



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

LEGO alkatrészek additív gyártástechnológiával történő gyártása

**OE-BGK
2022.**

Hallgató neve:
Hallgató törzskönyvi száma:

**Kelemen Anna
T009125/FI12904/B**



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

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

SAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Kelemen Anna

Szakedolgozat száma: SZD22053013326995

Törzskönyvi száma: T009125/F112904/B

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: gépészmérnöki

Specializáció: gépészmérnöki - CAD-CAM-CNC

A dolgozat címe: LEGO alkatrészek additív gyártástechnológiával történő gyártása

A dolgozat címe angolul: Production of LEGO parts using additive manufacturing technology

A feladat részletezése:

1.Végezzen szakirodalom kutatást a korszerű additív gyártási technológiákról (Különös tekintettel a civil felhasználás tekintetében)!

2.Mutassa be a LEGO elemek gyártástechnológiáját!

3.Modellezen és gyártson LEGO elemeket additív gyártástechnológia segítségével!

4.Végezzen kísérletet a nyomtatási paraméterek változtatásával!

5.A kész LEGO alkatrészeket hasonlítsa össze a forgalomban kapható LEGO elemekkel!

Intézményi konzulens neve: Stadler Róbert Gábor

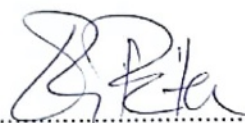
A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 05. 15.

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakedolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2022. 10. 21.




Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom.


belső konzulens

.....
külső konzulens



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

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	6
2.	A 3D nyomtatás felhasználási területei az iparban	7
3.	Additív gyártástechnológia	8
3.1.	3D nyomtatás típusai	8
3.1.1	Anyag extrudálás	9
3.1.2	Gyantás	10
3.1.3	Por ágyas.....	12
3.1.4	Anyagáramlás	12
3.1.5	Kötőanyagok	13
3.1.6	Lemezelt darabgyártás	13
3.1.7	Irányított energiás leválasztás	14
4.	A fröccsöntés technológiája.....	15
4.1.	A fröccsöntés származása	17
4.2.	A LEGO fröccsöntése	18
5.	LEGO alkatrészek gyártása	20
6.	Anyagok összehasonlítása	22
6.1.	PLA.....	22
6.2.	ABS.....	23
7.	Próbatestek bemutatása.....	25
7.1.	Az alkatrészek kiválasztása.....	25
7.2.	A próbatestek modellezése.....	25
		26
7.3.	A próbatestek csoportosítása.....	28
7.4.	A modellek próbanyomtatása.....	29
7.4.1.	Ultimaker Cura	29
7.4.2.	Támaszanyag elhelyezkedése	32
7.4.3.	Egyéb beállítások.....	33
7.4.4.	A végső beállított paraméterek	35

8.	Az alkalmazott 3D nyomtatók és anyagok bemutatása	37
8.1.	Az alkalmazott 3D nyomtatók bemutatása	37
8.1.1.	Creality Ender 3 Pro	37
8.1.2.	Craftbot Flow Inex.....	38
8.1.3.	Formlabs Form 3+	39
8.2.	Az alkalmazott anyagok bemutatása	40
8.2.1.	PLA.....	40
8.2.2.	Formlabs High Temperature Resin - V2.....	41
9.	Vizsgálatok és eredmények bemutatása	42
9.1.	Vizsgálati terv készítése	42
9.2.	Funkcióvizsgálat I.	42
9.3.	Funkcióvizsgálat II.....	45
9.4.	Tömegmérés	47
9.5.	Nyomtatási idők vizsgálata	49
9.6.	Keménységmérés	51
9.7.	Mikroszkópos vizsgálat.....	53
9.7.1.	Nyomtatási hibák	54
9.7.2.	További nyomtatási hibák.....	56
10.	Összefoglalás	58
11.	Summary	59
12.	Felhasznált irodalom.....	60
13.	Ábrajegyzék	63
14.	Táblázatjegyzék	65

1. Bevezetés

A 3D nyomtatás iránt az érdeklődésemet a szakmai gyakorlati helyemen keltették fel először. Akkor jöttem rá, hogy nem csak az iparban, hanem az otthoni felhasználásban is egyre jobban kezd elterjedni a használata.

Műanyagmegmunkálás említésekor talán még mindig a fröccsöntés jut először az emberek eszébe. Eme kitűnő technológia mellett azonban a 3D nyomtatás is bontogatja szárnyait. Először a prototípus gyártásban vették nagy hasznát, hiszen nem mindegy, hogy elő kell-e állítani egy drága szerszámot is a munkadarab prototípusunk gyártásához, melyről később kiderülhet, hogy nem is megfelelő teljesen, vagy sem. A 3D nyomtatás egyre jobban terjed a köztudatban is, ugyanis a gyártástechnológiák között egyszerűnek és viszonylag olcsónak mondható.

A szakdolgozatom célja, hogy egy egyszerű, mégis nagyon elterjedt játékon, azaz a LEGO-n keresztül szeretném bemutatni az additív gyártástechnológia néhány fajtáját. 24 próbadarabon végzett különböző vizsgálatok segítségével szeretnék rávilágítani a hasonlóságokra és különbségekre. Emellett kiemelt figyelemmel szeretném kísérni dolgozatomban a felmerülő nyomtatási hibákat, valamint lehetőség szerint feltárni azok okait.

2. A 3D nyomtatás felhasználási területei az iparban

A 3D nyomtatást először csak prototípus gyártásra használták, azonban a hagyományos gyártástechnológiákat a 2000-es évekre egyre jobban felváltotta. Ekkorra olyannyira elterjedt mind az autóiparban, mind a repülőgépiparban, valamint egyéb gyártási területeken, hogy szinte pótolhatatlan lett. Egy vállalat például 14 karátos aranyat és 92%-os tisztaságú ezüstöt nyomtatott, így ékszereket készítve. Ezek után egyre szélesebb körben terjedt el ez az additív gyártástechnológia. A filmipar is előszeretettel használja már a 3D nyomtatást, páncélok, űrruhák nyomtatására. (Például a Vasember, vagy a Mentőexpedíció című filmben.) [1]

Ahhoz, hogy a 3D nyomtatási technológia egyre jobban terjed, az is hozzájárul, hogy már nem csak műanyag alkatrészeket tudunk előállítani, hanem használhatunk különböző gumis-, kerámia-, fa-, fém-, vagy akár ehető alapanyagokat is. [1]

Az orvostudományban meghatározó szerepet tölt be ez az additív gyártástechnológia, ugyanis két ember között teljes egyezés sosincs. Így minden protézis, implantátum egyedi gyártást igényel. Emellett az űriparban is lényeges helyet harcolt ki magánk a 3D nyomtatás. A NASA 2013-ban már rakétákhoz alkalmazta ezt a módszert, később pedig a Made In Space vállalat az űrben is használható 3D nyomtatókat tervezett, melyek közül egy 2014-ben a Nemzetközi Űrállomásra is eljutott. [1]

2016 elejére pedig legyártották az addigi legnagyobb 3D nyomtatott repülőgéppalkatrészt. Egy térelválasztót, mely a konyhát választotta el az utasértől. Majdnem 50 %-kal könnyebb és sokkal erősebb is lett a szerkezet. Ez közvetett módon segítette elő azt, hogy a CO₂ kibocsátás is csökkenjen. [1]

Európa legnagyobb SLS 3D nyomtatója Angliában lett beüzemelve 2016 májusában, melynek munkatere 550x550x500 mm, és különböző polimerekkel és porokkal tud dolgozni. [1]

3. Additív gyártástechnológia

A 3D nyomtatás vagy additív gyártástechnológia fizikai objektumokat hoz létre anyagok egymás utáni hozzáadásával. Ez a technológia gyorsan terjed és egyre szélesebb körben használják a világon. Alkalmazzák a mezőgazdaságban, az egészségügyben, az autóiparban, és még a repülőgépiparban is. Állítanak elő például ékszereket, szaruhártyát, rakétamotort, sőt az amszterdami acélhíd is így készült. Sok új lehetőséget ad számunkra ez a gyártástechnológia, ugyanis már nem csak hőre lágyuló műanyagokat tudunk nyomtatni, hanem kerámiákat vagy akár fémet is. [2]

A 3D nyomtatási technológia alkalmazása növelheti a gyártási sebességet, miközben lecsökkenti a költségeket. Emellett persze megjelent, hogy egyre részletesebb és kidolgozottabb termékekre nyújtanak be igényt a vevők. Ugyanakkor számos hátránnyal is rendelkezik az additív gyártástechnológia. Például csökkenti az alacsony képzettségű gyártó munkaerő felhasználását, így beleavatkozik a gazdasági folyamatokba és a munkaerő piaci viszonyokba. Ezenkívül mivel sokféle tárgyat tudnak nyomtatni a felhasználók, megtalálták a módot, hogy késeket, egyszerhasználatos lőfegyvereket, veszélyes tárgyakat is előállíthassanak. Emellett teret nyit a termékhamisítók és csalók számára, az olcsó utánzatok készítésére. Ennek oka, hogy bárki számára ma már könnyen elérhetőek a 3D modellek elkészítéséhez szükséges szoftverek. [2]

3.1. 3D nyomtatás típusai

Különböző funkciókkal rendelkező 3D nyomtatási technológiákat fejlesztettek ki. Az ASTM F2792 szabvány szerint hét csoportba sorolhatjuk őket, melyeket dolgozatom későbbi részében részletezek:

- FDM (Fused Deposition Modeling, azaz a szálhúzás 3D nyomtatás),
- SLA és DLP (Stereolithography, Digital Light Processing, azaz sztereolitográfia, digitális fényfeldolgozás),
- SLS (Selective Laser Sintering, azaz szelektív lézeres szinterezés),
- MJ (Material Jetting, azaz anyagsugárzás),
- BJ (Binder Jetting, azaz kötőanyag sugárzás),

- LOM (Laminated object manufacturing, azaz lemezelt darabgyártás)
- LENS (Laser deposition and laser engineered net shaping, azaz lézeres leválasztás és a lézeres hálóformázás)

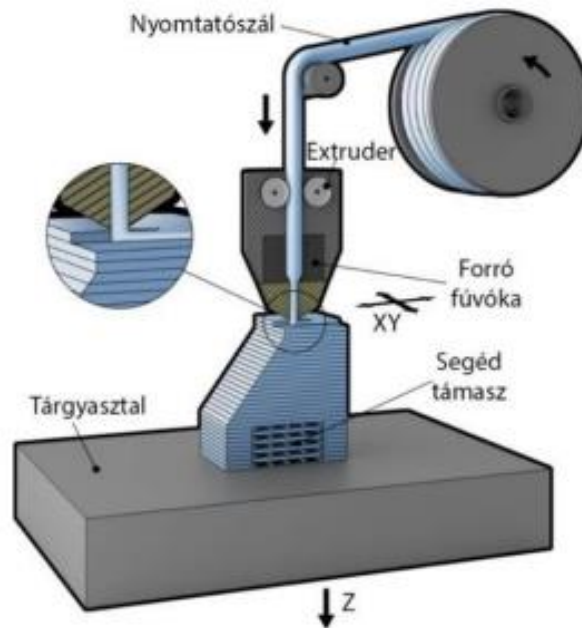
Nem lehet olyanról beszélni, hogy melyik gép vagy technológia működik jobban, ugyanis mindegyiknek megvan a maga speciális területe, ahol az a legmegfelelőbb hasznosítható. Régebben a 3D nyomtatás technológiája csak a prototípus gyártásra szolgált, ma már azonban egyre szélesebb körben elterjedt. [2]

3.1.1 Anyag extrudálás

Az anyagextrudáláson alapuló 3D technológia kombinált anyagok, többszínű műanyagok, élelmiszerek, de akár élő sejtek nyomtatására is alkalmazható. Széles körben használják, ami nem meglepő, hiszen költségei igen alacsonyak. A szálhúzó 3D nyomtatást (az FDM-et) 1990 elején fejlesztették ki, és hőre lágyuló polimert használ fő alapanyagként (legelterjedtebbek az ABS és a PLA). [2]

Az anyag extrudálás lényege, hogy a nyomtató két vagy három tengelyen mozgatható feje felmelegíti a polimer szálát, majd léptetőmotor segítségével a tárgyasztalra adagolja az olvadékot rétegről rétegre, alulról felfelé haladva, kialakítva így a kívánt alkatrészt. A polimer ahogy hűl, úgy szilárdul meg, és a rétegek így egymásba olvadnak. [1]

Ez a fajta 3D nyomtatási technológia a legelterjedtebb a lakossági felhasználás körében, az olcsósága és egyszerűsége miatt. Hátránya, hogy a nyomtató működése lassú, ha pontos és részletes alkatrészt szeretnénk nyomtatni. Az 1. ábrán az anyag extrudálásos nyomtatás működési elve látható. [1]



1. ábra Az FDM nyomtatás működési elve [3]

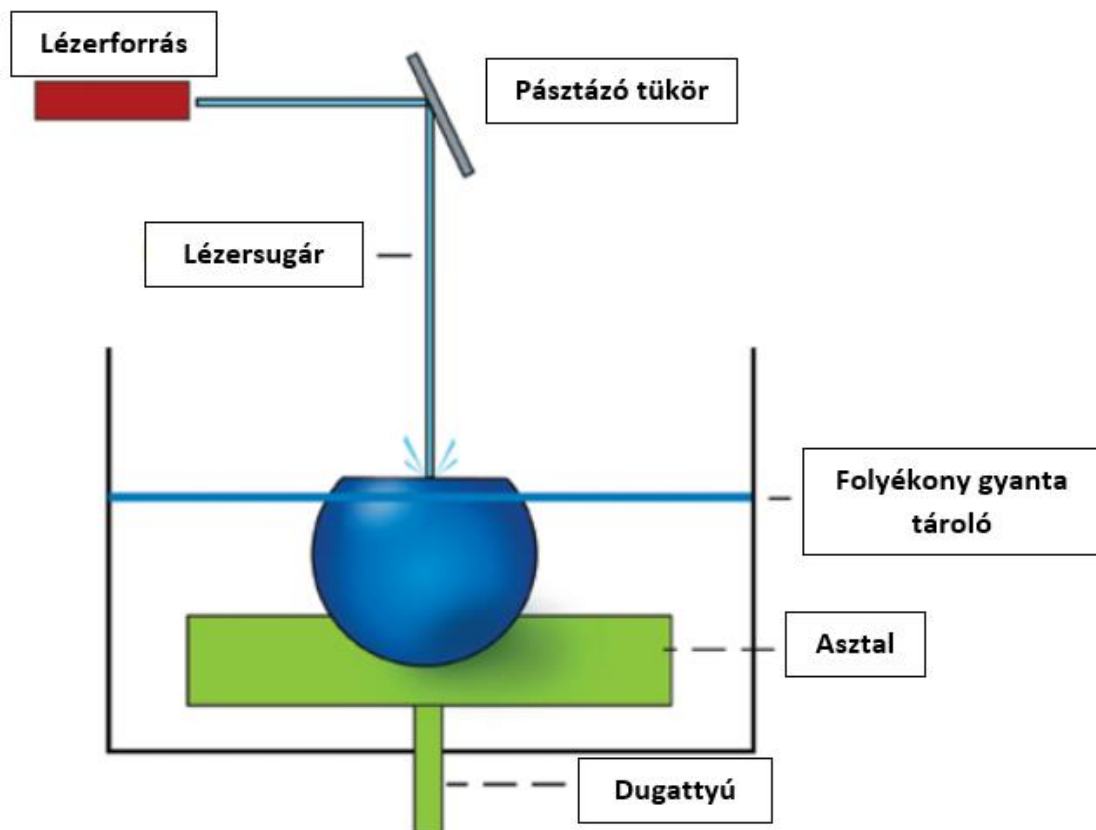
3.1.2 Gyantás

A leggyakrabban használt fő 3D nyomtatási technika a fotopolimerizáció, amely általában fotoreaktív polimerek lézer, fény vagy ultraibolya (UV) segítségével történő keményítését jelenti. A fotopolimerizációt alkalmazó technológiák példája a sztereolitográfia (SLA) és a digitális fényfeldolgozás (DLP). A fő különbség e két eljárás között a fényforrás. A DLP hagyományosabb fényforrást használ, például folyadékkristályos kijelzőpanellel ellátott ívlámpát, ami a fotopolimer gyanta tartályának teljes felületére alkalmazható egyetlen lépésben, így általában gyorsabb, mint a sztereolitográfia. [2]

A fotopolimerizáció fontos paraméterei az expozíció ideje, a hullámhossz és az áramellátás mennyisége. A kezdetben használt anyagok folyékonyak és megkeményednek, ha ultraibolya fénynek teszik ki őket. Ez a technológia alkalmas részletgazdag és kimagasló felületminőségű termékek előállítására. [2]

Az SLA eljárás elve, hogy a folyékony fotopolimer megszilárdítása UV fénnel történik, a következő módon: abban a tartályban, ahol a folyékony, műanyag gyantát tároljuk, van egy „z” (azaz függőleges) irányban mozgatható asztal, mely a folyadék alatt

egy rétegvastagságnyra helyezkedik el (0,05-0,15 mm). Miután a lézersugár végighaladt a szoftver által generált pályán, így kialakítva és megszilárdítva az első réteget, az asztal lejjebb süllyed egy rétegvastagságnyi, majd a simítólap friss, egyenletes gyantaréteget húz az előzőre. A következő, új keresztmetszetet ismét végigköveti a lézer. Így épül fel a modell rétegről rétegre. Ezek után az elkészült alkatrészt kiszárítják. Sokszor UV-kemencében elvégeznek egy utolsó szilárdítási folyamatot, miután lemosás a modellt kémiai fürdőben, eltávolítva így a felesleges anyagokat róla. A támaszanyag eltávolítása után a felület minősége még javítható homokszórással vagy csiszolással. A 2. ábrán a gyantás nyomtatás működési elve látható. [1]



2. ábra SLA nyomtatás működési elve [4]

3.1.3 Por ágyas

A por ágyas fúziós eljárás magába foglalja az elektronsugaras olvasztást (EBM), a szelektív lézerszinterezést (SLS) és a szelektív hőszinterezést (SHS). Ez a módszer elektron- vagy lézersugarat használ az anyagpor megolvasztására vagy összeolvasztására. Az eljárás során felhasznált anyagok például a fémek, kerámiák, polimerek és kompozitok. [2]

Az SLS a por alapú 3D nyomtatási technológia fő példája, melyet Carl Deckard 1987-ben fejlesztett ki. A sztereolitográfiához hasonlóan itt is lézersugárral, mozgó asztalra építjük fel a modellünket, azzal a különbséggel, hogy itt a rendszer por alapú szemcséket olvaszt össze. A tárgyasztalt végigpásztázza a lézersugár, így kialakítva a réteget. Következőnek az asztal lejjebb süllyed, és a terméken végighalad egy porterítő henger. Így folytatódik ez az alkatrész elkészüléséig. [1]

Az SLS technológia funkcionálisan gyors, nagy pontosságú, szilárd, mechanikusan és termikusan is terhelhető, valamint változó felületi minőségű alkatrészeket tud előállítani. A szelektív lézeres szinterezéssel fém-, műanyag- és kerámiatárgyakat lehet létrehozni. Az SLS nagy teljesítményű lézert használ polimer porok szinterezésére, hogy 3D terméket hozzon létre. Mindazonáltal az eljárás sajnos igen költséges. [1, 2]

Eközben az SHS technológia a 3D nyomtatás a por ágyas módszernek egy másik fajtája, amely egy fej hőnyomtatását használja a folyamat során, megolvasztja a hőre lágyuló port, hogy 3D nyomtatott objektumot hozzon létre. [2]

3.1.4 Anyagáramlás

Az ASTM szabványok szerint az anyagsugaras (MJ) nyomtatási eljárás során az építőanyagot cseppenként adagolják a munkatérbe. A nyomtatófej egy fényérzékeny anyag cseppjeit adagolja, amelyek megszilárdulnak és rétegről rétegre építenek fel egy részt ultraibolya (UV) fény alatt. Ugyanakkor az anyagfűvóka nagyon sima felületű és nagy méretpontosságú alkatrészeket hoz létre. Az anyagsugaras eljárás során a felhasználható anyagok közé tartoznak a kombinált anyagok, polimerek, kerámiák, kompozitok és biológiai anyagok. [2, 5]

3.1.5 Kötőanyag

1995-ben az MIT egyetem két hallgatója, Tim Anderson és Jim Brendt egy tintasugaras nyomtatót dolgoztak át úgy, hogy a porrétegeket térben is képes legyen egymásra építeni. Az SLS-hez hasonlóan itt is a por megkötése történik, de nem lézersugárral, hanem számítógép vezérelt kötőanyag-adagolófejjel. Ez cseppenként adagolja a ragasztóanyagot a por alapanyagra, így felépítve rétegenként a modellt. [1]

A kötőanyag-sugárzás egy gyors prototípus készítési és 3D nyomtatási eljárás, amelyben folyékony anyagot visznek fel a porszemcsék összekapcsolására. Ez sugárzó vegyi kötőanyagot használ a szórt porra a réteg kialakításához. A kötőanyag-fűvóka alkalmazása lehetővé teszi öntési minták, szinterezett termékek vagy nagy volumenű termékek homokból történő előállítását. Ezzel a technológiával különféle anyagokat lehet nyomtatni, beleértve a fémeket, homokot, polimereket és kerámiákat. Egyes anyagok, például a homok, nem igényelnek további feldolgozást. Ezen túlmenően a kötőanyag-sugárzás eljárás egyszerű, gyors és olcsó. [2]

3.1.6 Lemezelt darabgyártás

Az ASTM definíciója szerint a lemezelt darabgyártás az a 3D nyomtatási eljárás, amelyben az anyagok lapjait egymáshoz kötik, így létrehozva az alkatrészt. Ez magába foglalja a laminált tárgygyártást (LOM) és az ultrahangos additív gyártást (UAM). [2]

A LOM eljárás lépései a következők: először az alapanyagot vékony laponként egymáshoz ragasztják, hengerlik, így kialakítva a rétegeket. Mindeközben a lézersugár adott kontúr mentén kivágja a keresztmetszeteket, és a felesleges anyagokat feldarabolja az eltávolítás megkönnyítése miatt. A szükségtelen anyagok végig a modellen maradnak, és csak az elkészülése után kerülnek le róla, kézi erő alkalmazásával. [1, 2]

A lemezelt darabgyártás előnye, hogy a lapos laminálással színes nyomatokat lehet készíteni, viszonylag olcsó, könnyen kezelhető és a maradék anyag újrahasznosítható. A LOM bonyolult geometriai alkatrészek gyártására alkalmas, alacsony gyártási költséggel és rövidebb üzemidővel. Az UAM egy innovatív folyamattechnológia, amely hang segítségével egyesíti a fóliaanyagból húzott fémrétegeket. [2]

3.1.7 Irányított energiás leválasztás

Az irányított energiás leválasztás egy összetettebb nyomtatási eljárás, amelyet általában meglévő alkatrészek javítására vagy további anyagok hozzáadására használnak. Ez nagymértékben szabályozza a szemcseszerkezetet, és jó minőségű tárgyat eredményezhet. A technológia folyamata hasonló az anyagextrudáláshoz, de a fűvóka nincs egy meghatározott tengelyhez rögzítve, és több irányba tud mozogni. Ezenkívül az eljárás alkalmazható kerámiákkal, polimerekkel, de jellemzően fémekkel és fémalapú hibridekkel, drót vagy por formában. [2]

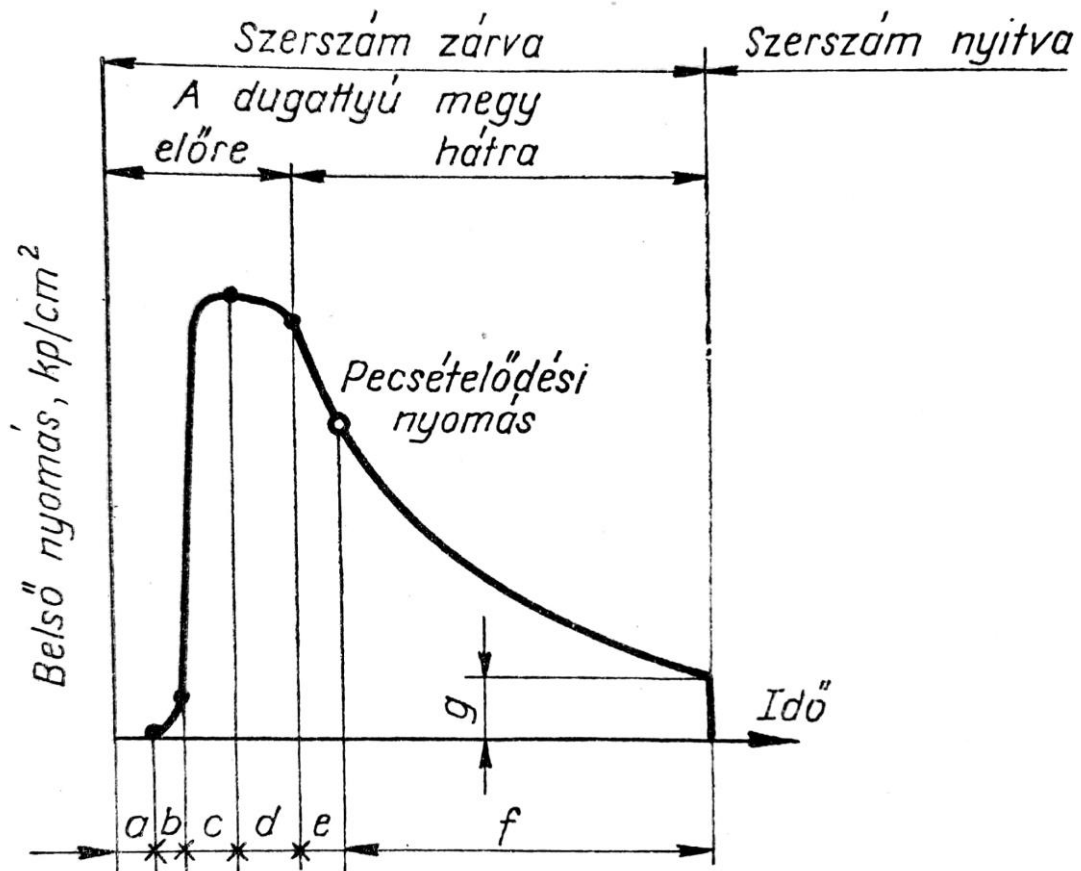
Az irányított energiás leválasztás technológiájának a példája a lézeres leválasztás és a lézeres hálóformázás, azaz a LENS. A lézeres leválasztás feltörekvő technológia és millimétertől méterig terjedő alkatrészek előállítására vagy javítására használható. Ez a lehetőség egyre nagyobb vonzerőt jelent a szerszámgyártás, a szállítás, a repülőgépipar, valamint az olaj- és gázszektorban, mivel skálázhatóságot és sokrétű képességet biztosít egyetlen rendszerben. [2]

4. A fröccsöntés technológiája

A polimerfeldolgozási technológiák egyik legfontosabb alakadási módja a fröccsöntés. Ez a módszer zárt szerszámban történő formaadással dolgozik, szakaszos üzemmódban, ahol nagy nyomású, kis viszkozitású polimerömladék gyors befecskendezésével bármilyen alakú alkatrészeket gyárthatunk 3 dimenzióban. Az eljárás során a gép tartályának megtöltése után a dugattyúja tömöríti az anyagot, majd tovább tolja a fűtött részbe, ahol az megolvad. A szerszámzáró szerkezet az álló részhez nyomja a mozgót. A szerszám bezáródik. A megolvadt anyagot a dugattyú a fűvókán, majd az elosztó csatornarendszeren át a formába nyomja, maga előtt tolva a járatokban lévő levegőt. Amint a hűtött szerszámhoz ér az anyag, megdermed. Ezután a kinyíló szerszám utat biztosít a fröccsöntött alkatrész kiemeléséhez. Egyes gépek kidobó szerkezettel is rendelkeznek. [6, 7]

Előnyei közé sorolható, hogy szinte teljesen hulladékmentes eljárás. Emellett a fröccsöntött alkatrész újra feldolgozható marad. Nagyon termelékeny a nagy nyírósebesség miatt, kitűnően automatizálható, robotosítható. [7]

Alapelve tehát az, hogy a polimert olvadáspont fölé melegítjük, így kis viszkozitású folyékony állapotba kerül. Ezt az anyagot a forró fűvókán keresztül fecskendezzük a zárt szerszámba, ahol a kihűlő polimerből, nagy nyomás alatt, bármilyen bonyolult formájú alkatrész hulladékmentesen, képlékeny alakítással, nagy méretpontossággal elkészíthető. A kis viszkozításra azért van szükség, hogy a bonyolult szerszámteret minél gyorsabban és teljesebben kitöltse az anyag. Ez a folyamat néhány másodperc alatt megy végbe. A fröccsöntés nem csak nagy pontosságú és termelékeny gyártás, hanem mérethatárai igen nagyok. (Akár 50 mg-tól 50 kg-ig tudunk alkatrészeket fröccsönteni.) [7]



3. ábra A fröccsöntés t-p diagramja [7]

A 3. ábrán a fröccsöntés diagramja látható, mely egy teljes ciklusra vonatkozik. Az a) szakaszban a formaüreg megtöltődik anyaggal, ugyanakkor nyomás csak a b) szakaszban fejlődik ki, mikor már az első szakasz lezárult. A diagram legmagasabb pontján érjük el a teljes belső nyomást, amely a c) szakaszban teljesül. Szinte azonnal megkezdődik az utónyomás, melyet a d) szakasz követ, ahol az anyag hűlni, ezáltal zsugorodni kezd, emiatt fog a nyomáscsökkenés is megkezdődni. Az e) szakaszban a legszűkebb keresztmetszetben a csatornarendszer lepecsételődik, így utánpótlás hiányában az f) szakaszon rohamosan csökken a nyomás, mely végül a szerszám kinyitásával szűnik meg teljesen. A g) szakasz a nyitás pillanatában lévő maradéknomás nagyságát mutatja. Tapasztalatok szerint, ha ez a nyomás nagy, akkor belső feszültségek keletkezhetnek a munkadarabban, amik előbb-utóbb repedéshez vezethetnek. Ha a maradéknomás kicsi, akkor beszívódások jöhetnek létre. Ezek miatt fontos a maradéknomás nagyságára figyelni. [7]

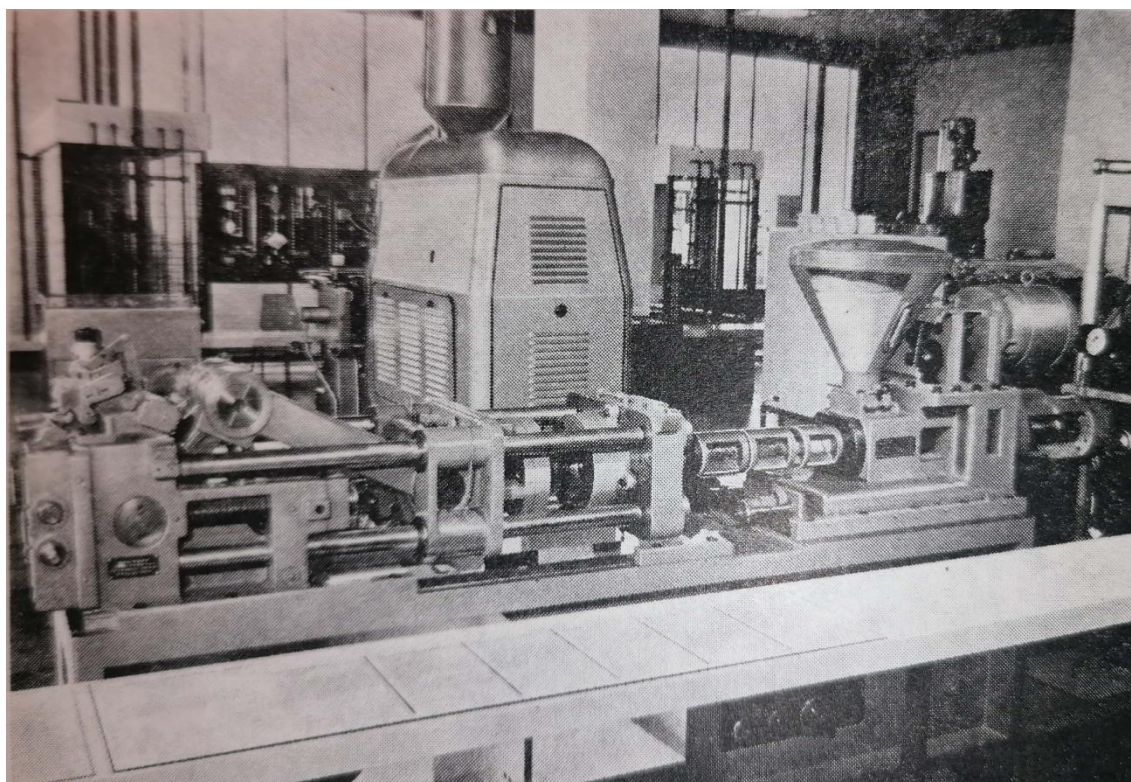
4.1. A fröccsöntés származása

A fröccsöntés származhat a fémek nyomás alatti öntéséből, de valószínűleg ettől függetlenül alakult ki. 1872-ben megjelent a celluloid feldolgozása egy dugattyús töltőgépen. Ezeknek a sorozatgyártása az 1920-as években indult el, Németországban. A '60-as években megjelent csigadugattyús fröccsöntő gép nagy fejlődést hozott. Az 1956-ban szabadalmaztatott gép (melyet a nyugatnémet Ankerwerk cég gyártott) képes forgó és oda-vissza mozgásra is. Két fő részből áll:

- a fröccsöntő egységből,
- a szerszámzáró egységből.

A gép legfőbb alkatrésze a csigadugattyú, mely nem csak forgásra, de dugattyú szerű mozgásra is képes. Ez a gép valószínűleg meg, hogy a hátrafele tartó mozgás közben a forgó csiga maga elé tolja az anyagot. Emellett jelentős utónyomás (több mint 100 MPa), nagyfokú automatizálás, sokkal gyorsabb alkatrész gyártási sebesség és nagy hatékonyság jellemzi. [7, 8]

A beérkező folyékony polimerömléknek nagy a nyomása, ezért a szerszám részeit összeszorító erőnek ennél a nyomásnál legalább 15-20 %-kal nagyobbak kell lennie. Ez egy közepes méretű gépen is meghaladhatja a 100 tonna záróerőt. A szerszám egy álló és egy mozgó lapból áll, amit négy oszlop vezet meg. Az egység mozgását hidraulikus-, vagy könyökemelő rendszer biztosítja. Már itt is megjelenik, hogy a fröccsegység csúcsa, a fűvóka fűtött, míg a szerszám maga hűtött. A 4. ábrán az első csigadugattyús fröccsöntőgép látható. [7]

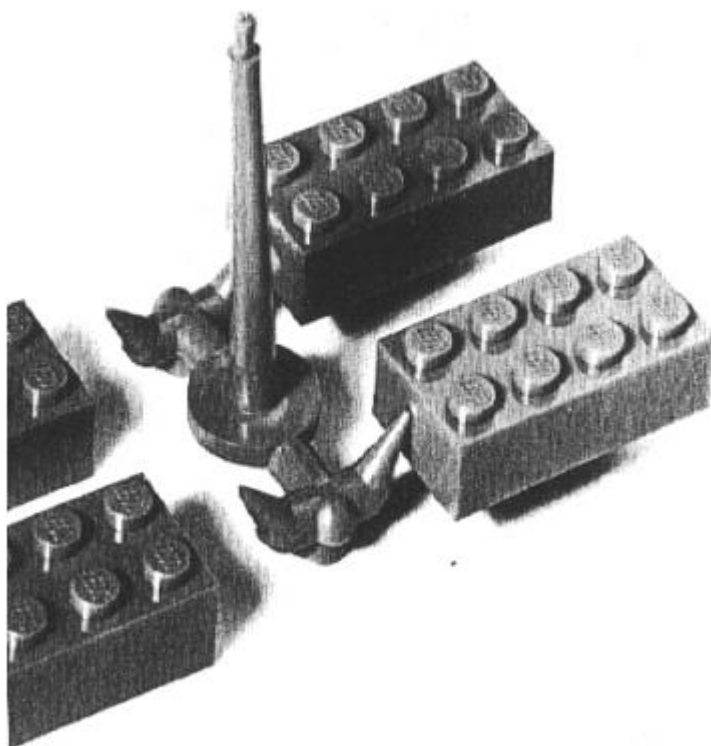


4. ábra Az első csigadugattyús fröccsöntőgép [8]

4.2. A LEGO fröccsöntése

A fröccsöntő berendezéseket két csoportra bonthatjuk: vízszintes és függőleges elrendezésű gépek. A kisebb méretű, kis lökettérfogatú gépekre inkább a függőleges, míg a nagy méretű és lökettérfogatú gépekre inkább a vízszintes elrendezés a jellemző. [9]

A LEGO elemeknél ugyan nem nagy a lökettérfogat, mégis vízszintes elrendezéseket használnak, valószínűsíthetően azért, hogy könnyebb és gyorsabb legyen eltávolítani a kész elemeket a szerszámból. Az 5. ábrán egy négyfészkés fröccsöntőforma nyers termékei látszanak.



5. ábra Négyfészkes fröccsöntőforma nyers terméke [6]

5. LEGO alkatrészek gyártása

Napjainkban a LEGO játéksalád igen nagy népszerűségnek örvend, hiszen nem csak a nagyobb gyerekeknek van már lehetőségük ezzel játszani, hanem a kisebbek felé is megnyílt egy érdekes világ a DUPLO játékokkal. Jelenleg 4 üzemmel rendelkezik a cég. Ezek helyileg Dániában, Csehországban (Prága), Mexikóban és Magyarországon (Nyíregyháza) találhatóak meg. A 4 gyárban évente körülbelül 50 milliárd LEGO alkatrészt készítenek. Bármely két tetszőleges elem összeilleszthető, így az építményeknek csak a fantázia szab határt. [10, 11]

A nyíregyházi gyárban naponta 30 millió LEGO-t és 2,5 millió DUPLO-t gyártanak. Több mint 100 féle színnel dolgoznak a gyárakban. Az alapanyagot először hatalmas silókba töltik be, majd csöveken keresztül juttatják a gyárépületbe a műanyag granulátumot. Ezekből naponta 30 tonnányit használnak fel. A cég az 50-es évek végén váltott fáról műanyag alapanyagra. A legnépszerűbb színek a sárga mellett a zöld, a kék és a piros. Az alapanyagok egy része előszínezetten érkezik az üzembe, ám egyes elemek gyártásánál szintelen a műanyag granulátum, melyet utólag színeznek ott helyben. Különböző festékek hozzáadásával keverik ki a megfelelő árnyalatokat. [10, 11]

A felhasznált műanyagok között megtalálható a poliamid és az ABS is. A LEGO és a DUPLO termékcsalád között elsősorban méretbeli és részletezettségi különbségek vannak. A DUPLO az egészen kicsik játéka, így fontos, hogy az elemek nagyobbak, és ez által kevésbé lenyelhetők legyenek. A nyíregyházi gyárban több mint 350 műanyag fröccsöntő gép működik. Ezek a csúcstechnológiás gépek felelnek azért, hogy bármely két tetszőleges elem összeilleszthető legyen, ugyanis pontosságuk 0,004 mm. [10, 11]

A berendezés első lépésben 240 °C-ra melegíti a műanyag granulátumot, majd a keletkezett olvadékot az egyedi szerszám belsejébe préseli. A fröccsöntő gép záróereje 40 és 160 tonna között mozog. A gép 13 másodperc alatt készít a granulátumból 16 darab kész alkatrészt. 1 600 különböző szerszámmal dolgoznak, azaz ennyi féle alkatrészt gyártanak. 1 millió darab LEGO-ból 1-2 darab selejt keletkezik csak. Az alkatrészek összenyomásához és szétszedéséhez szükséges erő pontosan meghatározott, ugyanis nem eshetnek szét könnyen a darabok. [10, 11]

Az egész gyárban automatikusan működtetett szállítórendszert alkalmaznak, mellyel az egyedi azonosítóval ellátott dobozok a termelés egy másik részébe, vagy akár a raktárig is eljuthatnak. A nyíregyházi gyárban automata magasraktár működik, mely nagyjából 37 méter magas, és körülbelül 80 000 raklap fér el benne. A nagy távolságok megtételéhez a dolgozók rollert használnak, melyhez külön jogosítvány szükséges, a megfelelő biztonság eléréséhez. A csomagolás előtt tamponnyomással viszik fel a dekorációt a különböző elemekre. [10, 11]

A szereldében figurákat, járműveket és állatokat raknak össze. Mivel a DUPLO termékcsalád már másfél éves kortól használható, ezért kiváltképp fontos, hogy ne jöjjenek szét az egyes darabok. Minden fázisban különböző teszteknek vetik alá az elkészült termékeket. Például 3D koordináta mérőgéppel ellenőrzik az egyes darabok pontosságát. Ez is azért fontos, hogy az egyes alkatrészek tökéletesen passzoljanak egymáshoz. [10, 11]

Mivel gyerekjátékokról van szó, ezért mindenféle behatásra tesztelik a LEGO és DUPLO elemeket. Például harapás, taposás. Egyes elemeket erőmérőnek és roncsolásos vizsgálatoknak is alávetnek. A csomagolásnál először külön dobozokba rendezik az alkatrészeket, majd lemérik, hogy biztosan azok az elemek legyenek bennük, amik szükségesek. Ez után a gyűjtődobozok tartalma automatikusan műanyag tasakokba kerül. Ezeket század gramm pontossággal ismét lemérik. Végül a zacskók, az építési útmutatók és a nagyobb, különálló elemek, emberi erőforrás felhasználásával kerülnek bele a megfelelő dobozokba. Emellett még kiemelendő, hogy cukornád alapú polietilénből készül a termékek 2%-a. Ezek rugalmasabbak, és megújuló forrásból származó alapanyagból készülnek. A gyár célja az, hogy 2030-ig az összes alkatrész ABS-ből készüljön. [10, 11]

6. Anyagok összehasonlítása

A két leggyakrabban használt anyag a 3D nyomtatásban, a PLA (Polylactic Acid azaz Politejsav) és az ABS (akrilnitril-butadién-sztirol). Ezek nem csak azért népszerűek, mert könnyen kezelhetők és viszonylag olcsón beszerezhetők, hanem azért is, mert az ingyenes szoftverekben is adatbázis szinten benne vannak.

6.1. PLA

A PLA egy vízben nem oldódó biológiai anyagokból előállított polimer, melynek legjobb tulajdonságai között említeném meg, hogy kiváló felületi minőségű alkatrészeket lehet belőle nyomtatni a megfelelő beállítások mellett. Olvadáspontja 150-160 °C körül van, így viszonylag alacsony hőfokon 190-210 °C-on nyomtatható a belőle készült filament. Rengeteg színben elérhető már, így színes termék nyomtatásához kifejezetten ajánlott. Nem mérgező, és nyomtatása közben nem jön létre kellemetlen szagú gáz sem. A PLA mellett szól az is, hogy jelentős toleranciát mutat a hőmérséklet és az előtolási sebesség változtatásaival szemben, ezt a 6. ábra és az 1. táblázat mutatja be. [3, 12, 13]



6. ábra PLA-ból 3D nyomtatott termékek összehasonlítása [13]

1. táblázat A PLA-ból nyomtatott termékek paraméterei [13]

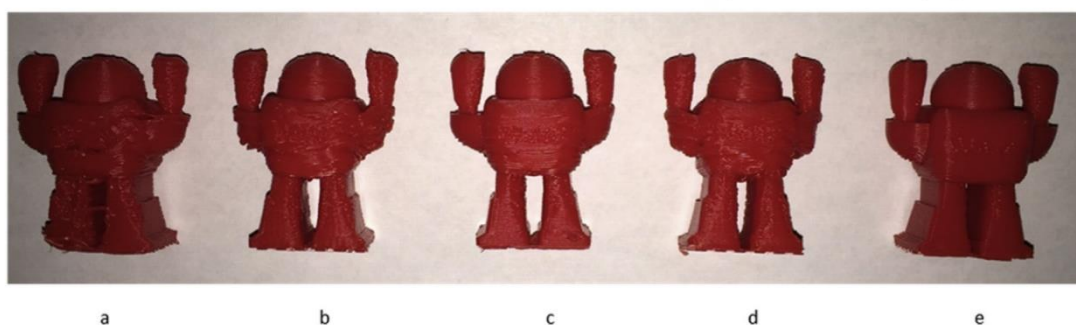
	a	b	c	d	e
Hőmérséklet	200 °C	200 °C	200 °C	180 °C	220 °C
Előtolási sebesség	90 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	60 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	30 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	60 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	60 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Hátrányai közé tartozik, hogy nem UV álló, így csak beltéri használatra ajánlott, valamint, hogy a hőtűrése viszonylag alacsony ($\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$), így a magas hőmérsékletállóságot mint kritérium, nem tudja teljesíteni. Emellett merev, így nem ajánlott hajlékony, kopásálló tárgyak esetén alkalmazni. [3, 12]

6.2. ABS

Az ABS egy amorf polimer, melynek nincs meghatározott olvadáspontja. Általában $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ feletti hőmérsékletet kell elérnie legalább a felhasználhatósága érdekében, de $220\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on nyomtatják. Emellett fontos az asztal fűtése is $90\text{--}110\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra, hogy melegen tartsa még a kinyomott anyagot egy ideig, így megelőzve a vetemedést. Jóval magasabb hőállósággal rendelkezik, mint a PLA. Emellett keményebb, kémiaileg ellenállóbb és rugalmasabb lesz. Ez által tartós, ütésálló alkatrészeket tudunk nyomtatni vele. [3, 12, 13]

Nagy hátránya, hogy hajlamos a vetemedésre, így elő kell fűteni az asztalt és akár kiegészítésként karima nyomtatását is alkalmazni kell. Nyitott terű nyomtatók esetén pedig különösen oda kell figyelni a hőtartásra. Nem biokompatibilis és a nyomtatáskor keletkezett intenzív, kellemetlen gőz keletkezik. Az ABS filament esetén erős összefüggés figyelhető meg a vizsgált paraméterek és a termék minősége között, tehát nem kompatibilis a gyors nyomtatási sebességgel és az alacsony fűvóka hőmérséklettel, melyet a 7. ábra és 2. táblázat mutat be. [3, 12, 13]



7. ábra Az ABS-ből 3D nyomtatott termékek összehasonlítása [13]

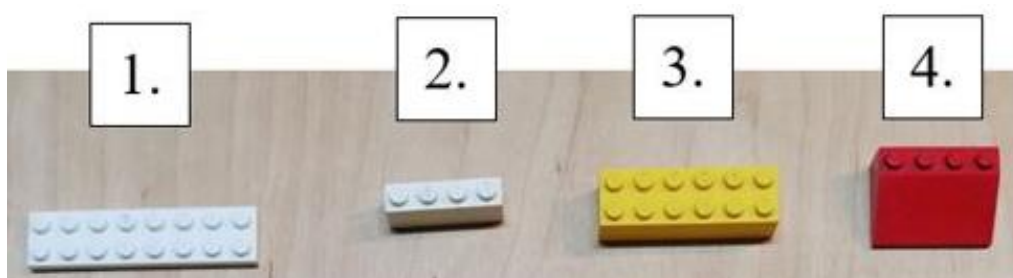
2. táblázat Az ABS-ből nyomtatott termékek paramétereit [13]

	a	b	c	d	e
Hőmérséklet:	220 °C	220 °C	220 °C	200 °C	240 °C
Előtolási sebesség:	$90 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$60 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$30 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$60 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$	$60 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Megállapítások	Súlyos hiba	Deformáció, durva felület	Durva felület	Deformáció, durva felület	Megfelelő termék

7. Próbatetek bemutatása

7.1. Az alkatrészek kiválasztása

A dolgozatomban szereplő LEGO alkatrészeket több szempont alapján választottam ki. Az itthoni készletek átvizsgálásával kezdtem a munkát. Az első kitételem az volt, hogy viszonylag gyakran előforduló elemekkel dolgozzak. Továbbá igyekeztem különböző méretű és formájú darabokat választani, hogy minél szélesebb körű legyen a vizsgálat. Végül, de nem utolsó sorban pedig törekedtem arra, hogy az alakzatok egyszerűek legyenek, mely mind a mérések, mind pedig a 3D modellezés szempontjából is fontos volt.

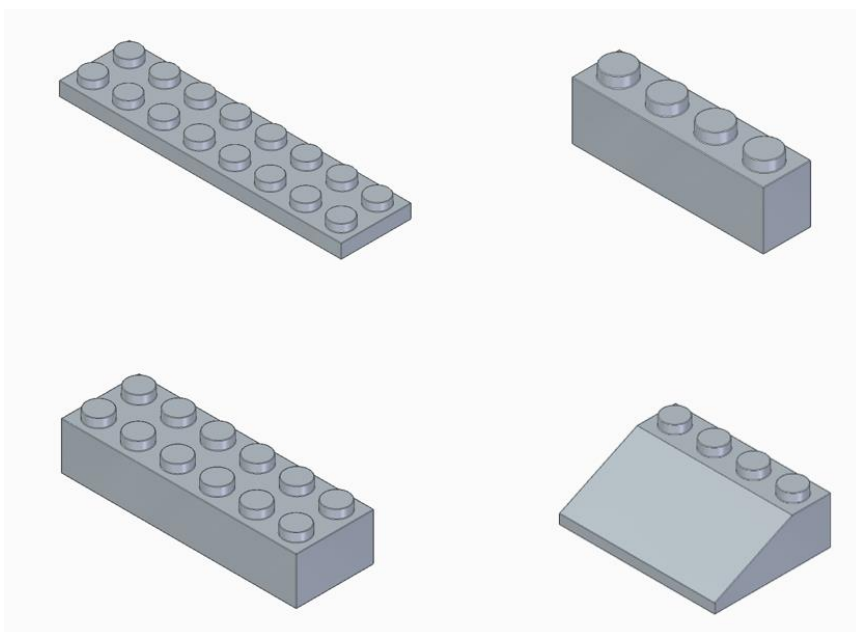


8. ábra A kiválasztott LEGO elemek [saját]

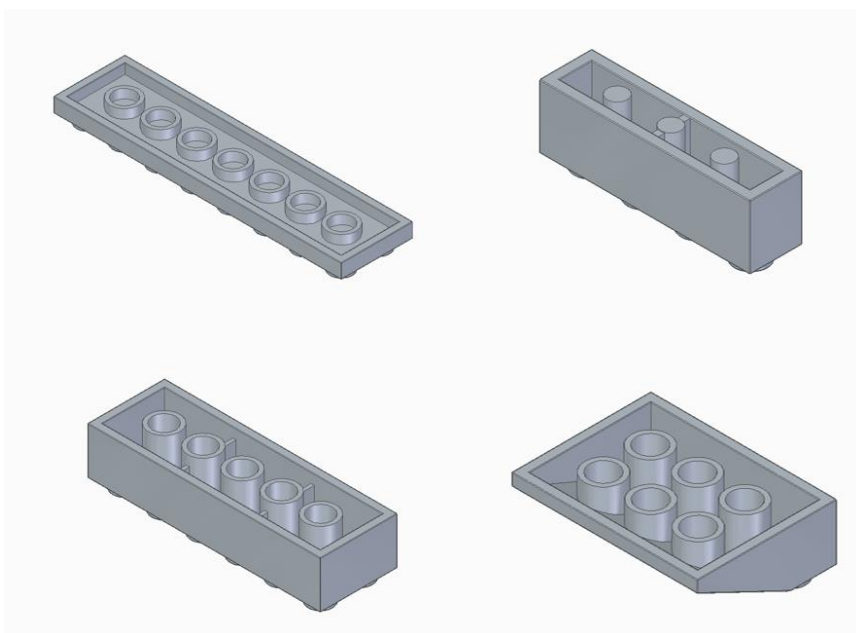
7.2. A próbatetek modellezése

Miután sikeresen kiválasztottam a 4 alkatrészt, kezdődhetett a modellezés fázisa. A LEGO elemeket a 2022-es Solid Edge számítógépes program diák verziójában hoztam létre. Tanulmányaim és szakmai gyakorlatom során is ezt a programot használtam, így szerencsére nem akadtam nehézségekbe a munkadarabok lemodellezése közben. Az elemek méreteinek leolvasását analóg tolómérővel valósítottam meg.

A LEGO elemekről általánosságban elmondható, hogy falvastagságuk 1,5 mm. A tetejükön lévő hengerek, melyek fontos szerepet játszanak az egymáshoz való illeszkedésben, 4,9 mm átmérőjűek, 1,8 mm magasak és a szélektől, valamint egymástól 3,8 mm-re helyezkednek el. A lemodellezett LEGO elemek a 9. és 10. ábrán láthatóak.

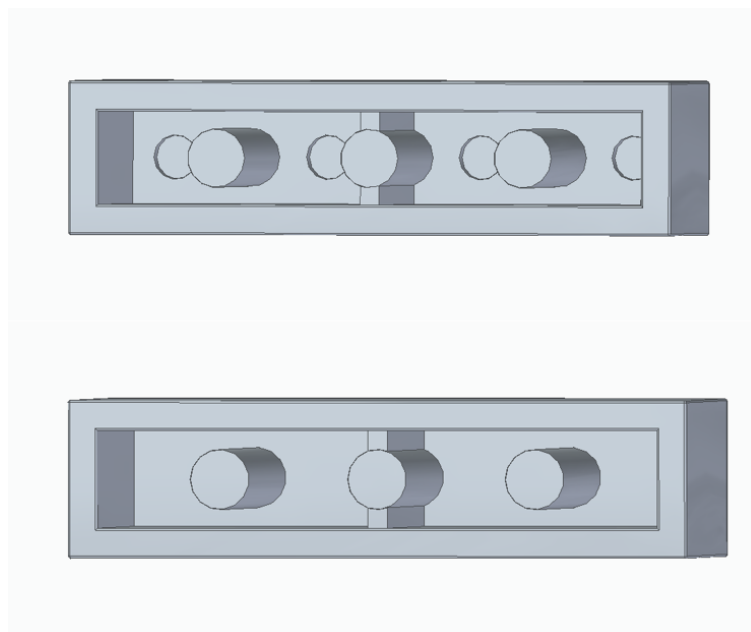


9. ábra Lemodellezett alkatrészek [saját]

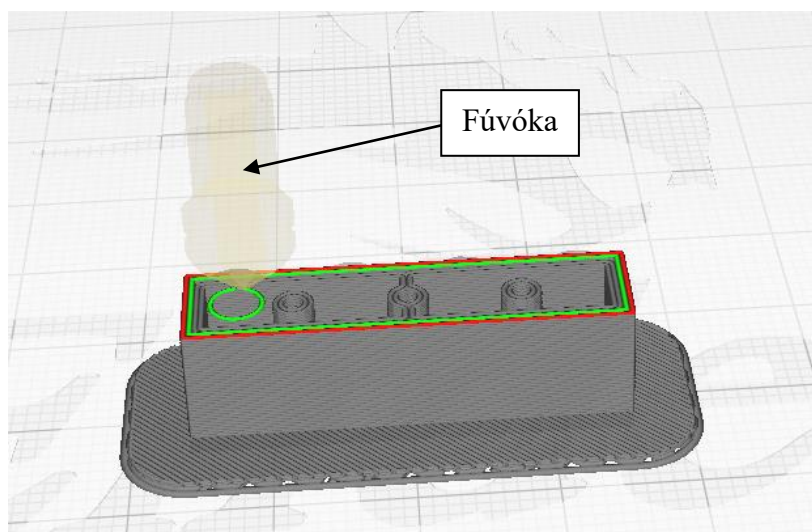


10. ábra Lemodellezett alkatrészek alulról [saját]

Az eredeti LEGO-tól sajnos el kellett térnem egy kicsit. A modellre a próbanyomtatások után került rá a változtatás, mely a 11. ábrán megfigyelhető. Bizonyos okokból, amiket dolgozatom későbbi részében fogok taglalni, támaszanyag nélkül, állítva (ahogy a 9. ábrán is látszik) kellett kinyomtatnom a darabokat. Szükséges volt eltávolítani a belső hengerkivágásokat a modelltől, ugyanis a 12. ábrán látszik, hogy amikor a 49. réteghez ért volna a gép, akkor a falak elkészítése után a levegőbe kezdett volna nyomtatni, ami nem eredményezett volna megfelelő végső darabot.



12. ábra A felső modellen az eredeti kialakítás látszik, az alsón pedig a változtatott [saját]



11. ábra Az Ultimaker Cura program előnézetében látszik, hogy mi okozná a gondot [saját]

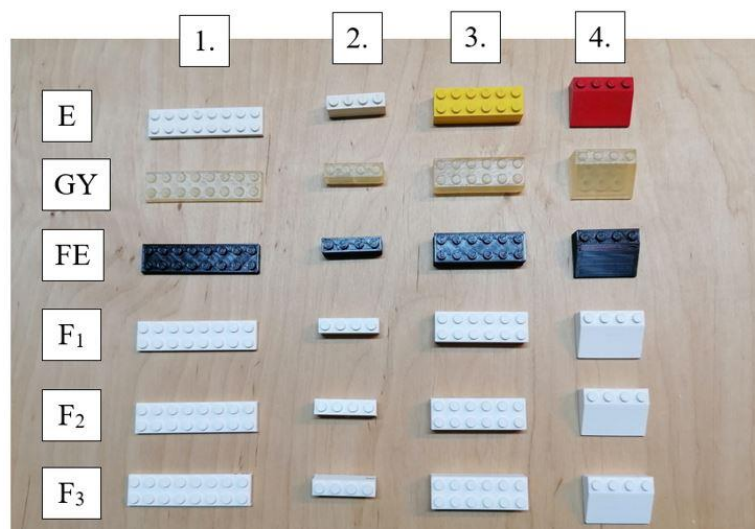
7.3. A próbatestek csoportosítása

A 8.ábrán látható 4 darab LEGO elemet sokszorosítottam 3 különböző 3D nyomtatóval. Sajnos nem tudtam mindegyiken ugyanannyit nyomtatni, így nem lehet jól összevetni a különböző típusokat. Legtöbbet a Creality Ender 3 Pro szálhúzó nyomtatóval tudtam dolgozni, ugyanis ez az itthoni háztartásban fellelhető gép. A Craftbot Flow Inex szálhúzó és a Formlabs Form 3+ gyantás géppel pedig 1-1 nyomtatást tudtam elvégezni.

A nyomtatókkal a dolgozatomban későbbi részében szeretnék foglalkozni, de a 3. táblázat, előzetesen egy rövid összefoglalót nyújt.

3. táblázat Az alkalmazott 3D nyomtatók összehasonlítása [14, 15, 16, 17, 18]

	Creality Ender 3 Pro	Craftbot Flow Ined	Formlabs Form 3+
Nyomtatási technológia	FDM	FDM	SLA
Méret	440 x 410 x 465 mm	635 x 450 x 540	405 x 530 x 780 mm
Tömeg	6,9 kg	32 kg	17,5 kg
Nyomtatási terület	220 x 220 x 250 mm	425 x 250 x 250 mm	145 x 145 x 185 mm
Nyomtatási pontosság	±0.1 mm	±0.1 mm	± 0.025 mm
Kijelző	LCD	érintőképernyős	érintőképernyős
Rétegvastagság	0,1 mm – 0,4 mm	0,1 mm – 0,4 mm	0,025 mm – 0,3 mm
Bruttó ár 2022 végén	110 000 Ft – 120 000 Ft	1 500 000 Ft – 1 900 000 Ft	1 900 000 Ft – 2 100 000 Ft



13. ábra Elkészített próbatestek [saját]

A 13. ábrán látható a 24 darab próbatest. A könnyebb kezelhetőség érdekében csoportosítottam őket. A nagybetűk az előállítás módjára utalnak. Az első sor az első csoport is egyben, mely az E betűjelet kapta, hiszen ezek az eredeti LEGO elemek. A második sor jelölése azért GY betűvel történt, mert ezek készültek gyantából SLA eljárás segítségével. A következő sorok mindegyike FDM technológiával készült. Az FE sorban lévők a Craftbot Flow Inex nyomtatóval készült, azért fekete színben, hogy könnyen meg tudjuk őket különböztetni. Végül de nem utolsó sorban az F₁, F₂, F₃, a Creality Ender 3 Pro nyomtatóval készült, különböző nyomtatási sebességekkel, melyek a 4. táblázatban vannak részletezve.

4. táblázat Összefoglaló táblázat a fontosabb különbségekről [saját]

	Technológia	Nyomtatás sebesség [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
E	Fröccsöntés	-
GY	SLA (Formlabs Form 3+)	-
FE	FDM (Craftbot Flow Inex)	20
F₁	FDM (Creality Ender 3 Pro)	50
F₂	FDM (Creality Ender 3 Pro)	100
F₃	FDM (Creality Ender 3 Pro)	150

7.4. A modellek próbanyomtatása

Miután elkészítettem a 3D modelleket, elmentettem őket olyan formátumba, amelyeket az Ultimaker Cura szeletelő program fel tud dolgozni. Ez jelen esetben Wavefront OBJ file (*.obj) formátum volt.

Az első próbanyomtatásokkor az ajánlott paraméterekkel és támaszanyagokkal nyomtattam, azonban hamar rájöttem, hogy ezek nem lesznek megfelelőek. Először is a rétegvastagságot 0,2 mm-ről levettem 0,1 mm-re. Utána következett a támaszanyag elhelyezkedésének a kikísérletezése. De ekkor több problémába is ütköztem.

7.4.1. Ultimaker Cura

Én az Ultimaker Cura 5.1.1 szeletelő programmal dolgoztam itthon, mert ugyan ez egy ingyenesen elérhető szoftver 3D nyomtatókhoz, mégis széleskörű lehetőségeket nyújt.

A Creality Ender Pro 3 sajnos nem rendelkezik saját memóriával, így két lehetőségem maradt:

- vagy mikro SD kártyáról,
- vagy USB kábel segítségével

nyomtatok.

Először az első módot próbáltam, azaz a mikro SD kártyára raktam fel a kinyomtatni kívánt modellt, miután az Ultimaker Cura programmal rétegekre bontottam, és beállítottam a kívánt paramétereket. Azonban már az első nyomtatásokkal is probléma adódott. Sajnos valószínűleg nem biztosított az elég stabil kapcsolat a mikro SD kártya és a nyomtató között ahhoz, hogy a nyomtatás zavartalanul lefolyjon. Így a második módot kellett választanom, azaz az USB kábel segítségével való nyomtatást. Ennek csak az a hátránya, hogy a számítógépnek, amelyet használunk a nyomtatáshoz mindig ébernek kell lennie, tehát így egyértelműen több az áramszükséglete az eljárásnak.

Az Ultimaker Cura nem csak hasznos program, de nagyon könnyen tanulható. Egyszerű átláthatósága révén a teljesen kezdők is hamar megértik a működését. Sok videó található róla videómegosztó portálokon és az Ultimaker hivatalos weboldalán is. A világ egyik legnépszerűbb 3D nyomtató programja, ugyanis több millióan használják. Rengeteg nyomtatási paramétert lehet rajta állítani. Ezeket a beállításokat 14 fő csoportra lehet osztani, melyek a következők (néhány fontos funkciót is kiemelnék):

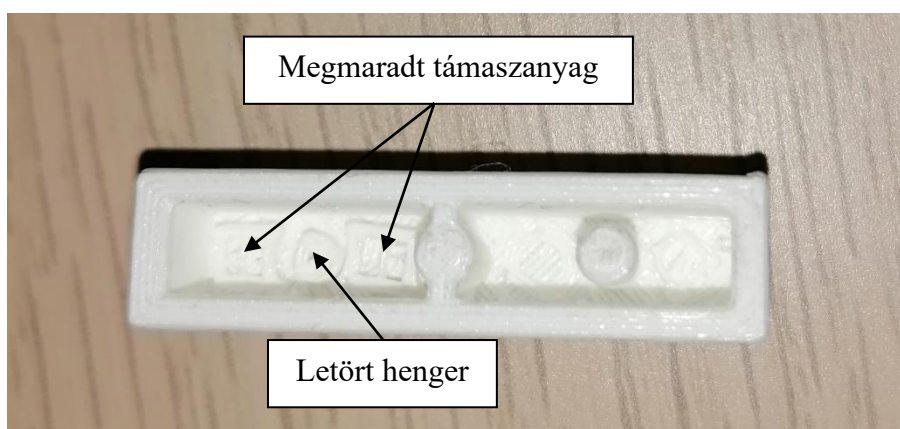
- „Quality”, azaz minőség
 - Itt lehet beállítani a felületi minőséget legjobban meghatározó rétegvastagságot
- „Walls”, azaz a falak
 - Itt lehet beállítani a falvastagságot
- „Top/Bottom”, azaz az alsó és felső rétegek
 - Itt lehet beállítani a felső és alsó rétegek vastagságát, mennyiségét
- „Infill”, azaz a kitöltés
 - Itt lehet beállítani, hogy a külső kontúrok között milyen kitöltést alkalmazzon a nyomtató
- „Material”, azaz az anyag
 - Itt lehet beállítani a nyomtatási – és a tárgyasztal hőmérsékletét.
- „Speed”, azaz a sebesség

- Itt lehet beállítani a sebességeket (nyomtatási, támaszanyag nyomtatási, stb.)
- „Travel”, azaz az extrudáláson kívüli mozgások
 - Itt lehet beállítani az igen fontos „Z hop” funkciót, mely segítségével kevésbé lesz „pókhálós” a modellünk
- „Cooling”, azaz a hűtés
 - Itt lehet beállítani a ventilátor sebességét és hatásfokát
- „Support”, azaz a támaszanyag beállítások
 - Itt lehet beállítani, hogy a támaszanyag hol helyezkedjen el,
 - hány fokos bedőléstől tegyen támaszanyagot,
 - milyen vastag legyen, hány rétegből álljon
- „Build Plate Adhesion”, azaz a tárgyasztal tapadás
 - Itt lehet a későbbiekben említett „Raft” és „Skirt” paramétereit is beállítani
- „Dual Extrusion”, azaz a dupla extruderes gépeknél használt beállítások
- „Mesh Fixes”, azaz modell javító beállítások
- „Special Modes”, azaz a speciális módok
- „Experimental”, azaz kísérleti beállítások

Tehát a Ultimaker Cura programmal igen könnyű volt dolgozni. A nyomtatási hibák kialakulása egyértelműen nem a szoftveren múltott, hanem például a rossz beállításokon vagy a nyomtatón.

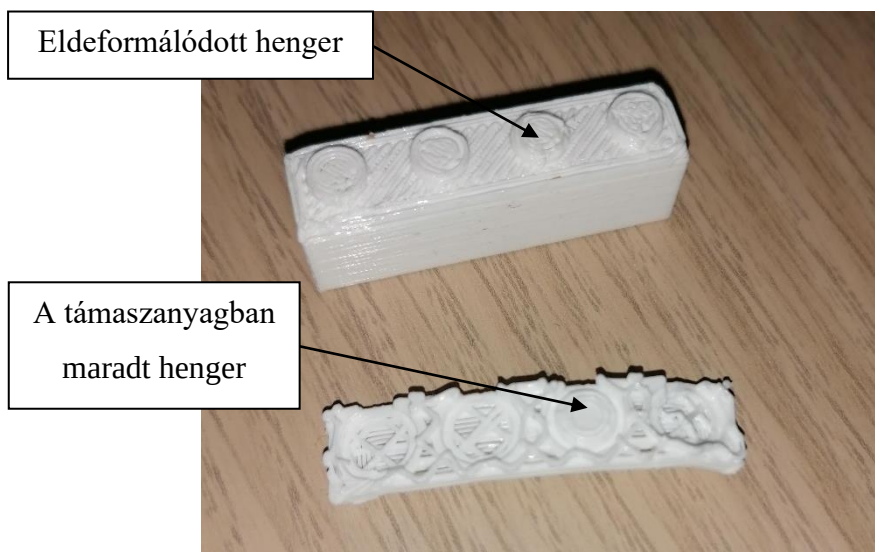
7.4.2. Támaszanyag elhelyezkedése

Először állítva, azaz a 9. ábra szerinti módon nyomtattam ki az építőelemeket. Így az aljába került támaszanyag. Ezzel az volt a probléma, hogy nehezen vagy egyáltalán nem tudtam eltávolítani. Az is megesett, hogy a nyomtatott LEGO-ból kitört egy darab, mikor próbáltam kiszedni a támaszanyagot, ugyanis az nem volt hozzáférhető (14. ábra).



14. ábra Az eltört nyomat [saját]

Ezek után az oldalára fordítva meg se próbáltam a nyomtatást, hiszen akkor ugyan az a helyzet állt volna fenn. Így döntöttem amellet, hogy a következők fejjel lefelé álljanak, azaz ahogy a 10. ábrán, s úgy próbálom meg kinyomtatni őket. Itt a támaszanyag a kis kiálló hengerek köré épül fel. Ekkor olyan problémák léptek fel, hogy a támaszanyaggal együtt lejött vagy éppen eldeformálódott az egyik kis henger (15. ábra).

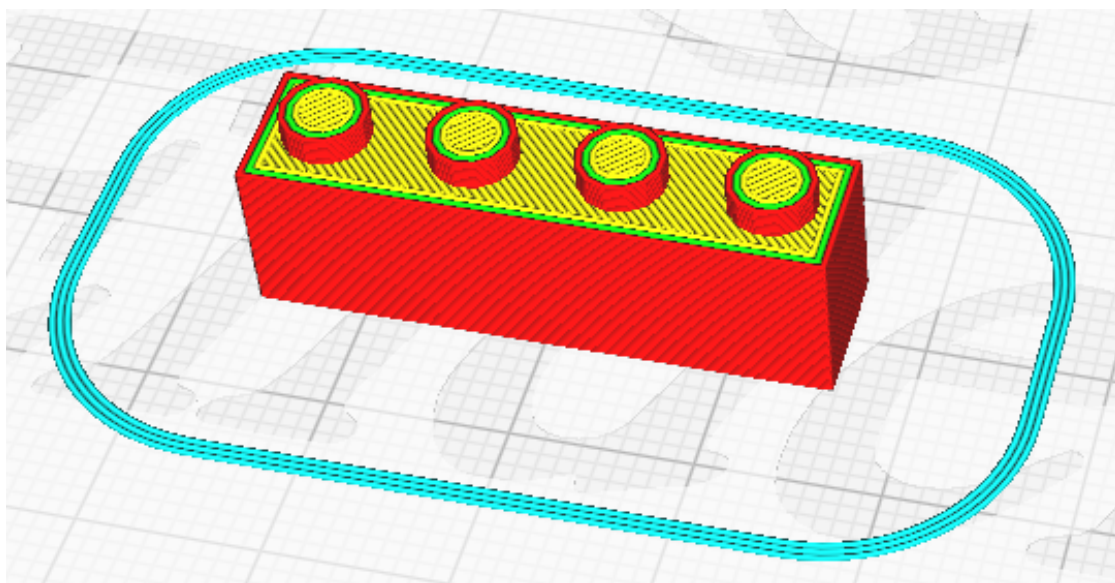


15. ábra Két külön modell támaszanyag hibája [saját]

Végül úgy döntöttem, hogy a folyamatban visszamegyek a modellezés fázishoz, és kicsit alakítok a 3D-s modelleken. Hogy ne kelljen támaszanyagot használnom nyomtatáskor, így időt és anyagot spórolva, a 12. ábrán látható módosításokat hajtottam végre a modelleken. Mindegyikből kivettem azokat a bizonyos kivágásokat, így elérve azt, hogy támaszanyag nélkül is ki tudjam nyomtatni az építőelemeimet.

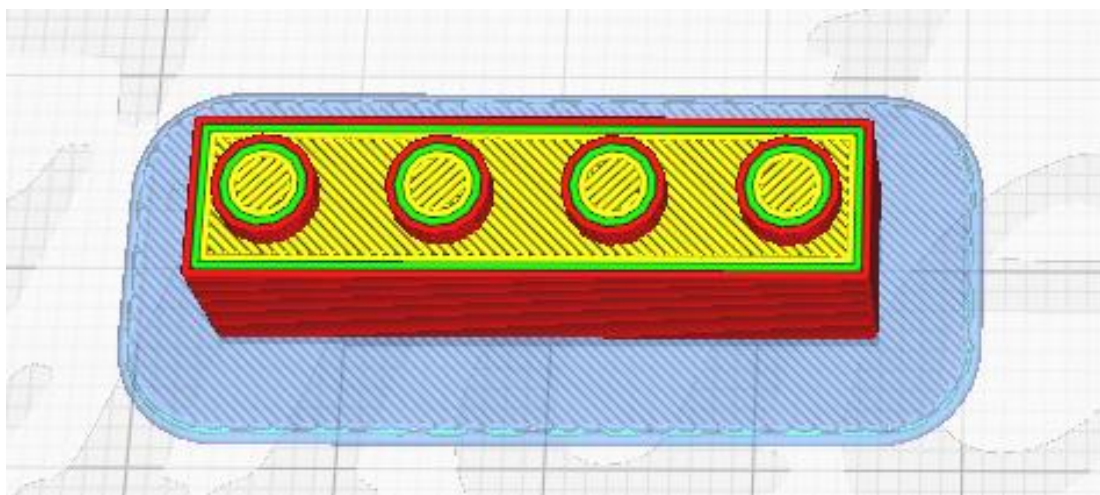
7.4.3. Egyéb beállítások

Miután a támaszanyag probléma megoldódott, akkor kezdtem foglalkozni a többi fontos és elhanyagolhatatlan problémával és beállítással. Az alapbeállításokban a „Build Plate Adhesion” menüpont alatt, azaz a nyomat és a tárgyasztal közötti tapadást segítő beállításokban a „skirt” funkció volt eredetileg beállítva. Ennek jelentése, hogy a tárgy nyomtatásának megkezdése előtt a modell nagyított kontúrját követve a nyomtató úgy mond egy kerettel veszi körbe azt. Azért hasznos, mert ennek a keretnek a kialakítása során stabilizálódik az anyagáramlás, illetve látható, hogy van-e tapadási problémánk még a modell nyomtatásának megkezdése előtt. A rétegek száma egy, viszont szélessége változtatható. A „skirt”-el ellátott modell nyomtatási előnézete a 16. ábrán látható.



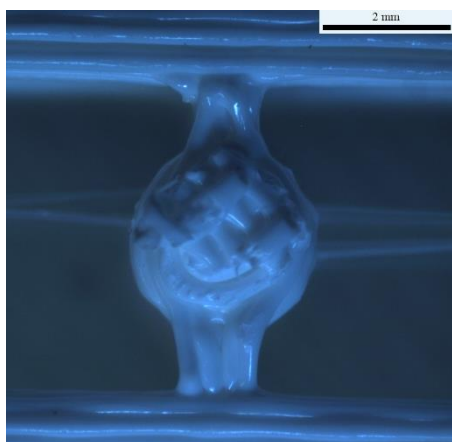
16. ábra Skirt-el ellátott modell nyomtatási előnézete [saját]

A „skirt” beállítással nyomtatott próbadaraboknál az „elefántláb” hiba lépett fel, mely azt jelenti, hogy a tárgyak alja kiszélesedett, így viszont nem lehetett rendeltetésszerűen használni az építőelemeket. Ennek kiküszöbölése érdekében következőnek a „raft” funkciót használtam. Ennek jelentése, hogy a tárgy nyomtatásának megkezdése előtt egy úgynevezett teli alapot, platformot nyomtat alá több réteg vastagságban. Erre kerül rá a későbbiekben a nyomtatunk. Kiváló alapot biztosít a nyomtatott tárgyunk számára, így csökkentve az első rétegek torzulását, és elősegítve a tapadást. Hátránya, hogy növeli a felhasznált anyag mennyiségét és a hulladékot, valamint a nyomtatás idejét. A „raft”-tal ellátott modell nyomtatási előnézete a 17. ábrán látható.



17. ábra Raft-tal ellátott modell nyomtatási előnézete [saját]

Ugyan a nyomatom igen szép, jó minőségű lett, de felmerült a következő probléma is. A raftot nem tudtam eltávolítani megfelelően (18. ábra). Sajnos nagyon odatapadt az aljára, így a modell roncsolása nélkül, és felületi érdessége megőrzése mellett nem lehetett rendesen eltávolítani. Ennek megoldására azt a beállítást eszközöltem, mellyel fel lehet venni a raft és a 3D nyomtatott test közötti légréteg nagyságát (19. ábra). Így már könnyedén le tudtam választani a munkadarabomról a raftot.



18. ábra A Raft eltávolíthatatlanságából adódó hiba [saját]



19. ábra Parancs, mellyel a légréteg vastagságának beállítása történik [saját]

7.4.4. A végső beállított paraméterek

Tehát a fent említett problémákat összevetve állítottam össze, hogy mik lesznek a végső paraméterek az F₁, F₂ és F₃-as sorozatnál. A rétegvastagságot 0,1 mm-re vettem le, ugyan így megnövelve a nyomtatási időt, de javítva a felületi érdesség minőségét. A falvastagság 0,8 mm, míg a vonalak száma a falakban 2. Az alsó és felső réteg vastagsága 0,6 mm, és mind a kettőből 2-2 van. A kitöltés 15%-os lett, mintája pedig „cubic”, amely jelentése, hogy kitöltésként kocka mintázatokat rajzol a nyomtató. A nyomtatási hőmérséklet 200 °C, a tárgyasztalé pedig 60 °C. A nyomtatási sebességek 50, 100 és 150 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ míg az utazó sebessége végig 120 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ volt. Be volt kapcsolva a kiemelten fontos Z Hop funkció is. A próbadarabjaim ezért nem lettek „pókhálósak”. A ventilátor sebessége a maximumra, azaz 100% volt állítva.

A raftnál a kiterjedése 5 mm-re, a légrése 0,4 mm-re lett állítva. A felső rétegei (2 db) 0,2 mm vastagok, vonalai 0,4 mm szélesek voltak, egymás középvezonalai között 0,4 mm-es réssel. Ez a résszélesség általában a raft felső rétegeinek vonalainál megegyezik a szélességükkel, hogy szépen összeérjenek. A középső réteg vastagsága 0,16 mm, melyeknek vonalai 0,8 mm szélesek. A raft alapja 0,36 mm magas volt, és $30 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ -mal lettek nyomtatva, hogy megfelelő legyen a tapadás.

8. Az alkalmazott 3D nyomtatók és anyagok bemutatása

8.1. Az alkalmazott 3D nyomtatók bemutatása

Végül a próbanyomtatások után már ugyan nagyjából zökkenőmentesen, mégse hibátlanul, de ki tudtam nyomtatni a LEGO elemeimet. Három nyomtatót alkalmaztam, a nagyobb skálán történő összehasonlítás érdekében.

8.1.1. Creality Ender 3 Pro

A Creality Ender 3 széria tovább fejlesztett változata az Ender 3 Pro. Az első generációhoz képest megerősített alumínium szerkezetet kapott a gép stabilitásának növelése érdekében, ezzel emelve a nyomtatási minőséget, illetve a C-MAG mágneses tárgyasztalnak köszönhetően az eltávolítható lapról könnyedén leszedhetővé vált az elkészült modell. A nyomtató területe teljesen nyitott, valamint egy darab extrudáló fejjel rendelkezik. A Creality Ender 3 Pro 3D nyomtató kiváló otthoni hobbi nyomtatónak számít. 2022 végén a bruttó ára 110 000-120 000 Ft között mozgott a különböző magyarországi webáruházakban. Alacsony ára és elfogadható nyomtatási minősége miatt kiválóan alkalmas lakossági felhasználásra. Műszaki paramétereit az 5. táblázatban összesítettem. [14, 15]

5. táblázat Creality Ender 3 Pro műszaki paraméterei [14, 15]

Méret	440 x 410 x 465 mm
Tömeg	6,9 kg
Nyomtatási technológia	FDM
Nyomtatási terület	220 x 220 x 250 mm
Extrudálás	bowden
Extrudáló fejek száma	1 db
Maximális nyomtatási hőmérséklet	260°C
Tárgyasztal maximális hőmérséklet	110°C
Gyári fűvóka méret	0.4 mm
Filament átmérő	1.75 mm
Nyomtatási pontosság	±0.1 mm
Réteg vastagság	0.1 mm - 0.4 mm
Kijelző	LCD
Fájlátvitel	mikro SD kártya, USB

8.1.2. Craftbot Flow Inex

A Craftbot Flow Inex 3D nyomtató a CraftUniqe Kft. magyar vállalat 2019-ben bemutatott gyártmánya. A gépek fejlesztése és gyártása is Magyarországon történik. A Craftbot Flow Inex 3D nyomtatót erős mechanika, könnyű kezelhetőség, nagyfokú precizitás és stabilitás jellemzi. A 3D nyomtatás FDM technológiához készült legtöbb alapanyagot képes kezelni. Nyomtatási kamrája nyitott, de jár hozzá olyan tető, mellyel könnyedén le lehet zárni. 2 db extruder fejjel és fűtött tárgyasztallal rendelkezik. A kitűnő megbízhatósága miatt kis és nagyvállalatok előszeretettel alkalmazzák például az Alps Alpine, Alps Európai Elektronikai Ipari Kft, a nagyvállalat, ahol a szakmai gyakorlatomat végeztem, 2 db ilyen gépet is üzemeltet a gyártósorok működésének megkönnyítése érdekében. Könnyű kezelhetősége miatt oktatási célokra is alkalmazható. 2022 végén a bruttó ára 1 500 000 - 1 900 000 Ft között mozgott a különböző

magyarországi webáruházakban. Műszaki paramétereit a 6. táblázatban összesítettem. [16]

6. táblázat *Craftbot Flow Inex* műszaki paramétereit [16]

Méret	635 x 450 x 540 mm
Tömeg	32 kg
Nyomtatási technológia	FDM
Nyomtatási terület	425 x 250 x 250 mm
Extrudálás	közvetlen
Extrudáló fejek száma	2 db
Maximális nyomtatási hőmérséklet	300°C
Tárgasztal maximális hőmérséklet	110°C
Gyári fúvóka méret	0,25; 0,4; 0,8 mm
Filament átmérő	1.75 mm
Nyomtatási pontosság	±0.1 mm
Réteg vastagság	0.1 mm - 0.4 mm
Kijelző	érintőképernyő
Fájlátvitel	microSD kártya, USB, Wi-Fi, LAN
Belső memóriával rendelkezik	igen

8.1.3. Formlabs Form 3+

A Formlabs Form 3+ gyantás 3D nyomtató a Formlabs által kifejlesztett kis erejű sztereolitográfias technológiát használja. Fény előállító egysége 250 mW teljesítményű lézersugár előállítására képes, melynek 25 mikron az XY irányú felbontása így kiváló pontosságot garantálva. Az alapanyag betöltés tartállyal történik, ami néhány másodperc alatt cserélhető ezáltal könnyű kezelhetőséget biztosít. Ez a fajta nyomtató több mint, 35 féle alapanyaggal képes dolgozni. A nyomtatás minőségét optikai szenzorokkal felügyelik, a nagyfokú pontosság, megbízhatóság és könnyű kezelhetőség

eredményeképp ipari szintű nyomatok előállítására alkalmas. 2022 végén a bruttó ára 1 900 000 – 2 100 000 Ft között mozgott a különböző magyarországi webáruházakban. Műszaki paramétereit a 7. táblázatban összesítettem. [17, 18]

7. táblázat A Formlabs Form 3+ műszaki paramétereit [17,18]

Méret	405 x 530 x 780 mm
Tömeg	17,5 kg
Nyomtatási technológia	SLA
Nyomtatási terület	145 x 145 x 185 mm
Gyanta tartályok száma	1 db
Nyomtatási pontosság	± 0.025 mm
Rétegvastagság	0.025 mm - 0.3 mm
Kijelző	érintőképernyő
Fájlátvitel	Wi-Fi, LAN

8.2. Az alkalmazott anyagok bemutatása

A következő alfejezetekben ismertetem a 3D nyomtatás során alkalmazott anyagokat.

8.2.1. PLA

PLA másik nevén a Politejsav a legjobban elterjedt anyag az otthoni 3D nyomtatás körein belül. Egyszerűen beszerezhető, környezetbarát, és könnyű tárolni, valamint kezelni is. Ahhoz, hogy nyomtatni tudjunk vele, legalább 190 °C- ra kell melegíteni a gépet, de ezt a hőmérsékletet a legolcsóbb FDM típusú nyomtató is képes elérni.

Az ABS a PLA-val szemben intenzív gőzt bocsájt ki a nyomtatása közben, amit ha huzamosabb ideig belélegzünk, rosszul is lehetünk. Így nem lenne célszerű egy zárt helyiségben elhelyezett nyitott terű nyomtatónál ABS-t használni alapanyagként. (Mint például a Creality Ender 3 Pro esetében). Nem csak a kellemetlen gőz miatt vettem el az ABS nyomtatást, hanem azért is, mert a Creality Endre 3 Pro teljesen nyitott terű, ami

azt eredményezné, hogy nyomtatás közben nem lenne elég a fűtött tárgyasztal ahhoz, hogy ne kezdje meg rohamosan a zsugorodást a már kinyomtatott anyag, miközben a művelet még megy.

8.2.2. Formlabs High Temperature Resin - V2

Ezt a gyantát akkor alkalmazzák általában, ha magas hőállóságú termékeket szeretnének belőle nyomtatni, ugyanis akár a 238°C-ot is képes kibírni nyomtatott formában. Ez a gyanta kompatibilis a következő gépekkel: Formlabs Form 2, Form 3, 3L, 3B és 3BL. Emellett akár 25 mikronos felbontást is el lehet vele érni és szakítószilárdsága 58,3 MPa. Hátránya, hogy utókezelés mindenképpen szükséges hozzá. [19]

Ezen jellemzők tudatában lettek kinyomtatva a LEGO-k, azonban sajnos nem a várt eredményt hozta az anyag. Ugyanis még a támaszanyagról való eltávolítás közben is volt olyan építőkocka, ami egyből el is tört. Emellett hallottam olyan vállalatról, akik a saját nyomtatott alkatrészüket körülbelül 6,5-7 percen keresztül benne hagyták egy 235 °C-os kemencében, és az anyag „üvegszerűvé” vált, és a kézbe véve egyből össze is tört.

9. Vizsgálatok és eredmények bemutatása

9.1. Vizsgálati terv készítése

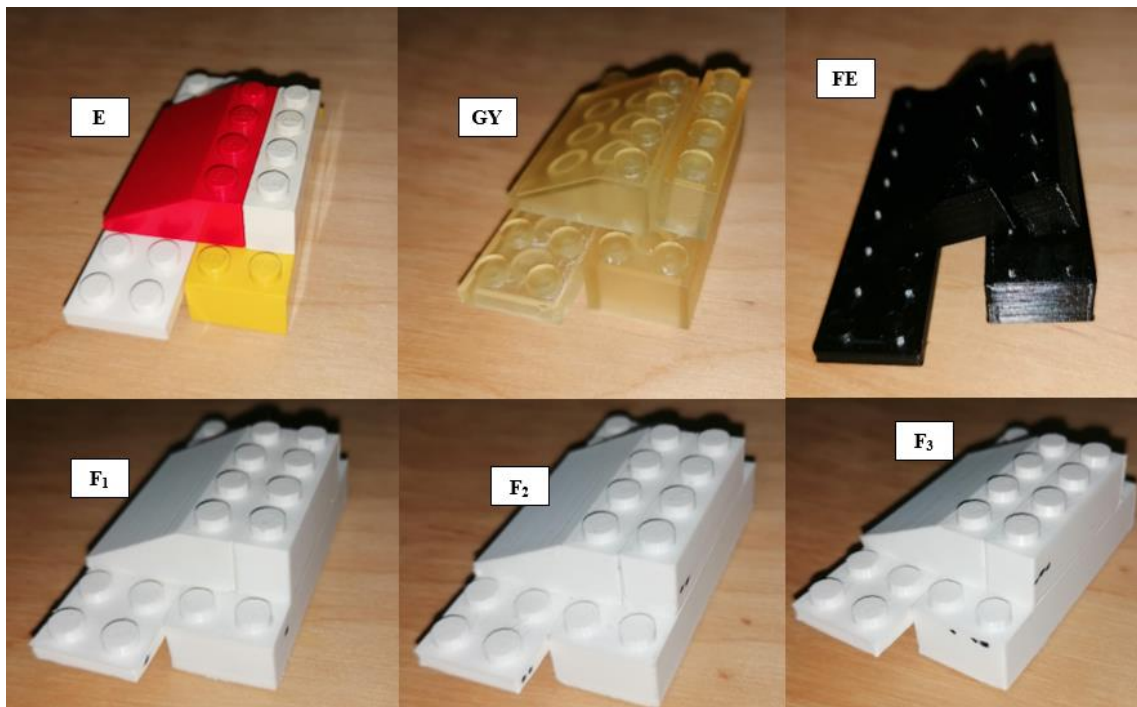
Igyekeztem úgy kiválasztani a vizsgálatokat, hogy azok megfelelően tükrözzék a nyomtatott próbatestek sokszínűségét, változatosságát. Először egy olyan összerakási tesztelést végeztem, mely felméri, hogy a próbatestek összeépíthetők-e egymással. Ezzel lényegében a funkciójukat vizsgáltam meg. Roncsolásos vizsgálatot nem végeztem, így nem volt olyan, melyet mindenképpen a terv végére kellett volna tennem.

A vizsgálatok sorrendje a következőképpen alakult:

1. Funkcióvizsgálat I.
2. Funkcióvizsgálat II.
3. Tömegmérés
4. Nyomtatási idők vizsgálata
5. Keménységmérés
6. Mikroszkópos vizsgálat

9.2. Funkcióvizsgálat I.

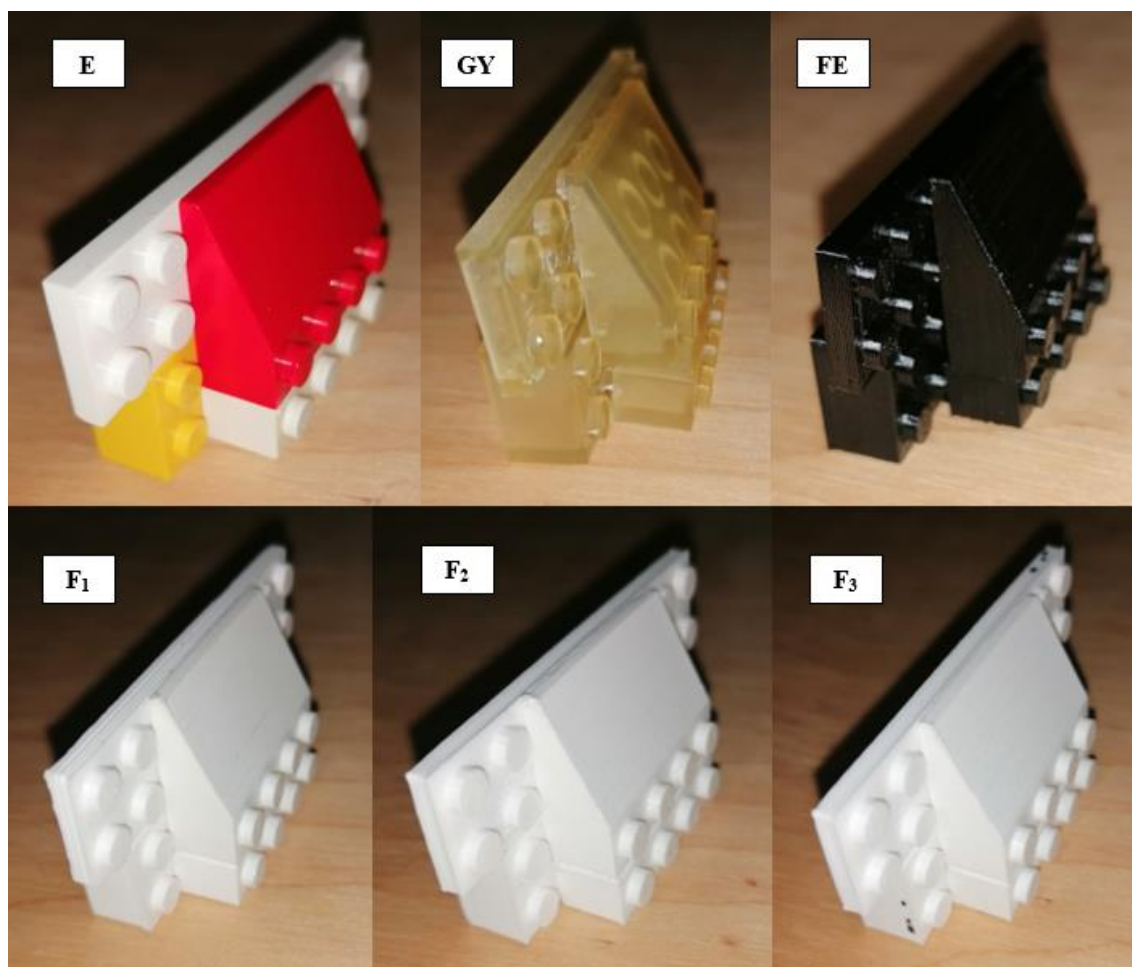
Ez a vizsgálat, mint ahogy a nevében benne van, a LEGO elemek funkcionalitását vizsgálja. Először azt figyeltem meg, hogy az adott csoportokból, melyek a 13.ábrán látszanak, elő tudok-e állítani egy az eredeti darabokból felállított építményt. Az összeilleszthetőségeket szemrevételeztem, képen rögzítettem, majd megfigyeléseimet feljegyeztem.



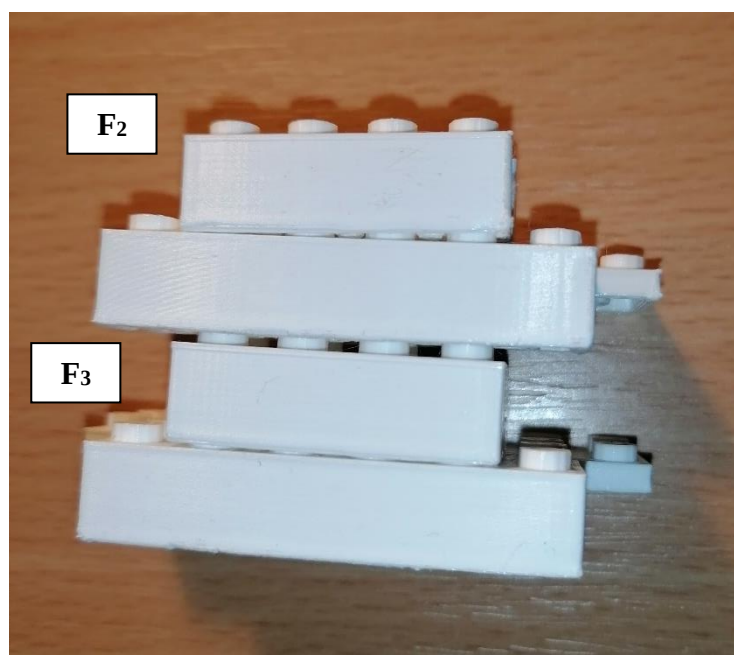
20. ábra A csoportonként összerakott elemek [saját]

A 20. ábrán kitűnően látszanak az összeillesztési hibák. Az E jelölésű képen látszik az eredeti LEGO elemekből összeállított építmény, melyhez hasonlítottam a többit. Nagyszerűen látszanak a képen az illesztési hibák. Sajnos a GY csoportú elemeket, azaz az SLA technológiával készülteteket, nem tudtam összeállítani a kívánt alakzatba. Éppen csak annyira tudtam összenyomni őket, hogy a kép erejéig egyben maradjanak. Mindazonáltal ezekkel még mindig könnyebb dolgom volt, mint az FE szériával. Azokat félig se tudtam összenyomni, mert az „elefántláb” deformáció teljesen használhatatlanná torzította az aljukat.

A 21. ábrán egy kicsit másik nézetből látszanak az összeállítások. Itt is ugyan az a kettő összeállítás mondható rossznak: a GY és az FE sorozat. Emellett más, kisebb hibák is fellelhetők az összeillesztésekben, melyek a 22. ábrán is láthatóak. Az F₂ és F₃ sorozatok összeállításában a kettes és hármas elem között egyértelműen kivehetőek, hogy az illeszkedések nem teljesen megfelelőek. Az F₂-nél a 2. elem anyaghibájából is adódhat ez a pontatlanság.



21. ábra A csoportonként összerakott elemek másik nézetből [saját]



22. ábra Két összerakás közelebbi nézete [saját]

9.3. Funkcióvizsgálat II.

A 2. funkcióvizsgálattal szerettem volna egy átfogóbb képet adni az elemek összeilleszthetőségéről. Hiszen az első vizsgálat csak az egy csoportba tartozó elemek összerakhatóságát vizsgálta. Itt viszont egy elemnek a tetejét és az alját külön górcső alá vettem, ugyanis minden próbatestet minden próbatesttel megpróbáltam összeilleszteni.

8. táblázat Elemek összeilleszthetőségének eredménye (I: igen; N: nem) [saját]

		Felső elem																									
		E1	E2	E3	E4	GY1	GY2	GY3	GY4	FE1	FE2	FE3	FE4	F ₁ 1	F ₁ 2	F ₁ 3	F ₁ 4	F ₂ 1	F ₂ 2	F ₂ 3	F ₂ 4	F ₃ 1	F ₃ 2	F ₃ 3	F ₃ 4		
Alsó elem	E1		I	I	I	N	I	I	I	N	N	N	N	I	I	I	I	I	N	I	I	I	I	I	I		
	E2	I		I	I	N	I	I	I	N	N	N	N	I	I	N	I	I	N	I	I	I	I	N	N		
	E3	I	I		I	I	I	I	I	N	N	N	N	I	I	N	I	I	N	I	I	I	I	I	I		
	E4	I	I	I		I	I	I	I	N	N	N	N	I	I	I	I	I	N	I	I	I	I	I	I		
	GY1	N	N	I	N		I	I	I	N	N	N	N	N	I	N	I	I	N	N	N	I	I	N	I	I	
	GY2	I	N	N	N	I		I	I	N	N	N	N	I	N	I	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
	GY3	I	N	I	I	I	N		I	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	I	I	N	N	I	
	GY4	I	N	N	N	I	N	I		N	N	N	N	I	I	N	I	I	N	I	I	I	I	N	I	N	
	FE1	I	I	I	I	I	I	I	I		N	N	N	I	N	N	N	N	N	N	I	N	I	N	N	N	
	FE2	I	I	I	I	I	I	I	N	N			N	N	I	N	N	N	N	N	I	N	N	I	N	N	
	FE3	I	I	I	I	I	I	I	I	N	N			N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	I	N	N	
	FE4	I	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N			I	I	N	N	I	I	N	N	N	I	N	I	
	F ₁ 1	I	I	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N			I	N	I	I	I	I	I	I	I	N	I	I
	F ₁ 2	I	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N	N	N			N	I	N	N	I	I	N	I	N	I	
	F ₁ 3	I	I	I	I	I	I	N	I	N	N	N	N	N	I	I			I	N	N	N	I	N	N	N	I
	F ₁ 4	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N		N	N	N	I	N	N	N	I	
	F ₂ 1	I	I	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N	N	I	I	N	I			I	I	I	I	N	I	N
	F ₂ 2	I	N	I	I	I	N	N	I	N	N	N	N	N	N	N	N	I	N			I	I	I	N	I	I
	F ₂ 3	I	I	I	I	I	I	N	I	N	N	N	N	N	N	I	N	I	N	I			I	I	I	N	I
	F ₂ 4	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	I	I	N			N	N	N	I
	F ₃ 1	I	I	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N	N	I	I	N	I	I	I	I	I			I	N	I
	F ₃ 2	I	I	I	N	I	N	I	I	N	N	N	N	N	N	N	N	I	I	N	I	I	I			N	I
	F ₃ 3	I	I	I	N	I	I	N	I	N	N	N	N	N	N	I	N	N	I	I	N	I	I	I			I
	F ₃ 4	I	I	I	I	I	I	N	N	N	N	N	N	N	N	I	N	N	N	I	N	N	N	N	I	N	

Az 8. táblázatban a sorok mutatják azokat az elemeket, melyek alul voltak az összerakáskor, így azoknak a felső részüknek illeszkedését vizsgáltam. Az oszlopok mutatják azokat az elemeket, melyek felül voltak az összerakáskor, tehát azoknak az alsó részüknek az illeszkedését vizsgáltam. Az elemeket többször is összeillesztettem, különböző módokon, mielőtt eldöntöttem volna, hogy igent, vagy nemet írok a cellájukba.

Pontosan 5 alkalommal próbálkoztam minden építőelem összerakásával. Annak a függvényében hoztam a döntésem, hogy milyen arányban volt a két lehetőség:

összerakható, vagy nem rakható össze. Ha az illesztés laza volt, azaz nem maradt egyben a két próbatest, akkor is a „nem rakható össze” minősítést kapták, ugyanis a funkciójukat nem látták el. Az 5 alkalomból egyértelműen többséget kellett szereznie az „összerakható” minősítésnek ahhoz, hogy a cellába I betűt, azaz igent írjak.

Az 8.táblázatról elmondható, hogy 249 darab igen, és 258 darab nem megállapítás található benne. Ez azt jelenti, hogy az összes állításnak az 53%-a igaz, míg 47%-a hamis értéket vesz fel. Ugyan négyzetes táblázatról beszélhetünk, hiszen minden elem megtalálható mind az oszlopokban, mind a sorokban is, azonban átló menti szimmetria nem igen fedezhető fel. Azaz a próbatestek felső illeszkedési pontja teljesen máshogy viselkedik, mint az alsó.

Emellett egyértelműen kimondható, hogy az FE sorozat tagjainak alsó része teljes mértékben használhatatlan, hiszen egyik vizsgált elemre se illeszkedtek rá. Ezt a torzulást a már fentebb említett „elefántláb” hiba okozta. Mindazonáltal a felső illeszkedési pontjaik az összes eredeti, valamint a legtöbb gyantával gyártott alkatrészsre rámentek. Ebből megállapítható, hogy a nyomtatás nem volt teljes mértékben kudarc, a hatalmas hiba ellenére sem.

A felső elemként használt eredeti LEGO alkatrészeknél egyedül a GY széria elemei tűnnek ki azzal, hogy ott jóval több volt az összeilleszthetetlen, mint az összerakható. Emellett még a gyantás alkatrészek érdekességei, hogy alsó elemként egyértelműen rosszabbul teljesítettek, mint felső próbatestként. Az arányai az igeneknek és a nemeknek nagyjából reciprokai egymásnak az előbb vizsgált oszlopban és sorban.

Még azt emelném ki, hogy a GY1 sortól és FE1 oszloptól kezdődően szemmel láthatóan megnövekedett a nem összerakható építőelemek száma. Ennek ellenére összességében a vizsgálat azt mutatta ki, hogy az 552 darab vizsgált alkatrészekapcsolatból több mint az 50% megfelelő minősítést kapott.

9.4. Tömegmérés

A tömegmérési vizsgálatot egy Sartorius R300S digitális mérleggel végeztem el (23. ábra). Ez a műszer ezred pontosságra meg tudja állapítani a zárt munkaterébe helyezett tárgy tömegét. Fontos, hogy a jó mérés érdekében nem szabad kitenni hőszugárzásnak, agresszív, maró anyagnak, vibrációnak, huzatnak. [20]

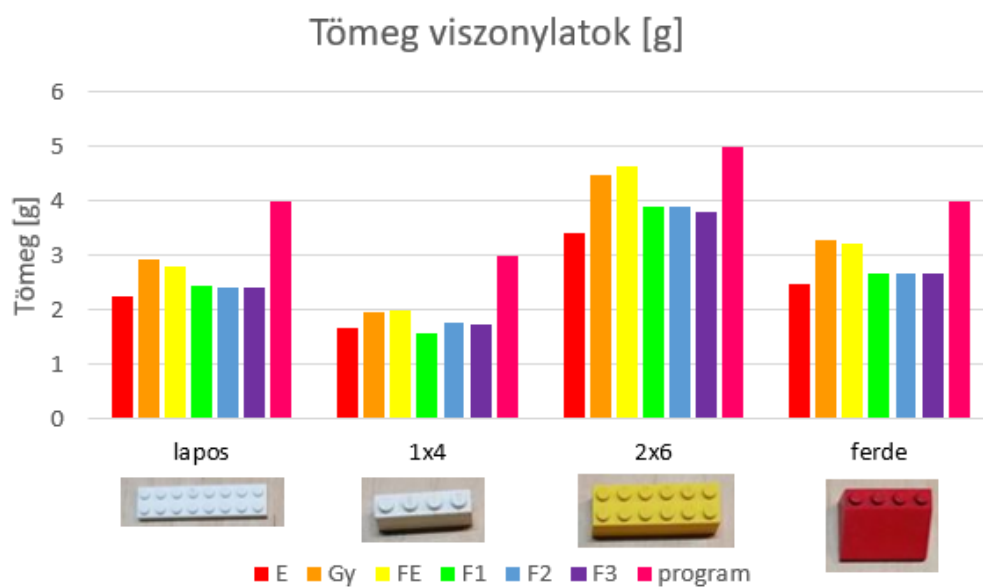
Először is a szintező lábakkal beállítottam a mérleget vízszintbe, ugyanis van rajta egy szintező buborék is. 188 x 150 x 254 mm-es kamrával rendelkezik, melyben megtalálható egy 90 mm átmérőjű „serpenyő”. Erre helyeztem rá a megmérni kívánt próbatestet, miután a bekapcsolást követően a műszer, elvégezte az automatikus öntesztet. A kamrát bezártam, majd megvártam míg a tömeg értéke a kijelzőn stabilizálódik. Csak ez után olvastam le az eredményt. Miután a már megmért építőelemet eltávolítottam a mérőeszközből, vártam, hogy a mérleg stabilan lenullázzódjon, és csak ez után helyeztem a következő próbatestet az előző helyére. A mért értékeket a 9. táblázat mutatja. [21]

9. táblázat A mért tömeg értékek grammban megadva [saját]

	1.	2.	3.	4.
E	2,268	1,682	3,430	2,465
Gy	2,937	1,952	4,471	3,299
F₁	2,449	1,590	3,900	2,675
F₂	2,425	1,768	3,889	2,685
F₃	2,427	1,732	3,800	2,665
FE	2,793	2,006	4,639	3,213



23. ábra Sartorius R300S digitális mérleg [saját]



24. ábra Tömeg viszonylatok grammban megadva [saját]

A 24. ábrán nem csak a mért értékeket jelenítettem meg, hanem az Ultimaker Cura program által előnézetében megjelenített várható anyagfelhasználást is. Ez az eredmény

minden egyes alkatrésznél kiugró értéket vesz fel. Ez elég egyszerűen meg is magyarázható, ugyanis a program a várható felhasznált anyagmennyiséget mutatja, így abba beletartozik a „Raft” közben felhasznált anyag is.

Emellett még az az érdekes, hogy az FE csoport tagjai is szálhúzó nyomtatóval PLA-ból lettek előállítva, akárcsak az F sorozat tagjai. A tömegük mégis inkább a GY sorozat elemeinek tömegeihez közelít, melyeket gyantából állítottam elő. Ez lehet akár benntartott támaszanyagok miatt. Mivel az anyag fekete az FE sorozatnál, ezért nem mondható biztosra, hogy az összes támaszanyag el lett távolítva.

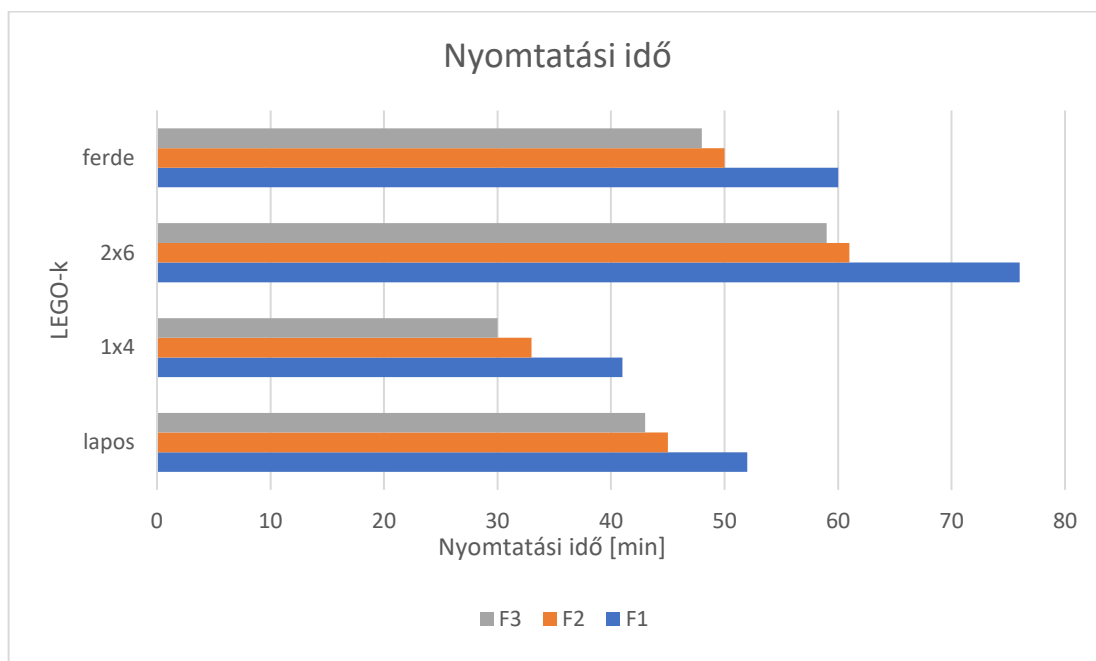
Az eredeti LEGO elemek tömegét egyértelműen az Creality Ender 3 Pro-val készített sorozataim közelítették meg legjobban, annak ellenére, hogy a program sokkal nagyobb értékeket adott ki első ránézésre. Legnagyobb terjedelme a 3. azaz a 2 x 6-os LEGO elemnek van. Ez 1,2 g, mely az átlag tömegnek (nem beleértve a program által számolt adatot) a 30%-a.

9.5. Nyomtatási idők vizsgálata

Az Ultimaker Cura 3D nyomtató program az előnézeti módban nem csak a várható anyagfelhasználást, de a nyomtatási időt is kiírja. Mivel az F1, F2 és F3 nyomtatásokat készítettem ezzel, így ezeket írtam össze, és vizsgáltam meg, hogy milyen összefüggés lehet a nyomtatási sebesség és nyomtatási idő között. A 10. táblázat összegzi a nyomtatási időket és nyomtatási sebességeket.

10. táblázat A nyomtatási idők percben és a nyomtatási sebességek [saját]

	Nyomtatási idők [min]				sebesség [$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$]
	lapos	1x4	2x6	ferde	
F₁	52	41	76	61	50
F₂	45	33	61	50	100
F₃	43	30	59	48	150



25. ábra Nyomtatási idő és a nyomtatási sebesség összefüggése [saját]

A 25. ábrán a feltüntetett LEGO elemek nyomtatási idejei láthatóak. Érdekes megfigyelés lehet, hogy a nyomtatási sebességek szimmetrikusan változnak, a nyomtatási idők azonban nem. Ez talán amiatt lehet, hogy a nyomtató esetlegesen mégse tudja elérni a $150 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ -os sebességet, csak megközelíteni. Ugyanis az F₂ és F₃ elemek nyomtatási idejei között sokkal kisebb a különbség, mint az F₁-es és az F₂-es széria között. Pedig fizikailag pont annyival több sebességgel nyomtattuk az F₃-okat az F₂-ektől, mint az F₂-eket az F₁-ektől.

Az előző mérésből kiderült, hogy az Ultimaker Cura a lapos és a ferde alkatrésznek pontosan ugyan annyi várható anyagfelhasználást számolt ki. Azonban a nyomtatási időknél elég nagy eltérések vannak. Például az F₁-nél 9 perc eltérés van a két LEGO elem között. A ferde alkatrésznek a raftja nagyobb, amit lassabban nyomtat ki a gép, mint magát az elemet, ugyanis ennél tartja végig $30 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$ -os sebességet. A különbség mögött akár az is állhat, hogy a ferde munkadarabnál a felület ferdesége miatt, sokkal több idő kell neki, hogy a külső falakat megcsinálja.

TIME ESTIMATION

Infill:	00:10	19%
Inner Walls:	00:07	14%
Outer Wall:	00:11	23%
Retractions:	00:08	15%
Skin:	00:04	8%
Support:	00:01	3%
Support Interface:	00:06	12%
Travel:	00:02	5%

MATERIAL ESTIMATION

PLA	1.33m	4.0g	€ 0.00
-----	-------	------	--------

TIME ESTIMATION

Infill:	00:07	12%
Inner Walls:	00:11	19%
Outer Wall:	00:21	35%
Retractions:	00:11	19%
Skin:	00:01	2%
Support:	00:01	2%
Support Interface:	00:04	7%
Travel:	00:02	4%

MATERIAL ESTIMATION

PLA	1.28m	3.8g	€ 0.00
-----	-------	------	--------

27. ábra A lapos alkatrész kirészletezett nyomtatási ideje [saját]

26. ábra A ferde alkatrész kirészletezett nyomtatási ideje [saját]

Mint ahogy a 27. és 28. ábra, azaz az alkatrészek kirészletezett nyomtatási ideje mutatja, a második felvetésem az igaz, ugyanis sokkal több idő kell a ferde alkatrésznél a külső falak nyomtatására, mint a lapos alkatrésznél.

9.6. Keménységmérés

A keménységmérést Shore A keménységmérővel végeztem el az 1 x 4-es próbatestek hosszabb oldalain 3-3 alkalommal. Ezt a mérőműszert polimerek, elasztomerek és gumi Shore-keménységének meghatározására használják, mely a 28. ábrán látható. [22]

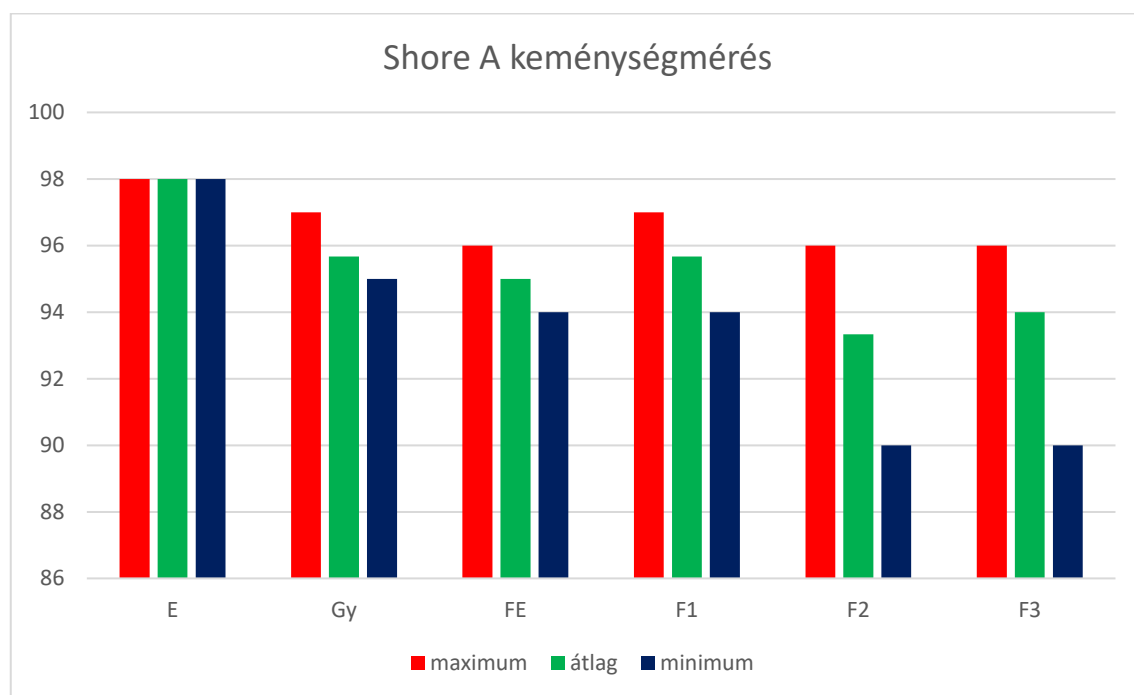


28. ábra Shore A keménységmérő [saját]

Miután az 1 x 4-es LEGO építőelemeket megfelelően stabil helyre raktam, csak akkor kezdtem el a vizsgálatot. A kézi keménységmérőt függőlegesen helyeztem a próbadarabok felületére. Kézi nyomás használata után olvastam le az értéket a skáláról. Mind a 6 próbatesten 6 darab mérést végeztem, hosszabb oldalanként 3-at, melyek eredményei a 11. táblázatban láthatóak.

11. táblázat A Shore-keménységek értéke [saját]

	I. oldal			II. oldal		
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
E	98	98	98	98	98	98
GY	95	96	95	95	97	96
FE	94	95	96	95	96	94
F₁	96	97	96	94	95	96
F₂	92	92	90	95	95	96
F₃	94	94	94	96	96	90



29. ábra A Shore A keménységmérés maximumai, minimumai és átlagai [saját]

A következő sorrendben mértem le a 6 darab LEGO elemet: E, GY, FE, F₁, F₂, F₃. A végső összesített eredmény a 29. ábrán látható. Az eredmények terjedelme és szórása

balról jobbra haladva (mely megegyezik a mérési sorrenddel is) egyre nagyobb lett. Ez lehetséges, hogy azért van, mert egyre nagyobb a nyomtatási sebességünk. Mindazonáltal mivel ez egy kézi keménységmérő, könnyedén megeshet az is, hogy az emberi mérés bizonytalanságából származik ez a nagy terjedelem és szórás. Egyik általam gyártott próbatest maximum értéke se haladja meg az eredeti LEGO elem minimum értékét, tehát a fröccsöntött műanyag keményebb bármelyik most használt 3D nyomtató anyagnál.

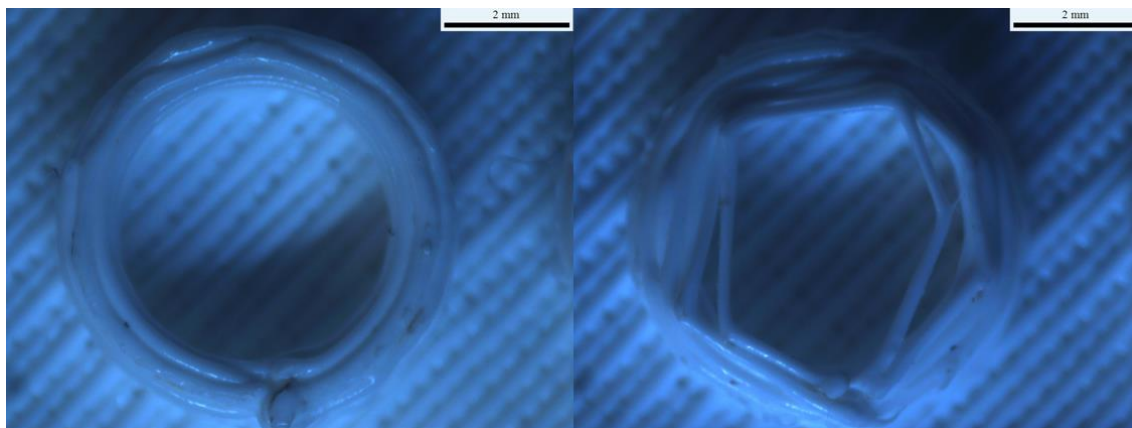
9.7. Mikroszkópos vizsgálat

A vizsgálatok elvégzéséhez egy MicroPublisher 5.0 RTV sztereomikroszkópot alkalmaztam, mely a 30. ábrán látható. Kimagasló látószöge hozzájárul ahhoz, hogy széles tartományban tudjunk méréseket végezni. A mikroszkóp fej egysége több irányba mozgatható, ezáltal megnyitva előttünk a lehetőséget, hogy gyakorlatilag tetszőleges méretű tárgyakat vizsgálhassunk. Ennek ellenére éles kép a tárgyasztalon maximum 30 mm széles elemről készíthető. Felső LED megvilágítással, valamint valós idejű kivetítővel van felszerelve. A vizsgált darabokat a mikroszkóp alá helyezve vizsgáltam.



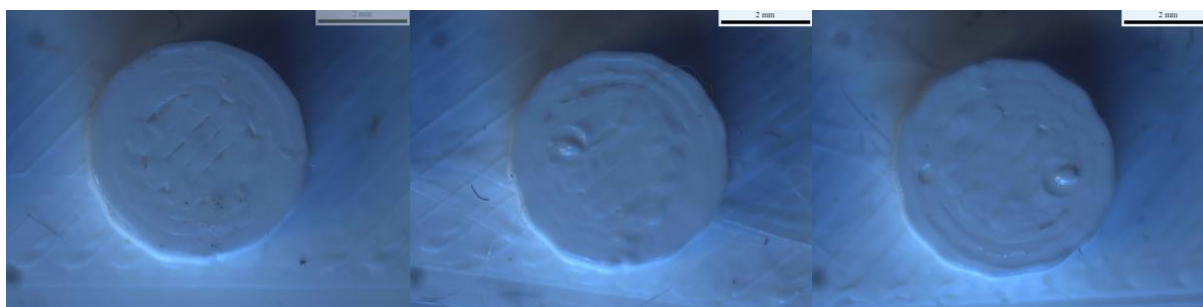
30. ábra MicroPublisher 5.0 RTV [23]

9.7.1. Nyomtatási hibák



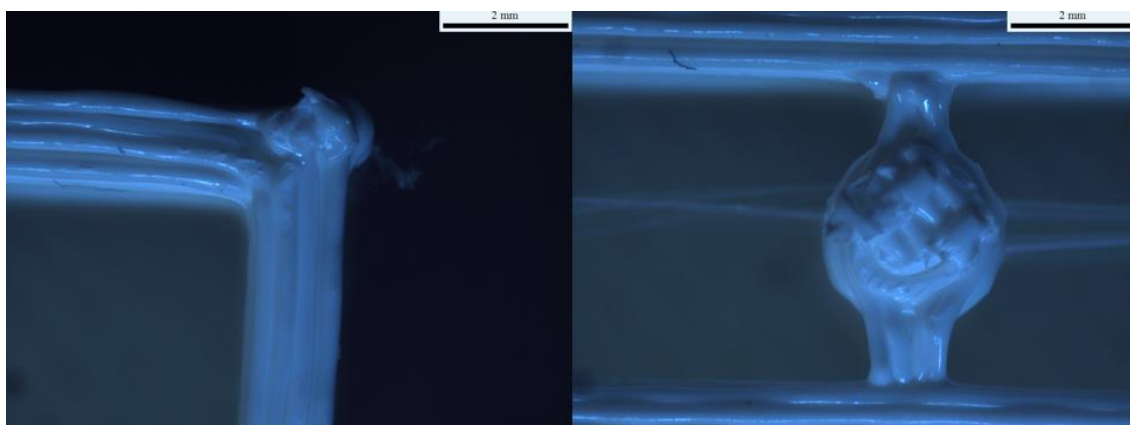
31. ábra A rétegek nem tapadtak meg egymáson [saját]

A 31. ábrán látható nyomtatási hibákat a lapos alkatrészek alján találtam. Valószínűsíthetően a beállított „Raft” légrés miatt nem tapadtak egymáshoz rendesen a rétegek. Érdekes viszont, hogy a két kép ugyan arról a modelltől készült, csak az egyik henger az egyik, míg a másik henger a másik végén található az alkatrésznek. Ezen információ tudatában szerintem attól is kialakulhatott, hogy a nyomtató tárgyasztala elállítódott.



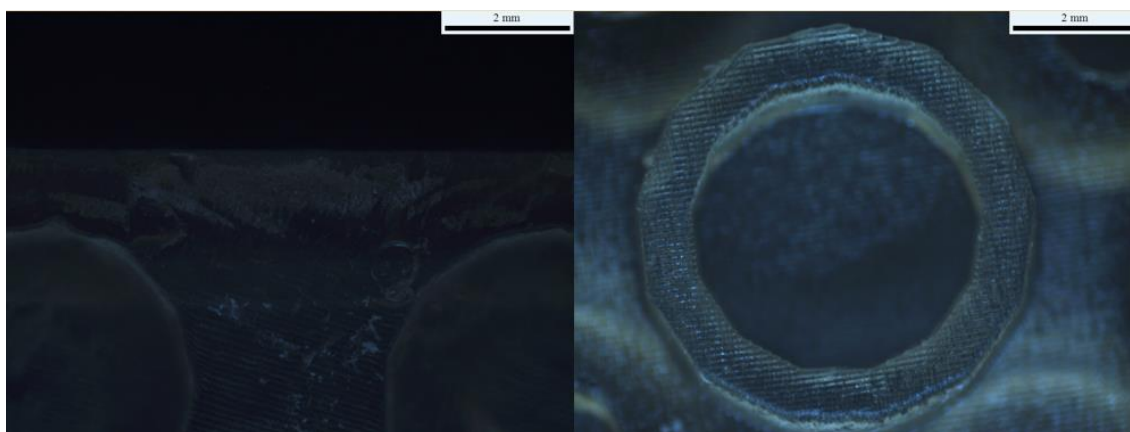
32. ábra Anyaghiány, valamint körkörösségi hibák [saját]

A 32. ábrán látható hengereken szabad szemmel is látszik, hogy a kör, mely a kontúrjukat adja, töredezett. Ez valószínűleg a nyomtatási file formátum rossz felbontásából adódik. Emellett még anyaghiba is látszik a középső és a jobb oldali képen.



33. ábra Felgyülemlett anyagmennyiség (bal), és alátámasztásból adódó hibák (jobb) [saját]

A 33. ábrán bal oldalon felgyülemlett anyagmennyiség látszik, mely az első vizsgálatban okozhatott akár összeillesztési problémákat. Ez valószínűleg azért alakult ki, mert a nyomtatató minden réteget ezen a sarkon kezdett. A jobb oldalt pedig az látható, hogy a „Raft” annyira ráragadt az elememre, hogy nem tudtam teljes egészében eltávolítani.



34. ábra Gyantából készült munkadarabon fellépő hibák [saját]

A GY csoportú nyomtatásoknál is fellépett a körköröségi hiba a hengereknél (34. ábra, jobb), valamint szabad szemmel alig észrevehető anyaghibákat is találtam, melyek adódhatnak abból, hogy az anyag eléggé törékeny.

9.7.2. További nyomtatási hibák

A következőkben olyan nyomtatási hibákat szeretnék bemutatni, melyek szabad szemmel is könnyedén észrevehetők.



36. ábra Elcsúszott rétegek (bal), és "elefántláb" hiba (jobb) [saját]



35. ábra Anyaghiány [saját]

A 35. ábrán bal oldalt az elcsúszott réteg hiba látható. Középen van az eredeti LEGO darab. Ugyan nem sokat mozdult el a réteg, de tökéletesen látszik, hogy mind a kettő ugyanarra, és nagyjából ugyan annyi mm-rel van elcsúszva. Jobb oldalon pedig az „elefánttalp” hiba látható, melyről már írtam dolgozatom korábbi részeiben.

A 36. ábrán elég erős anyaghiány látszódik mind a kettő nyomaton. Ez attól alakult ki, hogy sok ideig ment a nyomtató, ez által már nem tudta a ventilátor megfelelő hőmérsékletre hűteni a fejet. Ennek az lett a következménye, hogy a hő megolvasztotta azokat a részeket is a szálban, melyeknek még teljesen szilárdan kellett volna keresztülhaladnia az adagoló fejen. Az adagoló így nem tudta továbbítani a megolvadt anyagot, így néhol a „fantomnyomtatás” effektusa merült fel, ami azt jelenti, hogy a nyomtató ugyan leköveti a további mozgásokat, de anyag nem jön belőle.



37. ábra Rezgésből adódó hibák [saját]

A 37. ábrán rezgésből adódó hibák látszódnak. Fontos megjegyezni, hogy ezek csak olyan alkatrészekben látszódnak, melyeket nagy sebességen nyomtattam. Tehát az F2-es és F3-as próbatest csoportoknál. Ez az úgynevezett hullámosság azért keletkezett a nyomatokon, mert a nyomtató olyan gyors sebességgel nyomtatott, hogy a Creality Ender 3 Pro berezonált.

10. Összefoglalás

Dolgozatom első felében próbáltam betekintést adni a technológiára, mely egyre jobban terjed el mind az iparban, mind pedig a mindennapi felhasználás területén. A LEGO építőkockák, melyek alapvetően fröccsöntéssel készülnek, már majdnem minden háztartásban fellelhetők, így fontos szerepet töltenek be az emberek életében. A LEGO kiállításokon azt is megmutatják, hogy ezeknek a kis elemeknek rengeteg felhasználási módja van. Egy átlagos, mindennapi játékot vettem alapul, hogy bemutathassam a különböző eljárásokat és megvizsgálhassam a köztük levő különbségeket.

A szakdolgozatomhoz 20 próbatestet készítettem el. Melyek különböző eljárásokkal készültek és más-más paraméterekkel rendelkeznek. Ezeket igyekeztem úgy megválasztani, hogy a vizsgálatok széles skálát mutassanak be.

A funkcióvizsgálatokkal azt szerettem volna bemutatni, hogy annak ellenére, hogy igen pontosnak kell lennünk egy ilyen építőkockánál, a fröccsöntésnél pontatlanabb 3D nyomtatóval is elő lehet állítani megfelelő darabokat. A nyomtatási idők vizsgálatával egy kicsit elrugaszkodtam a földtől, ugyanis nem a látható, fizikai tulajdonságokat vizsgáltam. Nem úgy, mint a tömegmérésnél, a keménységmérésnél, valamint a mikroszkópos vizsgálatoknál. Azt hiszem a legutóbbi volt talán a legérdekesebb, ahol közelebbről szemügyre vehettem a próbatesteket és hibáikat, így keresve a megoldásokat rájuk. Mindemellett a dolgozatom elérte a célját.

Ugyan rengeteg anyagot használtam fel a nyomtatásaim tökéletesítésére, mégse vagyok csalódott, amiért nem sikerültek 100%-ra. Úgy érzem még rengeteg lehetőség van a 3D nyomtatásban és ezeket szeretném jobban megismerni a jövőben. A későbbiekben akár el tudom képzelni magam olyan területen, ahol ezzel foglalkozom.

11. Summary

In the first half of my thesis, I tried to give an insight into the technology, which is becoming more and more widespread both in industry and in everyday use. LEGO building bricks, which are basically injection moulded, are now found in almost every household and play an important role in people's lives. LEGO exhibitions also show that there are many uses for these small elements. I used a typical everyday toy as a basis to demonstrate the different processes and to examine the differences between them.

For my thesis I prepared 20 test pieces. They were made using different procedures and with different parameters. I have tried to select them in such a way that they represent a wide range of tests.

With the functional tests, I wanted to show that, although you need to be very precise with such a building block, you can produce suitable parts with a 3D printer that is less precise than injection moulding. I went a little off the ground by looking at printing times, as I was not looking at the visible, physical properties. Unlike the mass measurement, hardness measurement and microscopic tests. I think the last one was probably the most interesting, where I could take a closer look at the specimens and their defects, looking for solutions to them. Nevertheless, my thesis has achieved its aim.

Even though I used a lot of materials to improve my prints, I am not disappointed that I didn't get them 100%. I feel that there are still many possibilities in 3D printing and I would like to get to know them better and I can even imagine myself in a field where I deal with this in the future.

12. Felhasznált irodalom

- [1] Krupa Gábor (2016). A 3D nyomtatás otthoni lehetőségei, avagy mire is használható a technológia a mindennapokban?; Journal of Applied Multimedia 3./XI./2016
- [2] N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan (2019): An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications
- [3] Balogh Bence; Kovács Péter Zoltán, Szávai Szabolcs (2019). SZIMULÁCIÓS ELJÁRÁSSAL TÁMOGATOTT 3D NYOMTATÁS; Multidiszciplináris tudományok, 9. kötet (2019), 4. sz. pp. 535-547
- [4] CHRISTIAN GROTH, DDS, MS NEAL D. KRAVITZ, DMD, MS PERRY E. JONES, DDS, MAGD JOHN W. GRAHAM, DDS, MD W. RONALD REDMOND, DDS, MS (2014). Three-Dimensional Printing Technology; n Journal of clinical orthodontics: JCO 2014 Augusztus
- [5] ASTM F2792-12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2012
- [6] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó. Budapest, 2000. 235-239, 252. o.
- [7] Sors László, Bardócz László, Radnóti István: Műanyagalakító szerszámok. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1971. 127-128. o.
- [8] Dunai Antal: Műanyagfeldolgozó fröccsöntőgépek. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1976. 20-21. o.
- [9] W. Schaaf, A. Hahnemann: Műanyagokz feldolgozása. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1974. 137. o.

[10] Online megnyitva: 2022. 12. 07.

<https://www.youtube.com/watch?v=ysNhzwV2uAQ&list=PLZlY70b7mZjYPPa-kELOsdYKdIPoBbt&index=1&t=201s>

[11] Online megnyitva: 2022. 12. 07.

<https://www.youtube.com/watch?v=wbrZAtfUJZY&list=LL&index=1>

[12] Online megnyitva: 2022. 12. 07.

<http://kreativ3d.hu/3d-nyomtatás-alapanyagai>

[13] Yelin Deng, Shi-Jie Cao, Ailu Chen, Yansong Guo (2016): The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction

[14] Online megnyitva: 2022. 12. 10.

<https://all3dp.com/1/creality-ender-3-pro-3d-printer-review/>

[15] Online megnyitva: 2022. 12. 10.

<https://www.crealitycloud.com/product/details/604883235852812341df359d?activeName=sku&childActiveName=1>

[16] Online megnyitva: 2022. 12. 11.

<https://shop.freedee.hu/Craftbot-FLOW-IDEX-3D-nyomtató>

[17] Online megnyitva: 2022. 12. 11.

https://3dee.hu/termek/formlabs-form-3-psp-3d-nyomtató/?fbclid=IwAR2Nx5vxLuXWKYC3OCkcJDKoFhWQL1V_yT8sXPSpWP6RifYDQtkSu3Ofivw

[18] Online megnyitva: 2022. 12. 12.

<https://formlabs.com/3d-printers/form-3/>

[19] Online megnyitva: 2022.12.13.

https://3dee.hu/termek/formlabs-resin-high-temperature-v2/?fbclid=IwAR0ZcbW7aT-527nGVbcP4WNggG8LktmOsFgaiLbg-MXgPGMGuu_RAlUZtLk

[20] Online megnyitva: 2022.12.13.

<https://manualzz.com/doc/8341587/r300s>

[21] Online megnyitva: 2022.12.13.

<https://americanlaboratorytrading.com/lab-equipment-products/sartorius-r300s-digital-scale-14578>

[22] Online megnyitva: 2022.12.13.

<https://medianlg.hu/bareiss-oldal/>

[23] Online megnyitva 2022.12.13.

https://tavcso.hu/termekcsopot/mik_stm45

13. Ábrajegyzék

1. ábra Az FDM nyomtatás működési elve [3]	10
2. ábra SLA nyomtatás működési elve [4].....	11
3. ábra A fröccsöntés t-p diagramja [7]	16
4. ábra Az első csigadugattyús fröccsöntőgép [8]	18
5. ábra Négyfészkes fröccsöntőforma nyers terméke [6]	19
6. ábra PLA-ból 3D nyomtatott termékek összehasonlítása [13]	22
7. ábra Az ABS-ből 3D nyomtatott termékek összehasonlítása [13]	23
8. ábra A kiválasztott LEGO elemek [saját]	25
9. ábra Lemodellezett alkatrészek [saját].....	26
10. ábra Lemodellezett alkatrészek alulról [saját]	26
11. ábra Az Ultimaker Cura program előnézetében látszik, hogy mi okozná a gondot [saját]	27
12. ábra A felső modellen az eredeti kialakítás látszik, az alsón pedig a változtatott [saját]	27
13. ábra Elkészített próbatestek [saját]	28
14. ábra Az eltört nyomat [saját]	32
15. ábra Két külön modell támaszanyag hibája [saját]	33
16. ábra Skirt-el ellátott modell nyomtatási előnézete [saját].....	34
17. ábra Raft-tal ellátott modell nyomtatási előnézete [saját]	34
18. ábra A Raft eltávolíthatatlanságából adódó hiba [saját]	35
19. ábra Parancs, mellyel a légréteg vastagságának beállítása történik [saját].....	35
20. ábra A csoportonként összerakott elemek [saját]	43
21. ábra A csoportonként összerakott elemek másik nézetből [saját]	44
22. ábra Két összerakás közelebbi nézete [saját]	44
23. ábra Sartorius R300S digitális mérleg [saját]	48
24. ábra Tömeg viszonylatok grammban megadva [saját]	48
25. ábra Nyomtatási idő és a nyomtatási sebesség összefüggése [saját]	50
26. ábra A ferde alkatrész kirészletezett nyomtatási ideje [saját].....	51
27. ábra A lapos alkatrész kirészletezett nyomtatási ideje [saját].....	51

28. ábra Shore A keménységmérő [saját]	51
29. ábra A Shore A keménységmérés maximumai, minimumai és átlagai [saját]	52
30. ábra MicroPublisher 5.0 RTV [23]	53
31. ábra A rétegek nem tapadtak meg egymáson [saját]	54
32. ábra Anyaghiány, valamint körköröségi hibák [saját]	54
33. ábra Felgyülemlett anyagmennyiség (bal), és alátámasztásból adódó hibák (jobb) [saját]	55
34. ábra Gyantából készült munkadarabon fellépő hibák [saját]	55
36. ábra Anyaghiány [saját]	56
35. ábra Elcsúszott rétegek (bal), és "elefántláb" hiba (jobb) [saját]	56
37. ábra Rezgésből adódó hibák [saját]	57

14. Táblázatjegyzék

1. táblázat A PLA-ból nyomtatott termékek paraméterei [13]	22
2. táblázat Az ABS-ből nyomtatott termékek paraméterei [13]	24
3. táblázat Az alkalmazott 3D nyomtatók összehasonlítása [14, 15, 16, 17, 18].....	28
4. táblázat Összefoglaló táblázat a fontosabb különbségekről [saját]	29
5. táblázat Creality Ender 3 Pro műszaki paraméterei [14, 15]	38
6. táblázat Craftbot Flow Inex műszaki paraméterei [16]	39
7. táblázat A Formlabs Form 3+ műszaki paraméterei [17,18]	40
8. táblázat Elemek összeilleszthetőségének eredménye (I: igen; N: nem) [saját]	45
9. táblázat A mért tömeg értékek grammban megadva [saját]	47
10. táblázat A nyomtatási idők percben és a nyomtatási sebességek [saját]	49
11. táblázat A Shore-keménységek értéke [saját]	52