

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ANYAGSZERKEZETTANI ÉS ANYAGTECHNOLÓGIAI INTÉZET



TDK dolgozat

A 3D nyomtatás paramétereinek vizsgálata, optimalizálása
The examination and optimization of 3D printing parameters

Készítette:

Tóth Dénes, Msc hallgató

Konzulens:

Dr. Kovács Péter Zoltán, egyetemi adjunktus

2014

TARTALOMJEGYZÉK

ÁBRAJEGYZÉK.....	3
1. BEVEZETŐ.....	4
2. RAPID PROTOTYPING TECHNOLÓGIÁK.....	5
2.1. Folyadék alapanyagból kiinduló eljárások.....	5
2.1.1. Lézer sztereolithográfia (SL).....	5
2.1.2. PolyJet.....	7
2.1.3. Szelektív lézer-szinterezés (SLS).....	7
2.1.4. Termikus polimerizáció (LTP).....	8
2.1.5. Sugárnyaláb-interferencia általi polimerizáció (BIS).....	8
2.1.6. Solid ground curing (SGC).....	9
2.1.7. Electrosetting (ES).....	10
2.2. Olvadék alapanyagból dolgozó eljárások.....	10
2.2.1. Ballistic particle manufacture (BPM).....	10
2.2.2. Fused deposition modelling (FDM).....	11
3. AZ ANYAGVIZSGÁLAT.....	14
3.1. A vizsgált polimer.....	14
3.2. A próbatest.....	14
3.3. Az Ultimaker Original.....	15
3.4. A szakító vizsgálatok.....	17
3.4.1. A nyomtatási sebesség változtatásának hatása.....	18
3.4.2. A rétegvastagság változtatásának hatása.....	19
3.4.3. A belső kitöltöttség változtatásának hatása.....	20
3.4.4. A nyomtatási hőmérséklet változtatásának hatása.....	21
3.4.5. A próbatest orientációjának befolyásoló hatása.....	22
4. GYAKORLATI ALKALMAZÁS: AZ E-NABLE KÉZPROTÉZISE.....	23
4.1. Az alapítvány bemutatása.....	23
4.2. A protézisek gyártása.....	23
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	27
IRODALOMJEGYZÉK.....	29

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A háromdimenziós pixel: a voxel [3].....	6
2. ábra A polyjet eljárás elvi vázlata [5]	7
3. ábra A szelektív lézer szinterezés berendezésének elvi vázlata [2]	8
4. ábra A BIS eljárás elvi vázlata [3]	9
5. ábra Az SGC berendezés vázlata [3].....	10
6. ábra A folyadékcseppek egymásra rakódása [3].....	11
7. ábra Az FDM eljárás elvi vázlata [3]	12
8. ábra Az FDM-el készített darabok jellegének megoszlása [1]	13
9. ábra A polilaktid polimer [9]	14
10. ábra ISO 3167 1A próbatest műhelyrajza [7]	15
11. ábra Az Ultimaker Original.....	16
12. ábra Az MTS vizsgáló berendezés.....	17
13. ábra A nyomtatási sebesség változtatásának hatása.....	18
14. ábra A rétegvastagság változtatásának hatása.....	19
15. ábra A belső kitöltöttség változtatásának hatásai.....	20
16. ábra A nyomtatási hőmérséklet változtatásának hatása	21
17. ábra A próbatest orientációjának befolyásoló hatása.....	22
18. ábra A Flexy Hand	23
19. ábraA Cyborg Beast alkar elemének utómunka nélküli állapota.....	24
20. ábra A Cyborg Beast kézfej eleme nyomtatás közben.....	25
21. ábra Az elkészült Cyborg Beast	26

1. BEVEZETŐ

Az FDM (FusedDesposition Modelling) eljárással nagy szabadsággal segítségével, egyszerűen adhatunk alakot terveinknek. Az eljárás nagy előnye, hogy különleges és drága szerszámok nélkül, egy kompakt méretű berendezéssel készíthetjük el modelljeinket.

Ahhoz, hogy a várt eredményt kapjuk, ismernünk kell a nyomtatás, és így a végtermék minőségét is meghatározó befolyásoló paramétereket. Nyári gyakorlatom során azt vizsgáltam, hogy egy adott anyagminőségű filament (a nyomtatás során használt műanyag huzal) feldolgozása során felmerülő beállítási lehetőségek mely kombinációjával tudnám a szakítóvizsgálat szempontjából legkedvezőbb eredményt elérni.

Dolgozatom során szeretném bemutatni rapid prototyping technológiákat, ezen belül a vizsgált FDM eljárást, majd a vizsgált PLA anyagminőségű polimer tulajdonságait, valamint magukat a vizsgálati paramétereket és eredményeket. A dolgozatom végén bemutatom a témának a jelentőségét egy gyakorlati eseten keresztül is.

2. RAPID PROTOTYPING TECHNOLÓGIÁK

Az alábbi eljárások mindegyikére igaz, hogy a tervező által elkészített 3D CAD modellt készít egy tervezőszoftver segítségével. A modelleket .stl kiterjesztésben mentve a modellt a szoftvereket szeletekké, szeletekből felépülő modellé alakítja.[3] Amennyiben a kiválasztott eljárás igényel támasztékokat, összekötő kapcsolatokat, akkor azokat vagy a tervezőszoftverben, vagy a készüléket kezelő szoftverben kell hozzáadni. A modell koordinátarendszerét a készülék modellépítési módjának megfelelően kell definiálni: az X-Y sík a munkaasztal síkja, a Z irány az építési irány. Ennek megválasztása kritikus lehet a termék elkészítésének tekintetében, hatással van a kész gyártmány megvalósíthatóságára, minőségére, illetve az elkészítési időre.

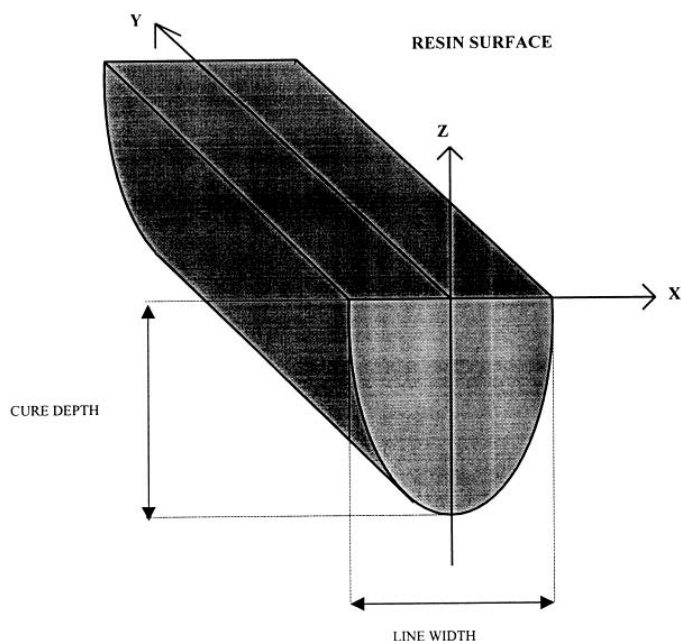
Anyaghozzáadási eljárások

A polimerizációhoz köthető eljárások, melyekkel prototípusokat hozhatunk létre, jellemzően sokkal hatékonyabbak, gyorsabbak, melyek előnyei nyilvánvalóak a forgácsolással elkészített eljárásokhoz képest.[2]

2.1.Folyadék alapanyagból kiinduló eljárások

2.1.1. Lézer sztereolithográfia (SL)

Az egyik legnépszerűbb rapid prototyping eljárás a sztereolithográfia. A fényérzékeny oligomert ultraviola fénynek teszik ki, amely így polimerizálódik és szilárd testté alakul. Az UV-fény, a gamma-foton, az elektronnyaláb vagy a lézersugár ugyan olyan polimerizációs láncreakcióra képes monomerekre vagy oligomerekre, mint egy kémiai indikátor: a kétfunkciós monomer-rendszereket láncpolimerré alakítja, a három- vagy többfunkciós mono- és oligomereket pedig térhálósítja. Az eljárás hatékonysága azon alapszik, hogy a nyaláb csak inicializál: a láncnövekedés, a propagáció már az elindított láncreakció eredménye. [2] Az irányított nyaláb csak a legfelső felülettel, felszínnel reagál, és parabolikus-hengeres voxelt (három-dimenziós pixelt) alakít ki. Ezeket nyaláb szélességgel, hosszal, valamint magmélységgel jellemzik.

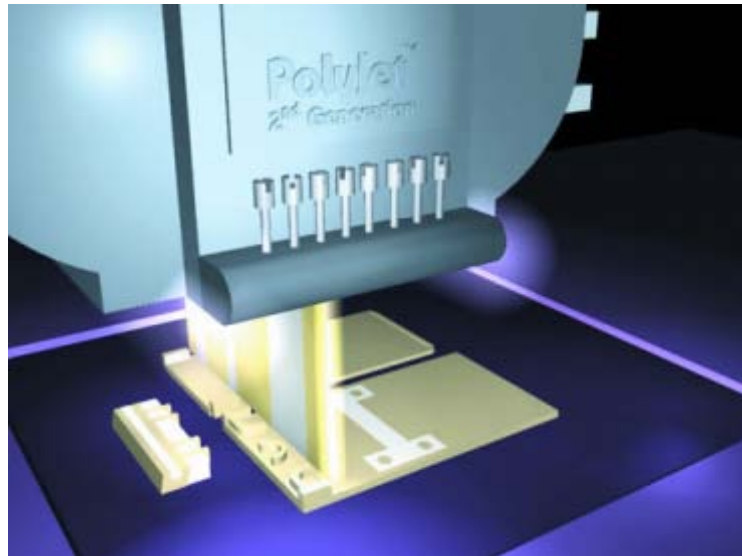


1. ábra A háromdimenziós pixel: a voxel [3]

A készülékek rendelkeznek egy munkaasztallal, amelyet az első réteg megvilágításakor a folyadékfelszínnel egy szintre állítják, ez lesz a kész modell legalsó része. A megvilágított pályagörbéket átfedéssel világítja meg a berendezés, így kialakítva a vízszintes síkban elhelyezkedő felületet. Amikor ezt a legalsó szeletet „levilágította” a készülék, a munkaasztalt a szeletvastagságnak megfelelően lejjebb süllyeszti, és folytatja a következő réteggel, a munkadarab elkészültéig.

Jellemzően hélium-kadmium vagy argon-ion lézerrel dolgozik a készülék. Ezek teljesítménye a sztereolitográfiában 10 és 500mW közötti, a nyaláb fókuszáltsága akár 0.1mm is lehet. A felhasznált anyagok fotoreaktív oligomerek (tipikusan epoxi-akrilát vagy uretán-akrilát), a gyártók különféle receptúrákkal igyekeznek kielégíteni a felmerülő felhasználói igényeket, de általánosságban elmondható, hogy $\pm 0.1\text{mm}$ pontosság érhető el használatukkal, gyakran igényelnek utómunkálatokat a kívánt felületminőség eléréséhez. Az elérhető rétegvastagság 50-100 μm , a gépek munkaterülete jelentős szórást mutat, de jellemzően 500*500*600mm nagyságrendű (létezik 2100*700*800mm munkatérfogató készülék is). Sebességét tekintve 500*500mm² felület nagyságrendileg 70-80s alatt készíthető el.[3][2]

2.1.2. PolyJet

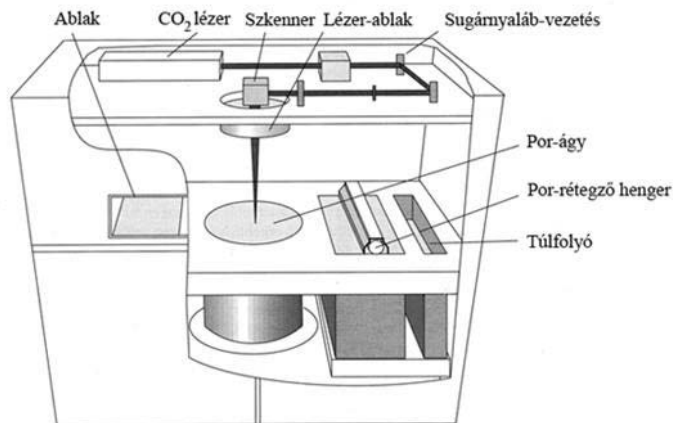


2. ábra A polyjet eljárás elvi vázlata [5]

Az OBJET Geometries által szabadalmaztatott PolyJet eljárás hasonlít az SLA eljáráshoz, azzal a különbséggel, hogy itt a drága lézerfényt UV tartományban sugárzó fényre cserélték. Az alapanyag itt is fotopolimer, melyet akár 16 μ m vastagságban tud egymásra rétegezni a készülék.

2.1.3. Szelektív lézer-szinterezés (SLS)

A szelektív lézer szinterezés nagyon hasonlít a fent említett SL technológiához, azzal a különbséggel, hogy nem folyadékot polimerizál, hanem kész termoplasztikus műanyag porból, a szemcsék összeolvasztásával készíti el a gyártmányt. Ehhez a sztereolitográfiában használnál lényegesen nagyobb, tipikusan 50 W teljesítményű CO₂ lézert használ.



3. ábra A szelektív lézer szinterezés berendezésének elvi vázlata [2]

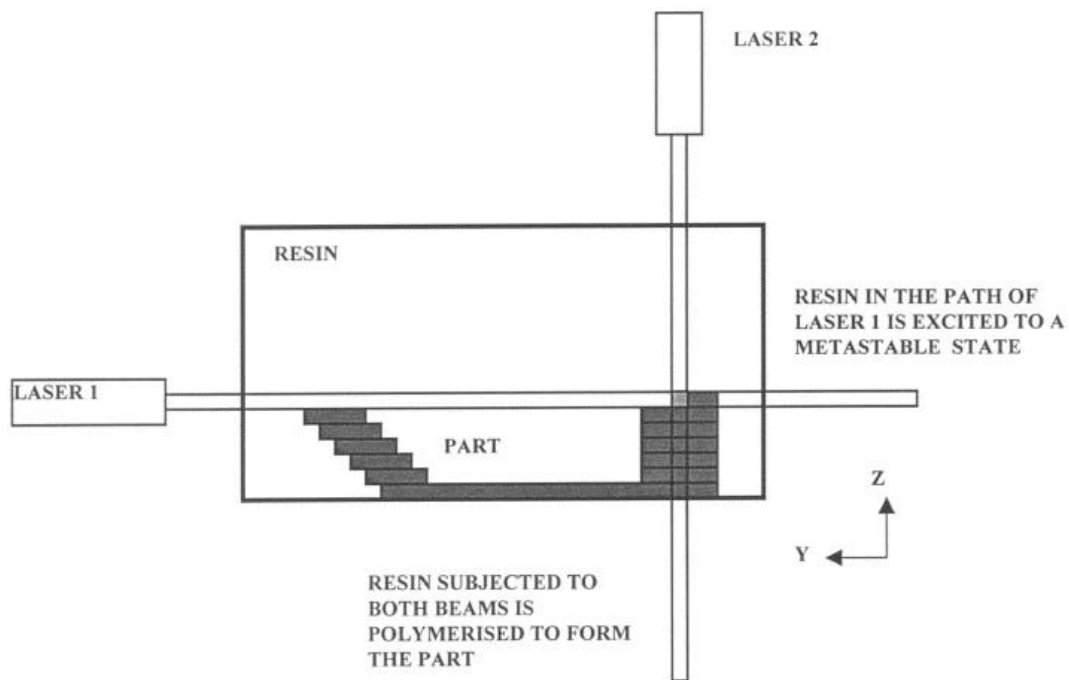
A felhasznált anyagok széles skálája alkalmazható: PA, PC, ABS, PVC mellett alkalmazhatunk fémporot is, vagy kötőanyaggal kerámia porokat is. A polimer porok alkalmazásakor nincs szükség utókezelésre, hiszen itt a térhálósodás már korábban megtörtént. A fókuszált lézersugár 0.5mm átmérőjű, pontossága 50-250µm közötti, tipikusan 15s alatt készülhet el egy réteg. Egy-egy réteg elkészültét követően a félkész gyártmányra újabb porréteg kerül, majd a lézersugárral ráolvad a következő réteg. A sztereolitográfiához képest előny, hogy itt nem kell a gyártmányt az alaplemezhez kötni, hiszen itt a félkész terméket helyén tartja a nem-összeolvasztott, tömörített polimer-por ágyban.[2]

2.1.4. Termikus polimerizáció (LTP)

Nagyon hasonló a SL eljáráshoz, itt azonban nem az alapanyag fényre, hanem a hőre való érzékenységét használja az eljárás. Pontatlansága az infravörös lézer fény által sugárzott hő irányításából adódik: a hő terjedése miatt nem kívánt polimerizáció és torzulás is jelentkezhet.[3]

2.1.5. Sugárnyaláb-interferencia általi polimerizáció (BIS)

Az eljárás során egy áttetsző kádban lévő alapanyagot két különböző frekvencián „világító” lézersugárral kezelnek: az első sugár metastabil állapotba hozza a folyadékot, a második pedig elvégzi a polimerizációt.



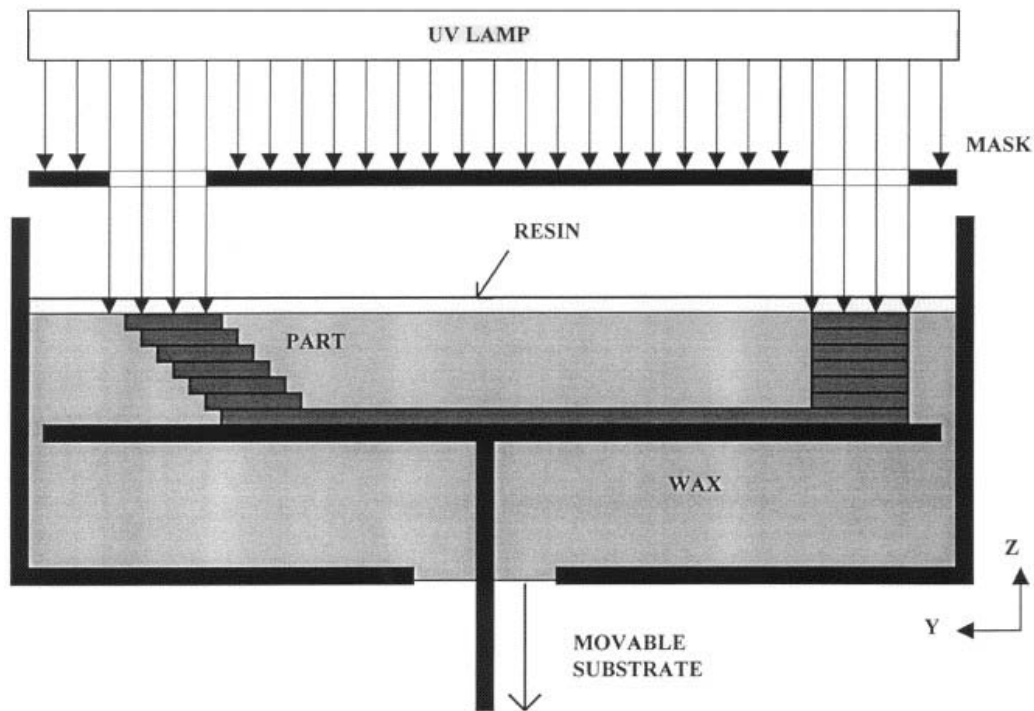
4. ábra A BIS eljárás elvi vázlata [3]

Hátrányai között megemlítendő, hogy problémát jelent a korábban polimerizált részek árnyvetése, a különböző anyagok fényelnyelő képességéből adódó különbségek.[3]

2.1.6. Solidgroundcuring (SGC)

Fotoreaktív eljárás, mely során a mozgatható munkaasztalt fotoreaktív monomer folyadékba helyezik, majd egy, a kívánt rétegen elhelyezkedő alakzat negatívját tartalmazó (jellemzően üveg) lapon keresztül világítják meg UV fénnel a kádat, elérve a kért eredményt. Az elkészült réteget viasszal kezelik (körben, támasztékként), lehűtik, közben pedig az üveglapon található elektrosztatikus porral a következő réteg negatívját alakítják ki.

Előnye, hogy a gyártmány felépítési folyamata megállítható rétegenként, és később folytatható, ha időközben sürgősebb feladat érkezik. Hátránya, hogy a berendezés nagy, nehéz, és állandó felügyeletet igényel. A kamra befoglaló mérete elérheti az 50*350*500mm-t is, egy réteg elkészítése géptől függően 60-120s.[3]



5. ábra Az SGC berendezés vázlata [3]

2.1.7. Electrosetting (ES)

Elektromosan vezető anyagból először alakos elektródákat készítenek. Ezt követően, amikor minden réteget kinyomtatnak, belemerítik vezető folyadékban és feszültség alá helyezik. Az a folyadékrész - ami az elektródák között helyezkedik el - térhálósodik, majd az elektródát eltávolítva készül el a termék.

Előnye, hogy szabályozhatóvá válnak anyagjellemzők, mint például sűrűség, keménységi vagy szilárdsági jellemzők. Az alapanyag poliuretán, poliészter, epoxi, vagy akár elasztomer/gumi is lehet.

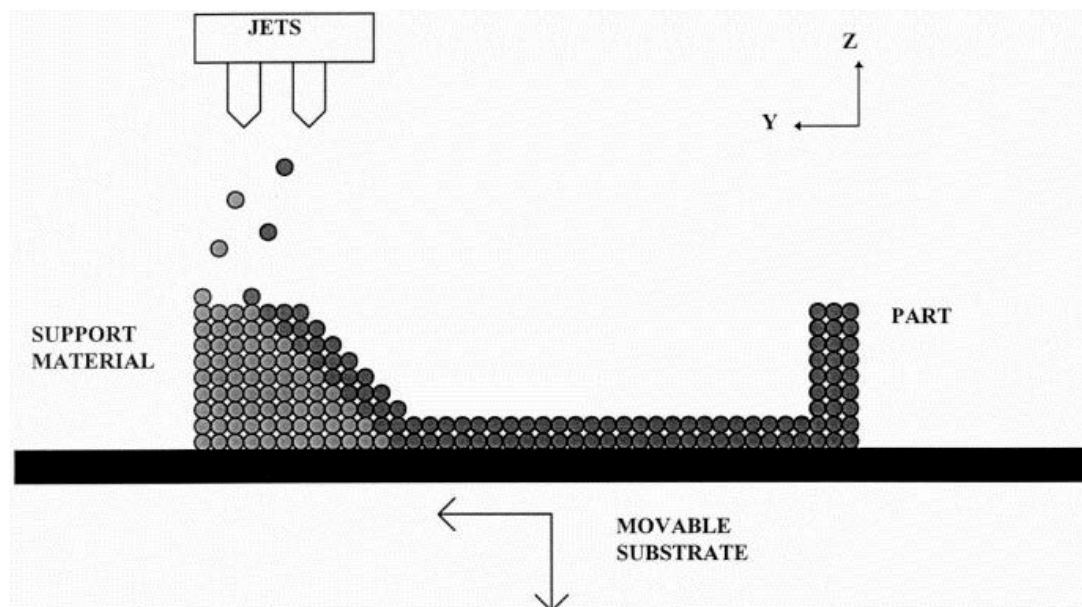
2.2.Olvadék alapanyagból dolgozó eljárások

Ebben a kategóriában négy eljárást ismertettek. A szilárd alapanyagot megolvasztva majd újra irányítottan megszilárdítva kapjuk a kívánt végeredményt.[3]

2.2.1. Ballisticparticlemanufacture (BPM)

Az olvadék egy szórófejen keresztül, irányítottan, jellemzően cseppekben éri el a hordozófelületet, amin azonnal megszilárdul. Az olvadék érkezik cseppekben, vagy folyamatos sugárban is. A paraméterek helyes megválasztása nagyon fontos: ha a fej túl messze helyezkedik el, vagy az olvadék nem elég magas hőmérsékletű, még a fej és a

munkaasztal/darab között megszilárdulhat, ha túl magas hőmérsékletű, úgy beolvadáshoz, alakvesztéshez vezethet.



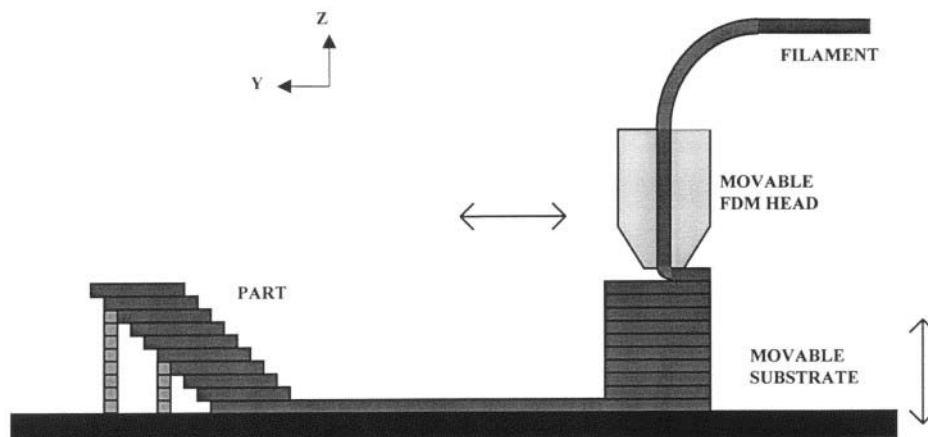
6. ábra A folyadékcseppek egymásra rakódása [3]

A folyadékcseppek jellemzően 50-100 μ m átmérőjűek, melyekből másodpercenként akár 15000 db-ot kibocsájthat a fej. Előnye, hogy finomabb szemcseszerkezet érhető el így, mint öntészeti eljárásokkal, jó mechanikai tulajdonságokat kölcsönözve az elkészült munkadarabnak.

A használható alapanyagai között nem csak a hőre lágyuló műanyagok, hanem alacsony olvadáspontú (430°C alatti) fémek is használhatóak, mint például ón, cink, ólom.[3][6]

2.2.2. Fuseddeposition modelling (FDM)

Dolgozatom témáját meghatározó eljárás az FDM, melynek során a mozgatható fej egy kis méretű ($d=0.4\text{mm}$) extrúder, amibe az alapanyag műanyag szálát görgők továbbítják. Az alapanyag olvadáspontját minimálisan meghaladó hőmérsékletre hevíti a fej, így a rendkívül vékony rétegvastagságnak köszönhetően akár 0.1s alatt megszilárdul az anyag a munkaasztalon vagy a korábbi rétegeken.



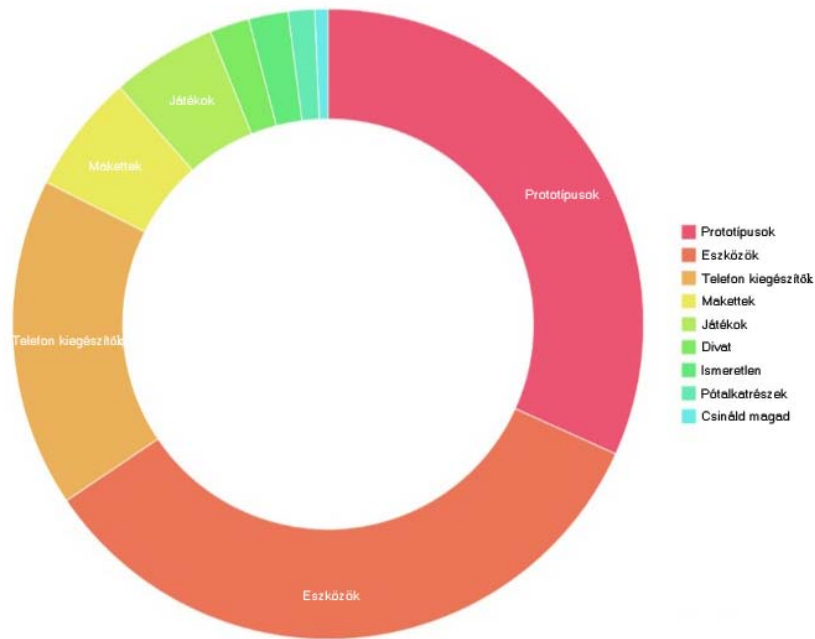
7. ábra Az FDM eljárás elvi vázlata [3]

Miután a fej elvégezte egy réteg „nyomtatását”, a következő réteget akár az asztal, vagy berendezéstől függően a nyomtatófej Z irányban való elmozdításának köszönhetően tudja folytatni.

Előnyei között megemlítenéd, hogy jelenleg ár-érték arányban kiemelkedő a többi eljáráshoz képest. A berendezések ára 100.000 Ft-os nagyságrendtől indul, így igen széles körben terjed. A kompakt méretű asztali berendezések is 200*200*150mm munkatérfoggattal rendelkeznek. Rétegvastagság akár 50 μ m, míg a nyomtatási sebesség elérheti a 400mm/s-t.

Ezzel az eljárással jellemzően alacsony olvadáspontú polimereket használnak. Az ABS és PLA különböző változatait, de kaphatóak orvosi célra kialakított (medicalabs (MABS)), fluoreszkáló, elasztikus PLA, illetve különböző fémporral elegyített alapanyagokat is használhatunk az eljárással.

Az FDM eljárás az egyik legolcsóbb és legpraktikusabb rapidprototyping technológia, amellyel valóban használható késztermék készíthető. Töretlen népszerűségét is ezen tulajdonságainak köszönheti, hiszen ma már nem csak prototípust várnak a felhasználók a berendezéseiktől. Ahogyan a többi eljárás esetén is igaz, ezek a gépek olyan univerzális eszközei a mindennapoknak, amik kis darabszámú, egyedi darabok gyártását úgy teszik lehetővé, hogy azok elkészítéséhez nincsen szükség költséges szerszámok elkészítésére.



8. ábra Az FDM-el készített darabok jellegének megoszlása [1]

Mint látható, egy a 3ders.com oldalon megjelent statisztika szerint körülbelül 33-33%-ban oszlik meg a nyomtatott termékek tekintetében a prototípus, illetve a hétköznapi eszközök nyomtatása. Ezeket követi a telefon kiegészítők, játékok, pótalkatrészek nyomtatása.

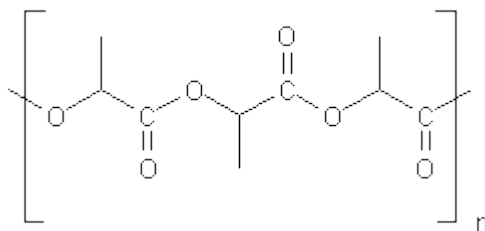
3. AZ ANYAGVIZSGÁLAT

Kísérleteim során a polilaktid (PLA) anyagminőségű filamentből készítettem el a szakítópróbatesteket. Az Ultimaker gyártójától rendelt UltimateBluetípusú filamentet választottam kísérleteim alapanyagául.

3.1.A vizsgált polimer

A polilaktid egy biológiailag lebomló, hőre lágyuló poliészter, melyet megújuló forrásokból készítenek (pl.: kukoricakeményítő, cukornád, vagy a tápióka gyökeréből). Két fő monomerje van: a tejsav, valamint a ciklusos diészter, a laktid.

Olvadáspontja 150-160 °C, nyomtatási hőmérséklete 190-260°C-ra tehető. Számos változatai között megtaláljuk a rugalmas (PLA FLEX), víztiszta, félig fényáteresztő kopolimerjeit is.

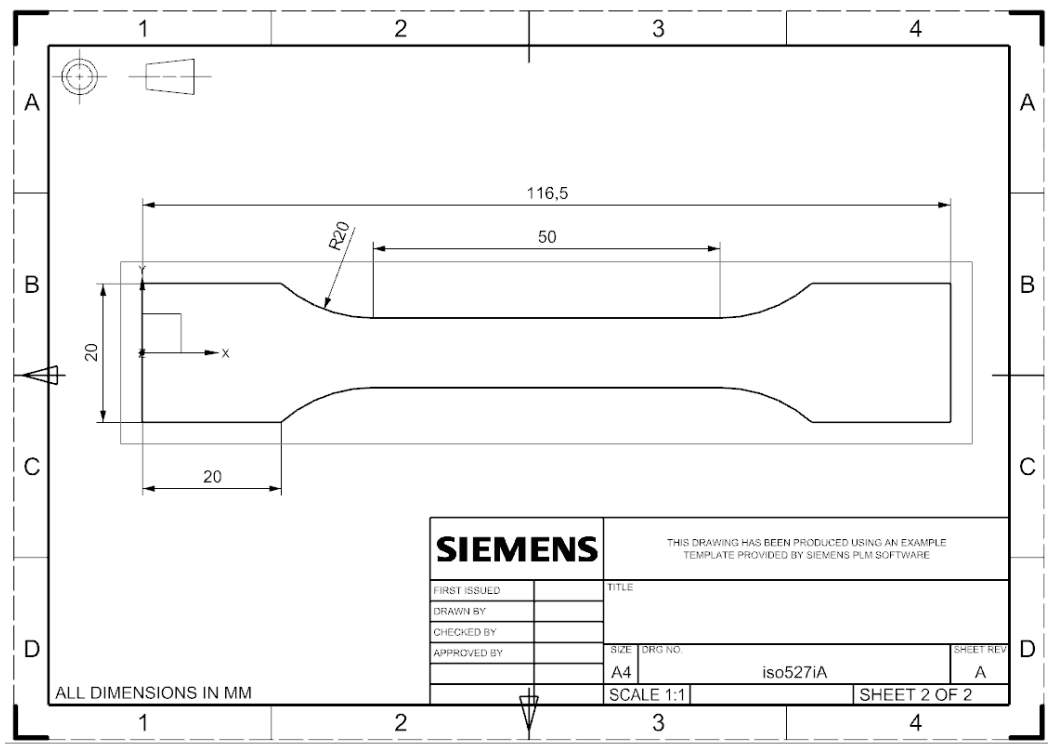


9. ábra A polilaktid polimer [9]

A PLA extrudálással, fröccsöntéssel, kalanderezéssel, öntéssel is feldolgozható. Testbarát felhasználhatósága miatt alkalmazzák felszívódó orvosi implantátumok, csavarok, stb. formájában, melyet a szervezet 0.5-2 év közötti intervallumban tud lebontani mérettől függően. Előnye, hogy fokozatosan bomlik le, mely fokozatosan adja át terhelést a gyógyuló szövetnek (pl. csont). Használják csomagolóanyagként, eldobható műanyag tárgyak elkészítéséhez. Újrahasznosítható, monomerjeire termikus depolimerizációval vagy hidrolízissel bontható le. [8]

3.2.A próbatest

A szakítópróbatestet az MSZ ISO 3167:1994 szabványban foglaltak szerint alakítottam ki.



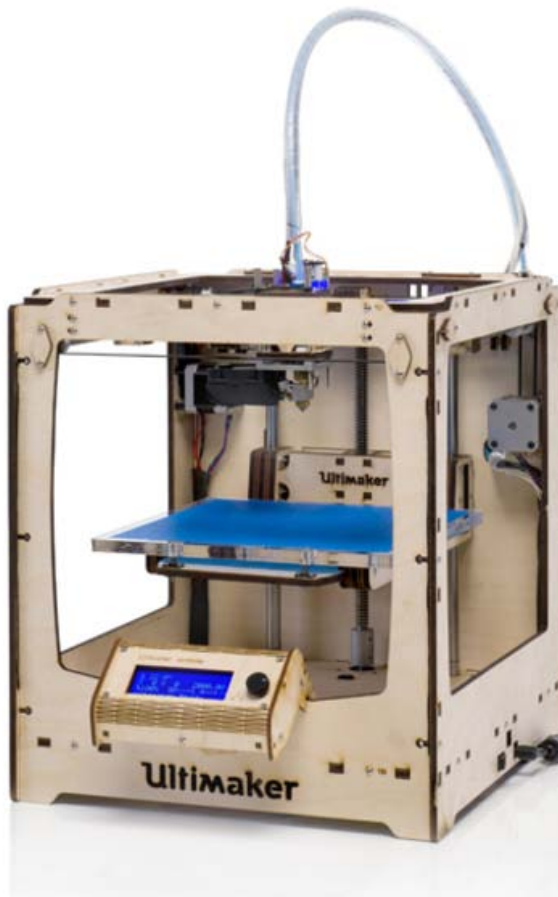
10. ábra ISO 3167 1A próbatest műhelyrajza[7]

A vizsgálatok során ügyeltem a polimerek szakítóvizsgálatainál betartandó előírásokra, így azokat a vizsgálat előtt lezárt dobozban pihentettem, a vizsgálatokat azonos környezeti hőmérséklet és páratartalom mellett végeztem el.

3.3.AzUltimakerOriginal

Az UltimakerOriginal egy igazán sokoldalú eszköz. Pontossága X-Y irányban 10 mikron, magasságban (Z-irány) pedig akár 20 mikron lépésközzel is tud dolgozni.

Segítségével feldolgozhatóak különböző anyagminőségű anyagok (ABS, PLA), valamint könnyű szerelhetősége és átépíthetősége révén tett nagy népszerűsége szert a felhasználók körében.



11. ábra AzUltimaker Original

A vizsgált nyomtatási paraméterek a következők voltak, zárójelben a rögzített értékek:

- Rétegvastagság (100 μ m)
- Kitöltöttség (100%)
- Nyomtatási sebesség (100mm/s)
- Hőmérséklet (210°C)
- Próbatess felépítési iránya (fekvő orientáció)

A próbatess elkészítésekor fűthető asztal nem volt bekapcsolva.

3.4.A szakító vizsgálatok

A szakítóvizsgálatot az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet Képlékenyalakító Laboratóriumában található MTS vizsgálóberendezéssel végeztük el.

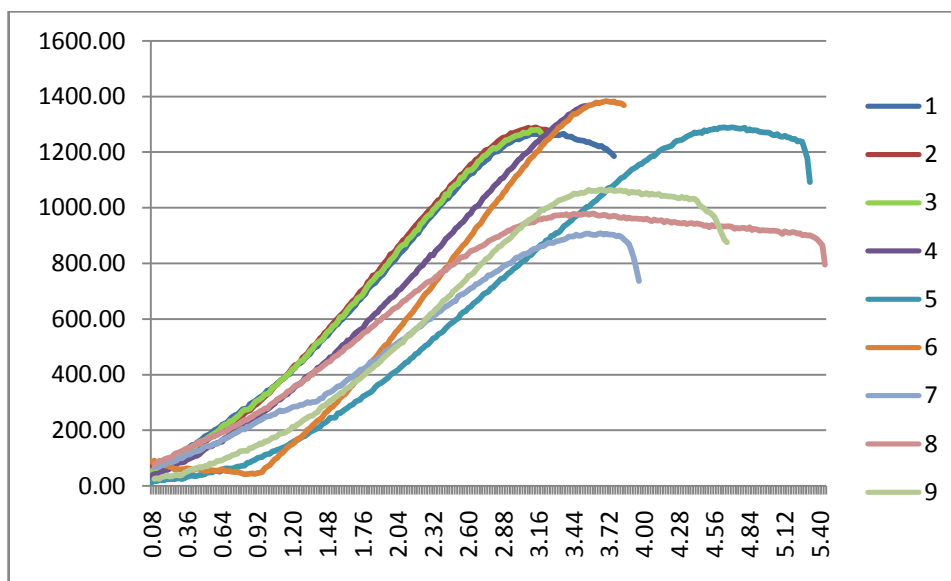


12. ábra Az MTS vizsgáló berendezés

A különböző módokon elkészített próbatesteken előkészítés és a méretek ellenőrzése után elvégeztük a vizsgálatokat. A próbatesteket a pofákba való befogása után a mérőberendezést nulláztuk. A vizsgálatok során 30mm/perc sebességgel mozgott a keresztfej. A mérési eredményeket a készülék rögzítette, a továbbiakban ezeket diagram formájában, a számított értékeket táblázatosan ismertetem. A táblázatban szereplő jelek magyarázata:

1. F_M : legnagyobb erő [N]
2. σ_M : húzószilárdság [MPa], a maximális erő és a kezdeti keresztmetszet hányadosa
3. L_0 : a próbatest vonatkoztatási hossza [mm], az 1A próbatest esetén ez 50mm
4. ΔL_M : nyúlás [mm], a legnagyobb erő fellépéséig bekövetkező nyúlás
5. ΔL_B : nyúlás [mm], a törésig bekövetkezett nyúlás
6. ε_M : nyúlás a legnagyobb erőnél [%]: $\varepsilon_M = \frac{\Delta L_M}{L_0} * 100$
7. ε_B : nyúlás törésnél [%]: $\varepsilon_B = \frac{\Delta L_B}{L_0} * 100$.

3.4.1. A nyomtatási sebesség változtatásának hatása



13. ábra A nyomtatási sebesség változtatásának hatása

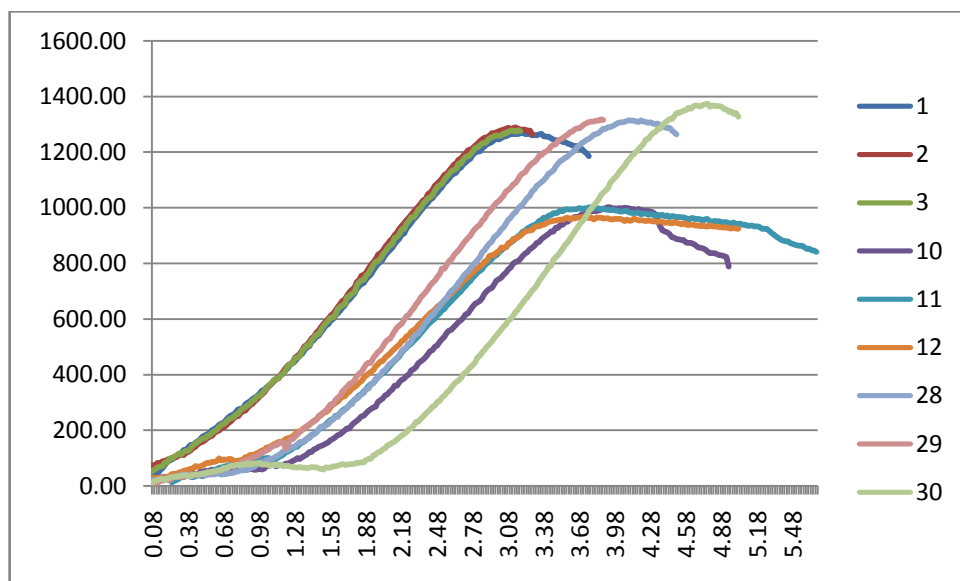
Az 1.-3. számú próbatesteket készítettem el a rögzített paraméterekkel, a későbbiek folyamán ezek szolgálnak az összehasonlítások alapjaiként. A 4.-6. számú próbatesteket csökkentett ($v=50 \text{ mm/s}$), amíg a 7.-9. jelölésű próbatesteket növelt ($v=150 \text{ mm/s}$) nyomtatási sebességgel készítettem el.

A vizsgálat igazolta, hogy a nyomtatás sebessége hatással van az elkészülő darab szakítószilárdságára.

1. táblázat A nyomtatási sebesség hatásainak eredményei

Sorsz.	$F_M[\text{N}]$	$\sigma_M[\text{MPa}]$	$\Delta L_M[\text{mm}]$	$\Delta L_B[\text{mm}]$	$\epsilon_M[\%]$	$\epsilon_B[\%]$
1.	1272,06	29,202	3,2	3,76	6,4	7,52
2.	1289,29	29,983	3,14	3,28	6,28	6,56
3.	1280,93	29,789	3,1	3,18	6,2	6,36
4.	1365,97	31,767	3,54	4,12	7,08	8,24
5.	1288,43	29,578	4,7	5,32	9,4	10,64
6.	1383,20	32,933	3,7	3,84	7,4	7,68
7.	907,59	20,835	3,66	3,96	7,32	7,92
8.	979,11	22,323	3,6	5,44	7,2	10,88
9.	1065,27	25,364	3,66	4,66	7,32	9,32

3.4.2. A rétegvastagság változtatásának hatása



14. ábra A rétegvastagság változtatásának hatása

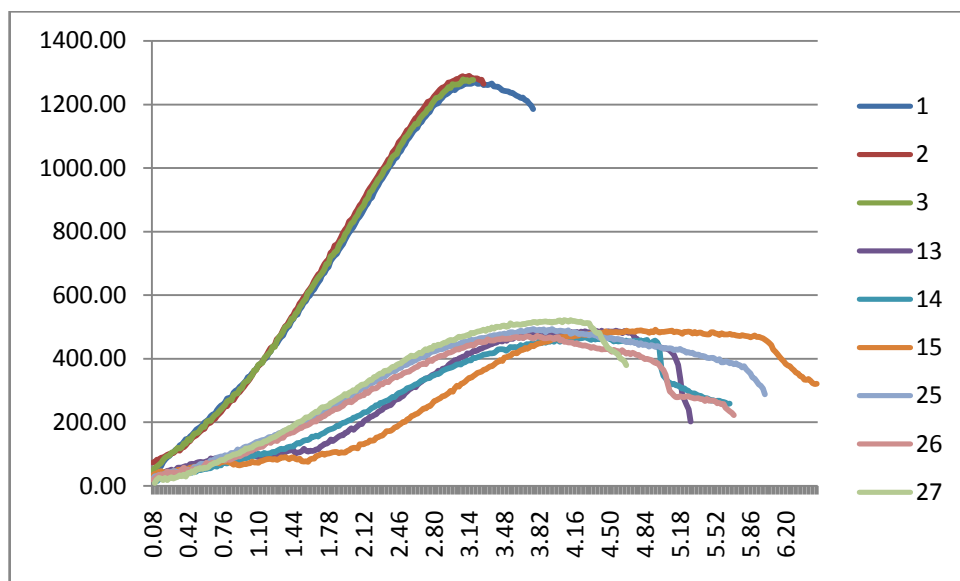
A 10.-12. jelű próbatesteket növelt rétegvastagsággal ($150\ \mu\text{m}$), a 28.-30. jelű próbatesteket csökkentett rétegvastagsággal ($50\ \mu\text{m}$) nyomtattam.

2. táblázat A rétegvastagság hatásainak eredményei

Sorsz.	$F_M[\text{N}]$	$\sigma_M[\text{MPa}]$	$\Delta L_M[\text{mm}]$	$\Delta L_B[\text{mm}]$	$\varepsilon_M[\%]$	$\varepsilon_B[\%]$
1.	1272,06	29,2	3,2	3,76	6,4	7,52
2.	1289,29	29,983	3,14	3,28	6,28	6,56
3.	1280,93	29,789	3,1	3,18	6,2	6,36
10.	1002,37	23,31	3,92	4,94	7,84	9,88
11.	1001,51	23,2909	3,78	5,7	7,56	11,4
12.	968,77	22,30	3,72	5,02	7,44	10,04
28.	1314,28	30,56	4,2	4,5	8,4	9
29.	1317,72	30,29	3,86	3,88	7,72	7,76
30.	1373,73	32,70	4,76	5,02	9,52	10,04

A vizsgálat során kiderült, hogy a rétegvastagság növelésével csökkenést, a csökkentett rétegvastagságnál kismértékű növekedést fedezhetünk fel a vizsgált paraméterek változásaiban.

3.4.3. A belső kitöltöttség változtatásának hatása



15. ábra A belső kitöltöttség változtatásának hatásai

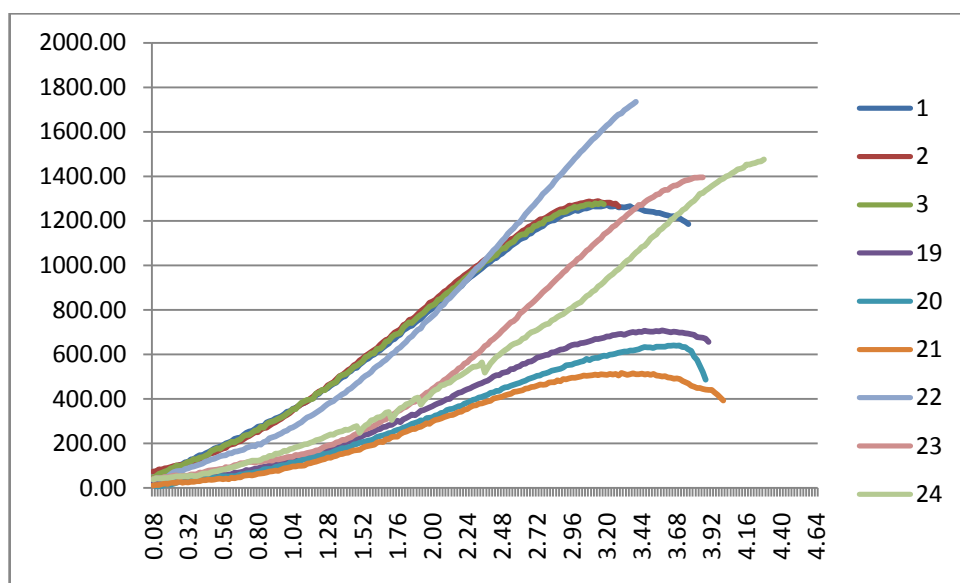
A Cura segédprogram (amely a nyomtató számára elkészíti a programkódot GCode programnyelven) minden lehetőséget megad, hogy a nyomtatási idővel és alapanyaggal gazdálkodni tudjunk. Sok esetben nincsen szükség teljes belső kitöltöttségre, a prototípusok jellemzően vizuális szemléltetőeszközök.

A három vizsgált beállítás (13.-15. próbatestek: 50%, 25.-27.: 10%) során egyértelműen látszik, hogy drasztikusan csökkennek a szilárdsági jellemzők.

3. táblázat A belső kitöltöttség hatásainak eredményei

Sorsz.	F_M [N]	σ_M [MPa]	ΔL_M [mm]	ΔL_B [mm]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]
1.	1272,06	29,20	3,2	3,76	6,4	7,52
2.	1289,29	29,98	3,14	3,28	6,28	6,56
3.	1280,93	29,78	3,1	3,18	6,2	6,36
13.	488,85	11,36	4,56	5,28	9,12	10,56
14.	468,17	10,88	4,26	5,66	8,52	11,32
15.	491,43	11,70	4,94	6,5	9,88	13
25.	494,02	11,88	3,94	6	7,88	12
26.	472,48	11,36	3,8	5,7	7,6	11,4
27.	521,59	12,12	4,12	4,66	8,24	9,32

3.4.4. A nyomtatási hőmérséklet változtatásának hatása



16. ábra A nyomtatási hőmérséklet változtatásának hatása

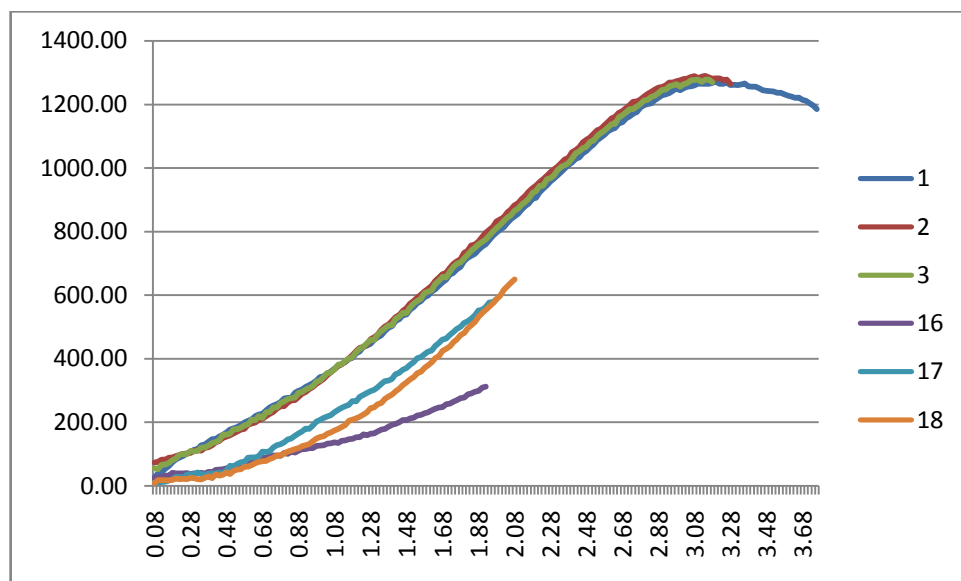
A vizsgálatok során a jelentős különbségeket sikerült a nyomtatási hőmérséklet megváltoztatásával elérni. A 19.-21. próbatesteket csökkentett ($T=190^{\circ}\text{C}$), a 22.-24. próbatesteket ($T=230^{\circ}\text{C}$) megnövelt hőmérsékleten készítettem el.

4. táblázat A nyomtatási hőmérséklet hatásának eredményei

Sorsz.	F_M [N]	σ_M [MPa]	ΔL_M [mm]	ΔL_B [mm]	ε_M [%]	ε_B [%]
1.	1272,06	29,20	3,2	3,76	6,4	7,52
2.	1289,29	29,98	3,14	3,28	6,28	6,56
3.	1280,93	29,78	3,1	3,18	6,2	6,36
19.	708,56	16,64	3,58	3,9	7,16	7,8
20.	640,49	15,04	3,64	3,88	7,28	7,76
21.	516,42	11,77	3,3	4	6,6	8
22.	1734,74	39,55	3,4	3,46	6,8	6,92
23.	1395,27	33,22	3,88	4,12	7,76	8,24
24.	1475,40	34,27	4,28	4,74	8,56	9,48

Vélhetően az erősebb kötések kialakulása miatt, a növelt hőmérsékletű próbatestek több, mint kétszer olyan szakítószilárdságúak, mint a 190°C -on nyomtatottak.

3.4.5. A próbatest orientációjának befolyásoló hatása



17. ábra A próbatest orientációjának befolyásoló hatása

Az orientáció kérdésében a vártaknak megfelelően a fekvő orientáció egyértelműen nagyobb szakítószilárdságot eredményezett, mint az álló (16.-18. próbatestek).

Nagyobb felületen kötnek egymáshoz a rétegek, illetve a keskeny, álló orientáció az ömledékfelrakásos berendezéseknél komoly kihívást jelent alakhelyesség tekintetében, a próbatestek oldalai enyhén bordázottak lettek, mely a próbatestek vizsgálati szakaszában feszültséggyűjtő helyekként is jelentkezhetnek.

5. táblázat A próbatest orientációjának eredményei

Sorsz.	F_M [N]	σ_M [MPa]	ΔL_M [mm]	ΔL_B [mm]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]
1.	1272,06	29,20	3,2	3,76	6,4	7,52
2.	1289,29	29,98	3,14	3,28	6,28	6,56
3.	1280,93	29,78	3,1	3,18	6,2	6,36
16.	312,22	8,13	1,92	2,24	3,84	4,48
17.	587,07	15,29	1,98	2,06	3,96	4,12
18.	649,97	16,75	2,08	2,48	4,16	4,96

4. GYAKORLATI ALKALMAZÁS: AZ E-NABLE KÉZPROTÉZISE

4.1. Az alapítvány bemutatása

Az E-Nabling The Future egy amerikai alapítvány, melyet kifejezett a kéz, illetve kézfejet érintő hiányosságok pótlását szolgáló utólagos protézisek gyártására és tervezésére hoztak létre. A szervezet különlegessége, hogy ezek a protéziseket kifejezetten 3D-nyomtatókra tervezeték, hogy bárki bárhol tudjon segíteni másokon, világszerte.

4.2. A protézisek gyártása

Az alapítvány önkéntes tervezői több modellt is készítettek, melyek közül próbaként egyet elkészítettem.

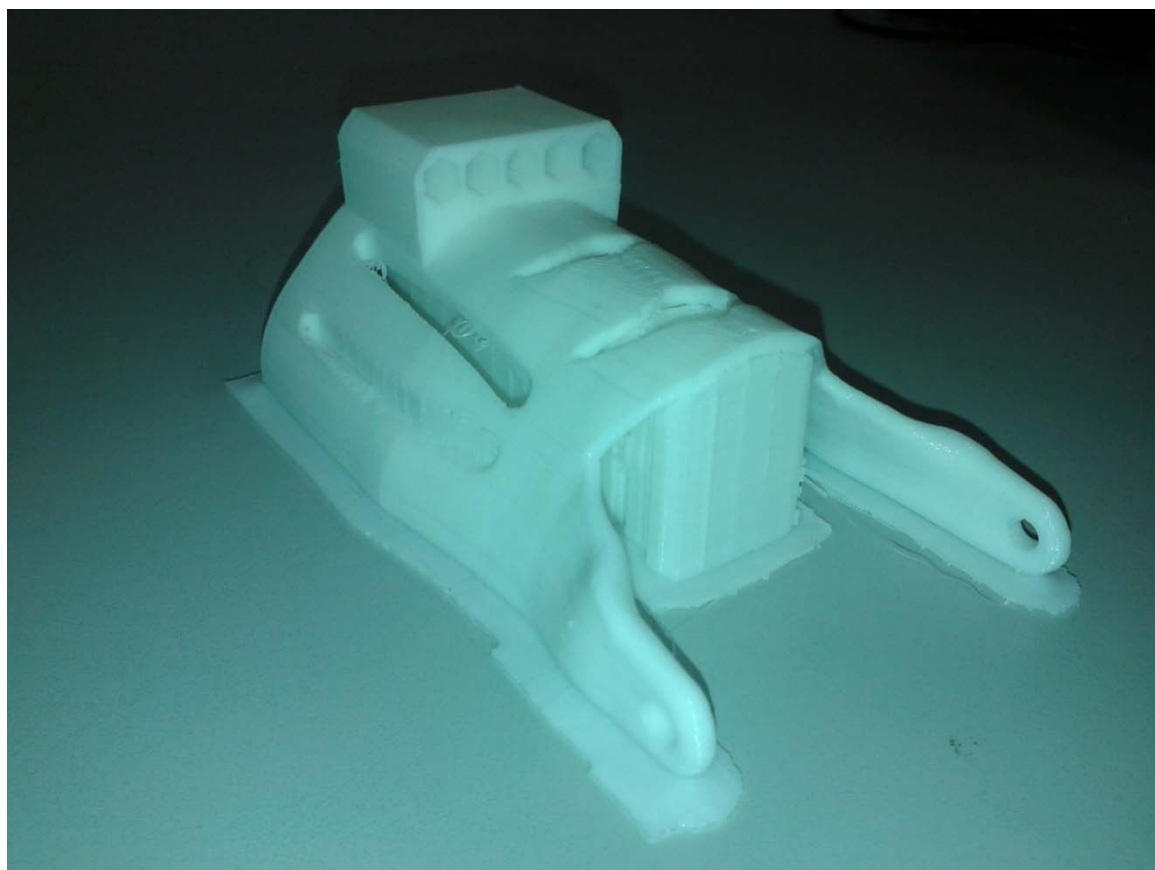


18. ábra A Flexy Hand

A FlexyHand-et elemenként készítettem el, ezek közül a leghosszabb ideig a kézfej készült, ez hét órát vett igénybe, ujjanként további másfél-két órával kellett számolni. A darab különlegessége, hogy az ujjpercek közötti gumiízületeket is rugalmas PLA-Flexfilamentből nyomtattam. Az ujjak utolsó ujjperceibe damilt köthetünk, amiket végigvezethetünk a többi ujjpercen, majd keresztül a kézfej alján található nyílásokig, így a damilt megfeszítve a kéz ökölbe szorítható, markolni lehet vele. Az E-nable többi modellje is ezen az elven működik. (Future, 2014)

Miután a próba sikeresnek bizonyult, így jelentkeztem önkéntes gyártónak, az országban elsőként. A jelentkezésemet követő napon meg is kaptam az első megbízatást, egy Szabolcs-Szatmár-Bereg megyei úriemberrel nyílt lehetőségem együtt dolgozni.

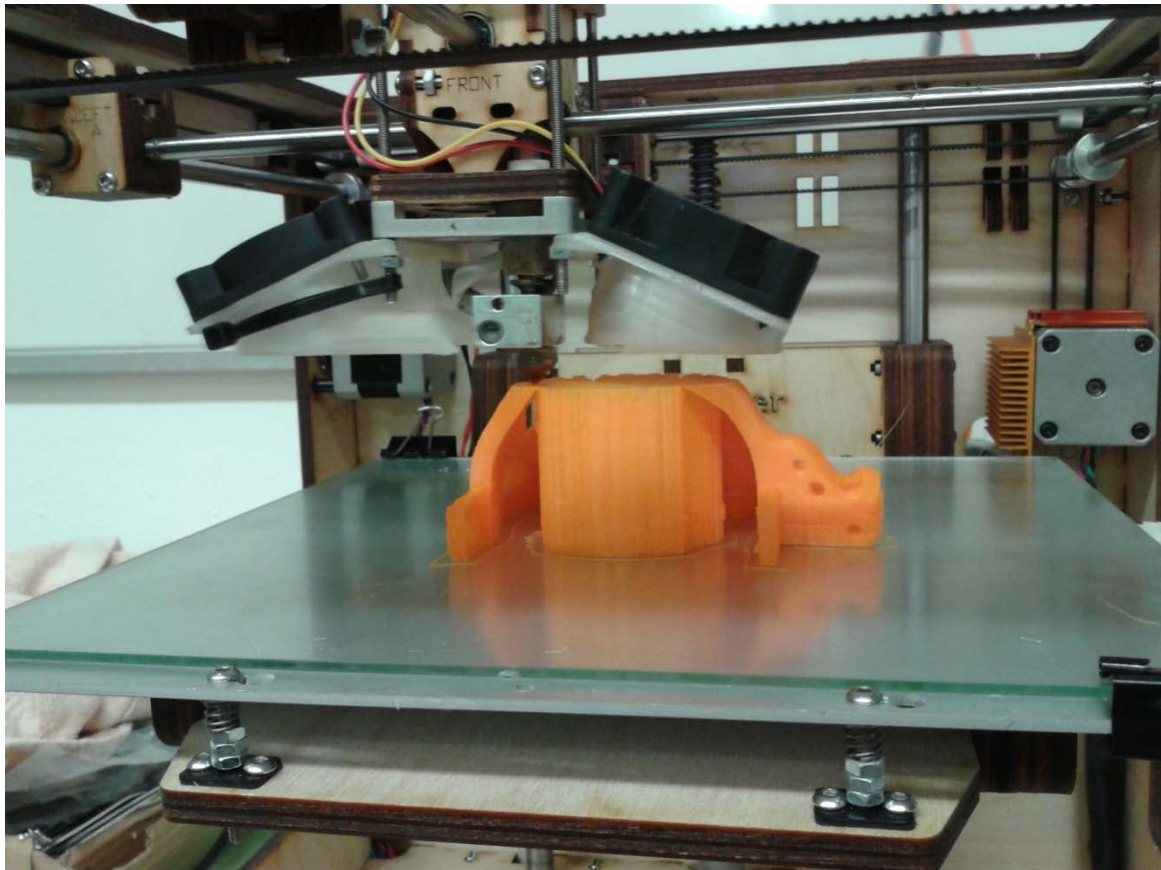
Első találkozásunkkor lemértük a méreteket, kiválasztottuk közösen a nyomtatandó modellt, a CyborgBeast-et.



19. ábra A Cyborg Beast alkar elemének utómunka nélküli állapota

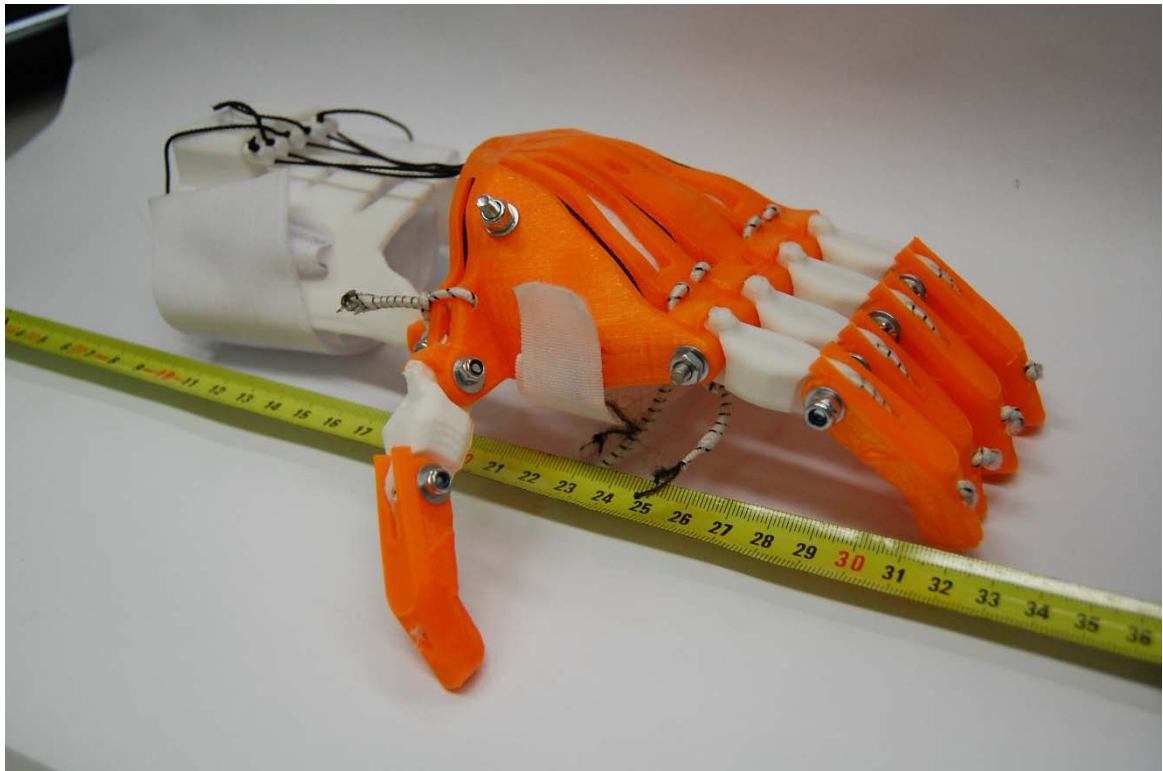
Az előzőhöz hasonlóan ezt a protézist is PLA-ból nyomtattam ki. Itt már alkalmaztam a kísérletekből megismerteket, és kis sebességgel, emelt hőmérsékleten, kis rétegvastagsággal nyomtattam a tartósság növelése érdekében. A kellő helyeken alátámasztást is használtam az alakhelyesség megőrzése érdekében.

A nyomtatási feladatok elvégzése és összeszerelés után a protézis működőképessé tétele következett. Dami helyett az alapítvány által ajánlott hegymászózsínort használtam, melyet végigfűzve az ujjakon és a kézfejen az alkarra erősítendő csavaros előfeszítőkbe kötöttem.



20. ábra A Cyborg Beast kézfej eleme nyomtatás közben

A (szintén nyomtatott) csapokat csavarok tartják a helyén, és általuk ujjanként beállítható az előfeszítés mértéke. Ahhoz, hogy a kéz kinyíljon - a FlexyHand-del ellentétben - gumis köteleket kell átfűzni a kézfejig, így nincs szükség az ujjpercek közötti ízületekre.



21. ábra Az elkészült Cyborg Beast

Tépőzárak segítségével rögzíthető az alkaron és a kézfejen, és a kézfej lefelé feszítésével a zsinóroknak köszönhetően a kéz fogni képest, a feszítést megszüntetve pedig magától nyitott helyzetbe áll.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az FDM eljárás egyre nagyobb teret nyer magának a hobbigépek piacán. A gépek egyszerűek, az elkészülő darabok utómunka nélkül is kielégítő minőségűek. A felhasználható anyagok köre egyre nő, már akár 400°C fokra is felfűthető fejekkel akár polikarbonát, polietilén is nyomtatató. Ahhoz, hogy a terveinknek, a felhasználási feltételeknek minél jobban megfelelő darabot készíthessünk, ismernünk kell mind az alapanyagot, mind pedig a berendezést és annak beállításait.

A vizsgálatokból kiderült, hogy egy paraméter helyes megválasztásával akár 2,5-szeresszakítószilárdságot érhetünk el, úgy, hogy mást nem változtatunk. További vizsgálatokkal szeretném a tapasztalt eredmények legkedvezőbb kombinációját nem csak a gyakorlatban, de egy kísérletsorozatban is alkalmazni. Szeretnék rávilágítani, hogy az FDM nem csak egy gyors prototípus eljárás, hanem egy gyártási eljárás is lehet, amellyel egyedi, vagy kisszériás termelés is megvalósítható.

Az egyediség az előnye a szerszám nélküli gyártási eljárásoknak. Összekapcsolva ezt háromdimenziós szkenneléssel olyan egyedi, testreszabott darabokat készíthetünk, melyeket eddig csak bonyolult mérések és megmunkálások árán lehetett megvalósítani. Az egyedi protézisgyártás kiváló példája ennek, hiszen ötvözi az összes előnyét az FDM eljárásnak: egyedi, olcsó és tartós darabok gyárthatóak vele, tökéletesen testreszabottan, melyek minőségi változtatást hozhatnak mások életébe.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Kovács Péter Zoltán konzulensemnek a dolgozatom készítése során nyújtott szakmai támogatást, valamint az Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet munkatársainak a vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségét.

Köszönettel tartozom az E-Nabling The Future Alapítványnak, hogy elérhetővé tette az általuk készített protéziseket.

A dolgozatban ismertetett kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projekt eredményeire alapozva a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0029 jelű projekt részeként – az Új Széchenyi Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] 3ders.com. (2014. 10 3). *3ders.com*. Forrás:
<http://www.3ders.org/articles/20131003-3d-hubs-sharing-3d-printing-trends-on-how-3d-printers-are-being-used.html>
- [2] Czvikovszky Tibor, N. P. (2007). *A polimertechnika alapjai*.
- [3] D.T Pham, R. G., *ScienceDirect*. Letöltés dátuma: 2014. 03 19, forrás:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695597001375>
- [4] Future, E.-N. T. (2014. 09 22). *E-Nabling The Future*. Forrás:
<http://enablingthefuture.org/>
- [5] Tibor, D. G. (2006. 10 21). PolyJet a Rapid Prototyping új dimenziója.
MŰANYAG ÉS GUMI, old.: 1-3.
- [6] Wai-Yee Yeonga, C.-K. C.-F. (2004. 10). *ScienceDirect*. Letöltés dátuma: 2014. 03 18, forrás: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779904002926>
- [7] MSZ ISO 3167. (1994).
- [8] Ultimaker, PLA UltiBlue műszaki adatlap
- [9] Dagmar Wiechoczek, *Der spezielle Polyester: Polymilchsäure*, Letöltés dátuma: 2014. 09 19, forrás:<http://www.chemieunterricht.de/dc2/plaste/poly-ms.htm>