időt és energiát igénylő utómunkálatokat.

A méréseim részét képezte, hogy első sorban megvizsgáltam egy névleges méretűre modellezett kör, valamint négyzet keresztmetszetű kivágást. A kialakított modelleknél figyelembe kellett venni azt is, hogy a nyomtató fej mozgása során képes gyártási hibákat is produkálni azon helyeken, ahol kilép a test kontúrjából. Ezt kiküszöbölendő olyan rétegeket alakítottam ki, amelyek nincsenek megszakítva, így a szeletelő program kényszeríthető volt arra, hogy ne hagyja el a kontúrvonalat.

Létrehoztam egy olyan mérési környezetet állványzat és kamera segítségével, amelyben ismételhető és pontos mérések végezhetők el a sikeres és hasznosítható számításokhoz. A mérésekhez fényképeket készítettem a megtervezett környezetben a minta testekről, valamint a mögöttük elhelyezett, a mérések könnyítésére létrehozott segédvonalakat is alkalmaztam. Az elkészült fényképeket egy képszerkesztő szoftver segítségével úgy módosítottam, hogy a kivágások kontúrjai kiemelhetőek legyenek belőle vektorgrafikus formában. A vektorgrafikus fájlokat visszahelyeztem a CAD szoftverbe, ahol össze tudtam vetni a segédvonalak felhasználásával skálázott vektort az eredeti kivágás modelljével. Az összehasonlítás során méréseket tudtam elhelyezni a vektor pontjai és az eredeti kivágás kontúrpontjai közé, amellyel meg tudtam határozni az eltérést a valódi test és a CAD modell között.

Az első méréshez elkészítettem a névleges méretű kör és négyszög kivágású mintákat. Az összehasonlítás során megállapítottam, hogy mindkét esetben megjelent a hasasodás a nyomtatás során, amely szerelési nehézségeket okozhat. A függőleges, Y irányú, pozitív

anyagtöbblet, azaz a hasasodás mértéke, amellyel az illesztés átfedése megnövekedett, közel 1 mm mértékű volt. Ez egy illesztés esetén elfogadhatatlan, valóban utómunkát igényel.

A kör keresztmetszetet csepp alakúra módosítottam, ezzel elértem, hogy 45° -nál meredekebb kinyúlás nincs a geometriában. A mérések alapján sikeresen kiküszöböltem az illesztési nehézségeket a hasasodás okán, azonban szerettem volna, ha a csepp alak csúcsa által okozott légrés nem lenne ekkora nagy mértékű. Ezért létrehoztam egy olyan modellt, amelyben a 45° -os érintő szakasztól függőlegesen emelkedik az alaksajátosság teteje, majd a két függőleges falat egy vízszintes áthidalással kötöm össze, 1 mm-rel az eredeti kör felett.

A függőleges falú a megoldás tulajdonképpen nem okozna szerelési nehézségeket, valamint a légrés mértéke is csökkent, azonban még esztétikusabb megoldás lehet, hogy a függőleges falakat a körrel 45° -os érintőkre cserélem, ezzel a vízszintes áthidaló méretét is csökkentve. A megoldás sikeresen lehetővé teszi a szerelést, nincs jelentős mértékű anyagtöbblet, azaz pozitív hiba az Y tengelyen, valamint a kis légrés miatt a negatív hiba mértéke is alacsony marad, ezáltal a pozitív és negatív hibák összes felülete is jelentősen lecsökkent az eredeti kivágáson mérthez képest. Számszerűsítve (felhasználva az 1.-8. táblázatok adatait) a kör alakú furat maximális eltérési felülete átlagos $9,3\text{mm}^2$ -ről $2,3\text{mm}^2$ -re, négyzetes furat esetében $6,7\text{mm}^2$ -ről $0,41\text{mm}^2$ -re csökkent, ami meghatározó különbség.

Ezek után a nyomtatási idő csökkentésének egy módját, a koncentrált kitöltés technikáját mutattam be. Ennek lényege, hogy a nyomtatott modell egyenletes kitöltése helyett külön nyomtatott külső héj és külön nyomtatott, csak a szükséges helyekre kerülő belső kitöltés összeszerelésével a nyomtatási időt csökkenthetem. Ez bizonyos mértékben kompromitálja a modell statikai tulajdonságait, ezért olyan esetekben, ahol a statikai tulajdonságok maximalizálása a cél semmiképpen nem alkalmazható. A bemutatás során felhozott példánál a nyomtatási időt csökkentettem 4 nap 8 óra nyomtatásról, 16 óra nyomtatásra (azonos nyomtatási sebességgel és rétegvastagsággal). A technika alkalmazása ugyan a statikai tulajdonságok bizonyos feláldozásával, de rendkívüli termelékenységi különbséget eredményezhet.

6. SUMMARY

During the measurement work I carried out for my thesis, I outlined a phenomenon with which, even today, amateur and professional FDM 3D printing users can experience glaring difficulties. The problem arises from its operational characteristics during the procedure. During printing, the hot material flows, and it naturally wants to flow down under the influence of gravity from unsupported or weakly supported areas. With this, it can distort the shape of the cutouts formed on the vertical cladding surfaces of the workpieces. This phenomenon can even reach such levels that it prevents the printed product from being assembled with the parts to be fitted, if a significant amount of post-production work requiring human time and energy is not carried out on it.

Part of my measurements was that I first examined a cut-out with a circular and square cross-section modeled to the nominal size. With the created models, it was also necessary to take into account the fact that during the movement of the printer head, it can also produce production errors in the places where it leaves the contour of the body. To eliminate this, I created layers that are not interrupted, so the slicing program could be forced not to leave the contour line.

I created a measurement environment with the help of scaffolding and a camera, in which repeatable and accurate measurements can be made for successful and usable calculations. For the measurements, I took photos of the sample bodies in the designed environment, and also used the auxiliary lines placed behind them, created to facilitate the measurements. With the help of an image editing software, I modified the completed photographs in such a way that the contours of the cutouts could be highlighted in a vector graphic form. I put the vector graphics files back into the CAD software, where I was able to compare the scaled vector using the guides with the model of the original cutout. During the comparison, I was able to place measurements between the points of the vector and the contour points of the original cutout, with which I was able to determine the difference between the real body and the CAD model.

For the first measurement, I prepared the samples with circular and square cutouts of the nominal size. During the comparison, I found that in both cases, splitting appeared during printing, which could cause installation difficulties. The vertical Y-direction positive material excess, i.e. the degree of splitting, by which the overlap of the joint increased,

was almost 1 mm. This is unacceptable in the case of a fitting, it really requires follow-up work.

I changed the circular cross-section to a drop-shaped one, thereby achieving that there is no projection steeper than 45° in the geometry. Based on the measurements, I successfully eliminated the fitting difficulties due to splitting, but I would have liked the air gap caused by the tip of the drop shape to not be so large. Therefore, I created a model in which the top of the feature rises vertically from the 45° tangent section, and then I connect the two vertical walls with a horizontal bridge, 1 mm above the original circle.

The solution with vertical walls would not actually cause installation difficulties, and the amount of air gap is also reduced, but an even more aesthetic solution could be to replace the vertical walls with 45° tangents to the circle, thus reducing the size of the horizontal bridge. The solution enables successful assembly, there is no significant excess of material, i.e. a positive error on the Y axis, and due to the small air gap, the amount of negative error remains low, thus the total surface area of positive and negative errors is significantly reduced compared to the original cutout. Quantified (using the data in tables 1-8), the maximum deviation surface of the circular hole decreased from an average of 9.3mm^2 to 2.3mm^2 , and in the case of a square hole from 6.7mm^2 to 0.41mm^2 , which is a decisive difference.

After that, I presented a way to reduce the printing time, the technique of concentrated filling. The essence of this is that instead of evenly filling the printed model, I can reduce the printing time by assembling a separately printed outer shell and a separately printed inner filling that only goes into the necessary places. This compromises the static properties of the model to a certain extent, so it cannot be used in cases where the goal is to maximize the static properties. In the example given during the presentation, I reduced the printing time from 4 days and 8 hours of printing to 16 hours of printing (with the same printing speed and layer thickness). The application of the technique may result in an extraordinary difference in productivity, albeit with a certain sacrifice of static properties.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] K. V. W. a. A. Hernandez, „A Review of Additive Manufacturing,” *International Scholarly Research Network*, 2012.
- [2] W. Conshohocken, „Standard terminology for additive manufacturing technologies,” *ASTM International*, pp. ASTM F2792-12a, 2012.
- [3] B. & X. X. W. Yuanbin, „Selection of additive manufacturing processes,” *Rapid Prototyping Journal*, 2017.
- [4] T. Y. M. R. R. D. M. I. M. & D. A. P. L. Ze-Xian, „Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques,” *Journal of Membrane Science*, 2016.
- [5] P. K. E. B. A. B. S. O. L. & C. C. A. M. T. Syed, „Additive manufacturing: scientific and technological challenges market uptake and opportunities,” *Materials today*.
- [6] M. Lang, „A publication of the Fabricators & Manufacturers Association,” 2017. [Online].
- [7] B. G. U. Y. & M. D. M. D. Ugur, „The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0,” *Procedia*.
- [8] & S. K. A. Muller, „How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain?,” *EZ's Global 3D printing*, 2016.
- [9] & M. J. I. J. W. Stansbury, „3D Printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities,” *Dental Materials*, 2016.
- [10] S. Y. K. H. K. Z. Y. L. X. Y. Y. W. C. H. T. S. & L. A. L. Y. Yee, „3D Printed Bio-models for,” *Rapid Prototyping Journal*, 2017.
- [11] C. Silbernagel, „Additive Manufacturing 101-4: What is material jetting?,” *Canada Makers*, 2018.
- [12] S. P. S. A. & S. M. B. S.K. Tiwari, „Selection of selective laser sintering materials for different applications,” *Rapid Prototyping Journal*, 2015.
- [13] C. L. Ventola, „Medical Application for 3D Printing: Current and Projected Uses,” *Medical Devices*, 2014.

- [14] Y. J. & F. W. S. Vikayavenkataraman, „3D Printing and 3D Bioprinting in Pediatrics,” *Bioengineering*, 2017.
- [15] Y. C. B. R. D. M. I. M. & D. P. Z. Low, „Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques,” *Journal of Membrane Science*, 2017.
- [16] P. Reddy, „Digital Light Processing,” *Think 3D*, 2016.
- [17] C. D. & R. V. D.J. Horst, „Additive manufacturing at Industry 4.0: a review,” *International Journal of Engineering and* , 2018.
- [18] B. D. Y. J. M. H. J. A. M. T. A. S. & T. M. P. J.H. Martin, „3D Printing of high-strength aluminium alloys,” *Nature*, 2017.
- [19] F. A.-S. P. W. B. H. M. H. W. H. M. M. & A. O. L. Hitzler, „Additive manufacturing of cobalt based dental alloys: analysis of microstructure and physicomechanical properties,” *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- [20] L. E. Murr, „Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication,” *Journal of Materials Sciences and Technology*, 2016.
- [21] H. L. W. J. S. Z. T. M. J. W. E. J. O. M. A. M. B. A. W.-H. A. D. & W. Z. T. DebRoy, „Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties,” *Progress in Materials Science*, 2018.
- [22] R. K. T. B. K. M. F. C. & A. V. B. E. Uhlmann, „Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components,” *Procedia CIRP*, 2015.
- [23] F. C. A. A. G. M. M. L. S. B. D. U. & D. M.] F. Trevisan, „Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications,” *Journals Indexing & Metrics*, 2018.
- [24] J. M. C. I. G.-M. & G. P. R. M. A. Caminero, „Impact damage resistance of 3D printed continues fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling,” *Composite Part B: Engineering*, 2018.
- [25] A. H. E. J. Q. C. R. C. A. J. R.C. Dizon, „Mechanical characterization of 3d-printed polymers,” *Additive Manufacturing*, 2018.

- [26] J. M. Z. Z. G. J. & H. D. W. Xin, „3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,” *Composites Part B*, 2017.
- [27] & F. R. F. Baldassarre, „The Additive Manufacturing in the Industry 4.0 Era: The Case of an Italian FabLab,” *Journal of Emerging*, p. 2017, Trends in Marketing and Management.
- [28] J. H. A. C. O. I. A. J. R. D. Y. W. L. P. H.-Y. H. N. P. P. R. Y.-G. & Z. J. D. Owen, „3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer,” *Progress in Additive Manufacturing*, 2018.
- [29] P. L. & J. G. A. Zocca, „LSD-based 3D printing of alumina ceramics,” *Journal of Ceramic Science and Technology*, 2017.
- [30] U. D. J. S. & B. L. R. Gmeiner, „Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics,” *Journal of Ceramics Science and Technology*, 2015.
- [31] U. D. J. S. & B. L.] R. Gmeiner, „Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics,” *Journal of Ceramics Science and Technology*, 2015.
- [32] S. P. O. S. M. P. & O. D. T. Lanko, „Zirconium Alloy Powders for manufacture of 3D printed particles used in nuclear power industry,” *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018.
- [33] & Y. Y. T. Xueyuan, „Electrospinning preparation and characterization of alumina nanofibers with high aspect ratio,” *Ceramics International*, 2017.
- [34] Y. L. H. Z. H. C. T. D. F. W. Haoa, „Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composite,” *Polymer Testing*, 2018.
- [35] S. S. & J. N. T. P. Sathishkumar, „Glass fiber-reinforced polymer composites – a review,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014.
- [36] L. Z. E. Y. Z. Y. Y. Z. X. L. & W. E. Z. Liu, „Modification of Glass Fiber Surface and Glass Fiber Reinforced Polymer Composites Challenges and Opportunities: From Organic Chemistry Perspective,” *Current Organic Chemistry*, 2015.
- [37] A. J. & K. C. C. L. Jian-Yuan, „Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” *Applied materials today*, 2017.

- [38] H. J. Van, „Additive manufacturing of shape memory alloy,” *Shape memory and superelasticity*, 2018.
- [39] Y. C. W. & Y. L. Y. Yang, „3D Printing of shape memory polymer for functional part fabrication,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015.
- [40] M. Y. C. K. & Z. Y. L. Lili, „3D Printing Complex Egg White Protein Objects: Properties and Optimization,” *Food and Bioprocess Technology*, 2018.
- [41] & A. R. P. Singh, „3D Food Printing: A Revolution in Food Technology,” *Acta Scientific Nutritional Health*, 2018.
- [42] & R. J. F. A. Goulas, „3D printing with moondust,” *Rapid Prototyping Journal*, 2016.
- [43] L. M. a. F. M. Valentina Mazzanti, „FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties,” *Polymers*, 2019.
- [44] M. Milosevic, D. Stoof és K. Pickering, „Characterizing the mechanical properties of fused deposition modelling natural fiber recycled polypropylene composites,” *J. Compos. Sci*, 2017.
- [45] D. Stoof és K. Pickering, „Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene,” *Compos. Part B*, 2018.
- [46] M. Kariz, M. Sernek, M. Obućina és M. Kuzman, „Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts,” *Mater*, 2018.
- [47] T. Tran, I. Bayer, J. Heredia-Guerrero, M. Frugone, M. Lagomarsino, F. Maggio és A. Athanassiou, „Cocoa shell waste biofilaments for 3D printing applications,” *Macromol*, 2017.
- [48] O. Martikka, T. Kärki és Q. Wu, „Mechanical properties of 3D-printed wood-plastic composites,” *Mater*, 2018.
- [49] D. Depuydt, M. Balthazar, K. Hendrickx, W. Six, E. Ferraris, F. Desplentere, J. Ivens és A. Van Vuure, „Production and characterization of bamboo and flax fiber reinforced polylactic acid filaments for fused deposition modeling (FDM),” *Polymers*, 2019.

- [50] D. Filgueira, S. Holmen, J. Melbø, D. Moldes, A. Echtermeyer és G. Chingacarrasco, „Enzymatic-assisted modification of thermomechanical pulp fibers to improve the interfacial adhesion with poly-(lactic acid) for 3D printing,” *Sustainable Chem.*, 2017.
- [51] D. E. Kretschmann, „Mechanical Properties of Wood,” *General Technical Report*, 2007.
- [52] Fahad M and Hopkinson N 2012 A New Benchmarking Part for Evaluating the Accuracy and Repeatability of Additive Manufacturing (AM) Processes, 2nd International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering ICMPE, Singapore, Singapore, April 28-29, pp. 234-238
- [53] Dimitrov D, Van Wijck W, Schreve K and de Beer N 2006 Investigating the Achievable Accuracy of Three Dimensional Printing, *Rapid Prototyping Journal* 12(1) 42-52
- [54] Lemu HG and Kurtovic S 2011 3D Printing for Rapid Manufacturing: Study of Dimensional and Geometrical Accuracy, International Conference on Advances in Production Management Systems IFIP, Berlin, Germany, September 26, pp. 470-479
- [55] Rui Zhang, Fanfan Du, Katalee Jariyavidyanont, Evgeny Zhuravlev, Christoph Schick, René Androsch: *Glass transition temperature of poly(d,l-lactic acid) of different molar mass.*, *Thermochimica Acta*, Vol 718, 2022
- [56] Ethan Sommer: *The Best PLA Bed & Print Temperature Settings*, All3DP, <https://all3dp.com/2/the-best-pla-print-temperature-how-to-achieve-it/>, 2022.10.24.
- [57] Hussain Bhavnagarwala: *The Best ABS Print & Bed Temperature Settings*, All3DP, <https://all3dp.com/2/abs-print-bed-temperature-all-you-need-to-know/>, 2022.10.24.
- [58] Gabriel Boyd, Tobias Hullette: *3D Printing Bridging: 6 Tips for Perfect Bridges*, ALL3DP, <https://all3dp.com/2/bridging-3d-printing-tips-tricks-for-perfect-bridges/>, 2022.10.24.
- [59] 3D Printer Academy: *How far can a 3d printer "bridge"???*, <https://www.youtube.com/watch?v=m4i1SbIIMaA>, 2022.11.24.

