

Diplomadolgozat

**Kérges Dániel László
Gépészmérnök**

2023



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Műszaki Intézet
Gépészmérnök Mesterszak

3D nyomtatott alkatrészek vizsgálata

Belső konzulens: Dr. Szakál Zoltán
Egyetemi docens

Intézet/Tanszék: Műszaki Intézet/
Anyagtudományi és Gépipari
Folyamatok Tanszék

Készítette: **Kérges Dániel László**
GSVH42
Nappali

Gödöllő
2023

MŰSZAKI INTÉZET

MESTERSZAK

Műszaki fejlesztő specializáció

DIPLOMADOLGOZAT

feladatlap

Kérges Dániel László (GSVH42)

részére

A diplomadolgozat címe:

3D nyomtatott alkatrészek vizsgálata

Feladatkiírás:

A Diplomadolgozatom célja a 3D FDM nyomtatott műanyag alkatrészek vizsgálata, azon belül a PLA optimális beállításainak a vizsgálata és kutatása, hogy a számos beállítási paraméterek közül, melyek azok, amelyek nagymérvű változást hoznak létre a próbatest fizikai tulajdonságaiban a nyomtatása során. Ezeket pedig egy 3D műanyag nyomtatóval és egy szakitógéppel fogom elvégezni és kiértékelni. A számolt adatokat és értékeket összevetem a gyártó által kiadott adatokkal és értékekkel.

A mérést a gyártó által ajánlott nyomtatási hőmérséklet alatt, ajánlott nyomtatási hőmérsékleteken, illetve a nyomtatási hőmérséklet fölött tervezem elvégezni. Hőmérsékletenként 5 db próbatestet fogok kinyomtatni. 3D nyomtatás folyamán 2 db orientációt fogok figyelembe venni: próbatesttel párhuzamos nyomtatást, illetve próbatesttel merőleges nyomtatást. Ezek után az egyetemi szakitógéppel fogom elvégezni a vizsgálatokat. A végén összesítem az adatokat és levonom a következtetéseket.

Közreműködő tanszék: Műszaki Intézet

Belső konzulens: Dr. Szakál Zoltán képzésihely vezető/egyetemi docens,

MATE, Műszaki Intézet

A dolgozat beadási határideje: 2023. év 11 hó 06 nap

Kelt: Gödöllő, 2023 év 10 hó 31 nap

Jóváhagyom

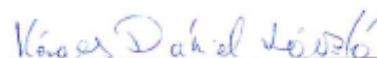


(tanszékvezető)



(szakfelelős)

Átvettem



(hallgató)

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés, célkitűzés	3
2.	Szakirodalom feldolgozás	4
2.1.	A 3D nyomtatás rövid története	4
2.2.	A 3D nyomtatás FDM technológiája	7
2.3.	FDM alapanyagok	14
2.4.	FDM nyomtatás előkészítési folyamatai	18
2.4.1.	3D modellek létrehozásának módjai	18
2.4.2.	Szeletelő szoftver ismertetése	19
2.5.	Roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer	25
2.5.1.	Szakítóvizsgálat	27
2.5.2.	Próbatest kialakítás fémek esetében	29
2.5.3.	Próbatest kialakítás műanyagok esetében	30
2.5.4.	A szabványos IBA próbatest	31
2.5.5.	Műanyagok szakítóvizsgálata	32
2.5.6.	Műanyagok mérési körülményei	34
2.6.	Szakítóvizsgálatból meghatározható mechanikai jellemzők	36
2.7.	ISO 527-es szabvány	38
2.7.1.	ISO 527-1: Az általános alapelvek és módszerek	39
2.7.2.	Berendezés: Szakító gép	41
2.7.3.	Próbatestek kialakítása és a teszt eljárása	43
2.8.	Az anyag tulajdonsága	45
3.	3D nyomtatott próbatestek méretezése és vizsgálata	49
3.1.	Mérési terv:	49
3.2.	A 3D próbatest modelljének elkészítése	50
3.3.	Geetech A20M 3D nyomtató bemutatása	52
3.3.1.	Geetech A20M 3D nyomtató működése	54
3.4.	A CURA szeletelő program	55
3.5.	A kinyomtatott próbatestek	57
3.5.1.	A próbatesttel párhuzamos nyomtatás képei	58
3.5.2.	A próbatesttel merőleges nyomtatás képei	59
3.5.3.	A vizsgált filament, illetve a befogásának a képe	60
3.6.	A méréshez felhasznált műszerek és eszközök	62
3.6.1.	A mérés módszere és körülmények:	64

4.	Mérési eredmények.....	65
4.1.	A mérési eredmények próbatesttel párhuzamos nyomtatásnál	65
4.1.1.	180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 1. próbatestnél	65
4.1.2.	180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	66
4.1.3.	190 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	67
4.1.4.	200 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	68
4.1.5.	210 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	69
4.1.6.	220 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	70
4.1.7.	A próbatesttel párhuzamos nyomtatás elszakított képei.....	71
4.2.	A mérési eredmények próbatesttel merőleges nyomtatásnál	72
4.2.1.	180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 1. próbatestnél	72
4.2.2.	180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	73
4.2.3.	190 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	74
4.2.4.	200 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	75
4.2.5.	210 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	76
4.2.6.	220 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél	77
4.2.7.	A próbatesttel merőleges nyomtatás elszakított képei.....	78
4.3.	A mérési eredmények filament szálak esetén	79
4.3.1.	A 4. filament szál esetén létrejövő húzófeszültség és alakváltozás.....	79
4.3.2.	Mind az 5 db filament esetén létrejövő húzófeszültség és alakváltozás.....	80
4.3.3.	A vizsgált filament szálak elszakított képei	81
4.4.	Összehasonlítás és összegzés	82
4.4.1.	Párhuzamos nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összehasonlítása	82
4.4.1.1.	Párhuzamos nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összegzése	84
4.4.2.	Merőleges nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összehasonlítása.....	85
4.4.2.1.	Merőleges nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összegzése.....	87
4.5.	Vizsgálat közbeni felmerülő problémák	88
4.6.	Következtetések levonása	89
5.	Összefoglalás	90
5.1.	Summary	91
6.	Nyilatkozat nyilvános hozzáférésről és eredetiségről.....	92
7.	Nyilatkozat konzulensi tájékoztatóról.....	93
8.	Irodalomjegyzék	94
9.	Mellékletek	96
10.	Köszönetnyilvánítás	97

1. Bevezetés, célkitűzés

Diplomadolgozatom során a viszonylag újnak mondható additív gyártástechnológia, a 3D nyomtatás folyamata fogott meg. Tanulmányaim folyamán sokszor volt szó 3D műanyag nyomtatásról, valamint 3D fémporos nyomtatásról, amelyek a szubtraktív gyártási folyamattal szemben geometriai „szabadsággal” rendelkeznek.

A feladatom a 3D FDM technológiával nyomtatott műanyag alkatrészek vizsgálata, azon belül a PLA optimális beállításainak a vizsgálata és kutatása, hogy a számos beállítási paraméterek közül, melyek azok, amelyek nagymérvű változást hoznak létre a próbatest fizikai tulajdonságaiban a nyomtatása során. Ezeket pedig egy 3D nyomtatóval és egy szakítógéppel fogom elvégezni és kiértékelni. A számolt adatokat és értékeket összevetem a gyártó által kiadott adatokkal és értékekkel.

Mérések és tervezések előtt irodalomkutatásból, valamint szakirodalmi forrásokból gyűjtök össze számos információt és tudnivalót, hogy bemutassam a 3D nyomtatás történetét, technológiáját és felhasználását. Miként szeretik alkalmazni ezt a viszonylag újnak mondható technológiát a világ minden területén.

Diplomadolgozatom második felében ezeket a vizsgálatokat azért kívánom elvégezni, mivel előzetes irodalom feldolgozás és szakirodalom kutatása során nem találtam lényegi magyarázatot arra, hogy miként változik a filament műanyag mechanikai tulajdonsága a nyomtatás során a gyártó által javasolt optimális nyomtatási hőmérséklettől való eltérés esetén. A mérést a gyártó által ajánlott nyomtatási hőmérséklet alatt, ajánlott nyomtatási hőmérsékleteken, illetve a nyomtatási hőmérséklet fölött tervezem elvégezni. Hőmérsékletenként 5 db próbatestet fogok kinyomtatni. 3D nyomtatás folyamán 2 db orientációt fogok figyelembe venni: próbatesttel párhuzamos nyomtatást, illetve próbatesttel merőleges nyomtatást. Ezek után az egyetemi szakítógéppel fogom elvégezni a vizsgálatokat, hogy a kinyomtatott orientációk milyen húzási szilárdsággal rendelkeznek, és ezeket fogom összehasonlítani a gyártó által kiadott szilárdsággal. A diplomadolgozatom végén leírom a mérés összegzését, amelyekből levonom a következtetéseket.

2. Szakirodalom feldolgozás

2.1. A 3D nyomtatás rövid története

A teremtés vágya egyidős az emberiséggel. A világ majd minden vallásában található utalást arra, hogy az ember az ősidők óta szeretne teremtőjével egyenrangúvá válni az alkotás képességének megszerzésével. Az új dolgok teremtése összefonódik az innovációval, az innováció pedig az emberi találékonysággal és az ebből fakadó műszaki-technológiai fejlődéssel. Ennek az egyik megnyilvánulása a 3D nyomtatás. A 3D nyomtatás kérdése ma már nem új, de mégis mindig új, ha azt tekintjük, hogy korán sem biztos, mi fog kisülni belőle.

Napjainkban számos gyártási technológiát alkalmaznak a világ minden táján. Ezek csoportosítása nagyon sokféleképpen történhet. A leginkább elfogadott csoportosítás szerint a következő három csoportba oszthatjuk a gyártási eljárásokat:

- Öntési eljárás;
- Szubtraktív gyártás;
- Additív gyártás.

A szubtraktív megmunkálás olyan anyagmegmunkáló módszer, amelynél a kiinduló darabból a fölösleges részeket egy arra alkalmas szerszám, azaz forgácsolószerszám segítségével forgács formájában távolítják el. Ezt az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: Szubtraktív gyártás folyamata

[Forrás: <https://www.westcam.at/news/subtraktive-vs-additive-fertigung/>;

letöltve: 2023.06.08.]

Az additív megmunkálás során (amivel a későbbiekben fogok foglalkozni) a késztermék, a különböző alapanyagokkal képzett rétegek egymásutánjából épül fel, amely a 2. ábrán látható. Az alapanyag gyakorlatilag bármilyen anyag lehet, ami a nyomtatási folyamat során egymáshoz képes ragadni és nem is változtatja meg a formáját túlságosan nagymértékben. Napjainkban alkalmazott alapanyagok lehetnek: [1]

- műanyagok;
- fémek;
- beton;
- különböző papírok;
- kerámiák;
- szerves anyagok;
- és nem utolsó sorban ételek is.



2. ábra: Additív gyártás folyamata

[Forrás: <https://www.westcam.at/news/subtraktive-vs-additive-fertigung/>;
letöltve: 2023.06.08]

A technológiai áttörés, és a vizsgálat tárgyát képező 3 dimenziós nyomtatás megjelenése az 1980-as évek elejére tehető, azonban a térbeli modellezés alapjai a 19. századig nyúlnak vissza.

A kezdő lökést Charles W. Hull 1983-as felfedezése adta. Hull egy műanyagipari vállalatnál dolgozott, melynek fő profilja a bútorelemekre UV fény segítségével műanyag réteg felhelyezése volt. Felismerte, hogy ezekből a rétegekből akár több ezret is egymásra helyezhetne, a megfelelő rétegparaméterek számítógépes meghatározása segítségével pedig végül összefüggő térbeli alakzatot nyerhet. Szabadalmát 1986-ban jegyeztette be „Három dimenziós objektumok létrehozása sztereolitográfia által” címmel. Valójában ezt a pontot tekinthetjük a modern 3D nyomtatás megszületésének. Még ebben az évben létrehozta vállalatát 3D Systems néven, mely a mai napig piacvezető az iparágban. [2].

A következő eljárás, amely a piacot meghatározó technológia volt, 1987-ben Scott Crump dolgozta ki, a későbbi Stratasys Inc. alapítója. Ez volt a „szálolvasztásos” eljárás, amely azért érdemel különleges figyelmet, mivel ez lett az alapja a 90-es években induló házi fejlesztéseknek.

2005-ös évben egy csapatnyi lelkes amatőr közösség egy nyílt forrású projekt képében a nagyközönség számára elérhetővé tette a 3D nyomtatást. Ez a projekt a RepRap (Replicating Rapid Prototyper), mely a Stratasys-féle szálolvasztásos technológia egy módosítottát veszi alapul, olcsó alapanyaggal és elérhető áru „csináld magad” gépkészlettel.

Az FDM technológia szabadalmának lejártával az olcsó 3D nyomtatás elképzelése más vállalatokat is inspirált, és a kezdeményezéseknek köszönhetően egyre nagyobb figyelem irányult a 3D nyomtatásra.

A 3D nyomtatás ma már rendkívül széles körben alkalmazható eljárás. Szinte bármilyen szilárd termék gyártható additív folyamatokkal. Néhány modern példa alkalmazási területekről:

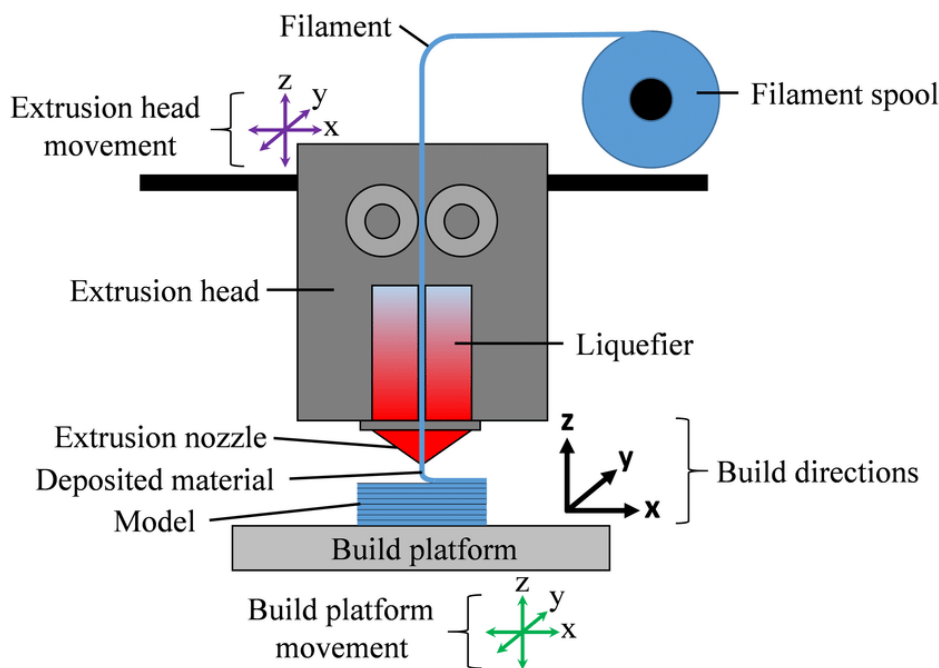
- autóipar;
- repülőipar;
- orvostechnika;
- építészet és építőipar;
- fogyasztói cikkek;
- ipari termékek;
- szórakoztatóipar;
- védelmi ipar;
- oktatás.

2.2. A 3D nyomtatás FDM technológiája

A huzalleolvastásos vagy más néven a szálhúzásos eljárás a második leginkább elterjedt technológia az iparban, amely egyben a legolcsóbb eljárás is. „Az FDM (Fused Deposition Modeling) segítségével koncepciómodellek, működőképes prototípusok és végfelhasználói alkatrészek készíthetők normál, mérnöki felhasználású és nagy teljesítményű hőre lágyuló műanyagból. Ez az egyetlen olyan professzionális 3D nyomtatási technológia, amely ipari felhasználású, hőre lágyuló műanyagot használ, így az elkészült elemek egyedülálló mechanikai, hő- és vegyi ellenállással bírnak.”[4]. Lényege, hogy műanyag szálát (filamentet) olvaszt meg és visz fel rétegekben. Hasonló a nyomtatási folyamata egy sima papírra való nyomtatáshoz. Ennek az eljárásnak két népszerű alapanyaga a PLA és az ABS. Ezekon kívül számos alapanyagot is használunk, amelyek különböző mechanikai, hő- és vegyi tulajdonságokkal rendelkeznek, ezek pl.:

- PETG (Polyethylene Terephthalate+Glycol);
- ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile);
- TPU (Thermoplastic Polyurethane);
- PA (Polyamide vagy nylon);
- PC (Polycarbonate);
- PVA (Polyvinyl Alcohol Plastic);
- Stb...

Az alapanyag egy dobon feltekercselve áll rendelkezésre, amely szabványos, kör keresztmetszetű, 1,75 mm-es vagy 2,85 mm-es vastagságban érhető el. Ez egy orsóra kerül, ahonnan az extruder fejben lévő behúzó görgők fokozatosan letekerve adagolják a hotend-be, mialatt az érzékelő által felhevített fűtőpatron megolvasztja a filamentet, amely egy szűk fűvókán (nozzle) keresztül, képlékeny állapotban kinyomja a modelltérbe, ahol előbb a tárgyasztalhoz tapad meg, majd az előző réteghez „heged” és rögtön megszilárdul, kialakítva ezzel a 3D modellünket. Többféle nyomtatófej mozgási kialakítások vannak. Léteznek olyanok, ahol a fűvóka X, Y és Z irányban tud mozogni, a modelltérhez viszonyítva, de van, amikor a fej csak X illetve Y irányban mozog, és a munkasztal adja a függőleges Z irányú elmozdulást. Valamint ezeknek a különböző variációjuk is előfordul a 3D nyomtatóknál. Az FDM technológia elvi vázlata a 3. ábrán látható.



3. ábra: Az FDM technológia elvi vázlata

[Forrás: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-fused-deposition-modeling-process-Source-18_fig1_324601411;

letöltve: 2023.06.15.]

Filament adagolását tekintve kétféle típust különböztetünk meg:

- Direct Drive Extruder;
- Bowden Extruder.

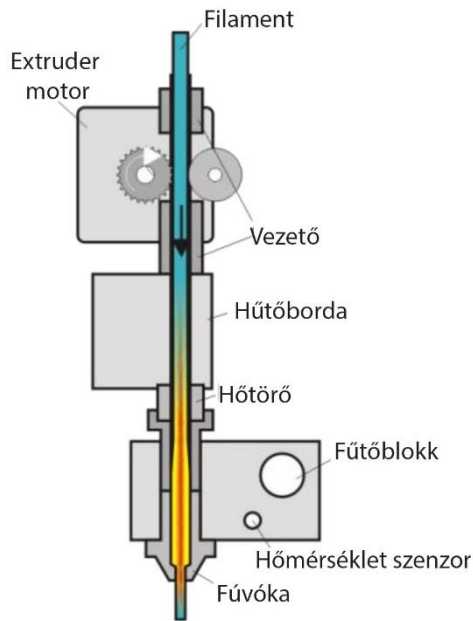
Direct Drive Extruder esetében az extruder motor a nyomtatófejen helyezkedik el, így a filamentet közvetlenül a fűvókába nyomja, 4. ábra szerint. Az összes filamentet feldolgozó alkatrész egy helyen található meg a nyomtatófejen, ezek előnyivel és hátrányaival együtt. [5].

Előnye:

- Jobb extrudálás érhető el;
- Gyorsabb visszahúzást tesz lehetővé;
- Elegendő a gyengébb motor, ami a filamentet adagolja.

Hátránya:

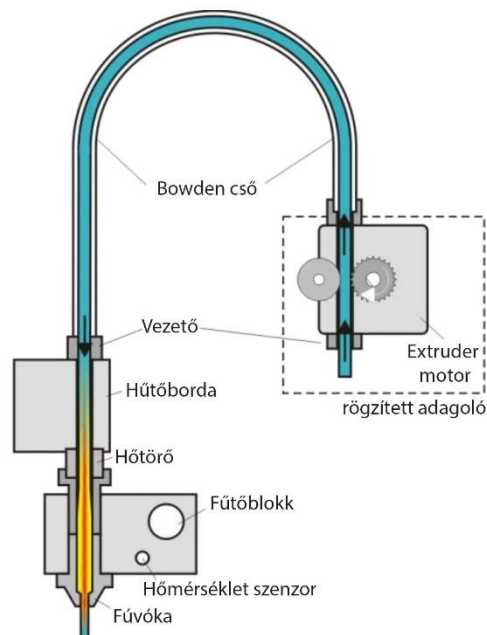
- Nagyobb súly terhelődik a nyomtatófejen;
- Sok alkatrész, bonyolultabb karbantartást igényel.



4. ábra: Direct Drive Extruder fej

[Forrás: <https://zengo.eu/hu/blog/az-fdmfff-nyomtatas-folyamata>;
letöltve: 2023.06.15.]

A Bowden Extruder esetében a szerkezet pedig a 3D nyomtató keretéhez van rögzítve, külön a nyomtatófejtől, ahol a filamentet egy hosszú PTFE (polit-tetrafluoretilén) műanyag csövön (bowdenen) keresztül nyomja a fúvókába. Ezt a megoldást az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: Bowden Extruder fej

[Forrás: Forrás: <https://zengo.eu/hu/blog/az-fdmfff-nyomtatas-folyamata>;
letöltve: 2023.06.15.]

Az FDM technológiával működő nyomtatók fejének részét képezi a Hotend, az a fémcső, amiben az alapanyag az utolsó pár centimétert teszi meg a nyomtatás előtt. A filamentnek csak itt szabad megolvadnia, amit egy fűtőpatron segítségével érünk el. Ezt a hőmérsékletet pedig egy hő szenzor érzékeli és továbbítja az alaplapnak, ami ezáltal állítja elő a megadott hőmérsékletet. Két alapvető zónája van: „olvadási” zóna, illetve a „hideg” zóna. A Hotend-nek négy fő része van:

I. Heatsink (hűtőborda):

A hőszigetelőt általában közvetlenül a hűtőborda elemhez rögzítik. Lehet passzív (hűtőborda) vagy aktív (hűtőborda + ventilátor). Az a feladata, hogy elvezesse a hőt a hőtörés hideg zónájából, ami kritikus fontosságú a problémák elkerülése érdekében. A hideg zóna túlzott melegedése az izzószál meglágyulását és összenyomódását eredményezheti, ami a filament beragadását okozhatja. Ezt a jelenséget hőkúszásnak nevezzük. Aktív hűtőbordák esetén minden nyomtatás elején ellenőrizni kell, hogy a ventilátor megfelelően működik-e. Egyes nyomtatók termosztáttal vezérlik ezt a ventilátort, így előfordulhat, hogy kikapcsolt állapotban marad, amíg a Hotend el nem éri az 50 °C vagy 100 °C hőmérsékletet.

II. Heatbreak (hőtörő):

Ez egy kis cső szakasz, aminek egy része a hűtőbordában (Heatsink), egy része pedig a fűtőblokkban (Heat Block) fut, így képezve összeköttetést a két elem között. Ezzel minimálisra csökkentve a hőátadást a hűtőborda felé.

III. Heat Block (fűtőblokk):

Ez lehet egy alumínium vagy réz tömb, amely felhalmozza a hőt és felmelegíti a filament szálát az olvadáspontig. Ebben helyezkedik el a fúvóka (Nozzle), a fűtőpatron (Heat Cartridge), és a hő érzékelő (Thermistor). Bár nem igényel különösebb karbantartást, nagyon fontos, hogy a lehető legtisztább legyen, mivel a nyomtatás közben a felgyülemlett műanyag törmelék leválhat és rátapadhat az alkatrészre, ami esztétikai hibákat vagy akár nyomtatási hibákat is okozhat.

IV. Nozzle (fúvóka):

Általában sárgarézből készül, de előfordulhat edzett acélból vagy rozsdamentes acélból készült fúvóka is. A furat átmérője határozza meg a nyomtatott izzószál vastagságát és minőségét. Ez leggyakrabban 0,4 mm, de 0,2 mm-től 0,8 mm-ig lehet beszerezni gyártótól függően. Felső szára menettel csatlakozik a fűtőblokkba, ezért az alsó szára hatlapos fejű, hogy csere esetén ki tudjuk csavarni.

Az adagolásból keletkezett nyomás hatására a szűkített fúvókán kipréselődött olvadt filamentet hűteni kell, ugyanis, ha hagyjuk, hogy magától hűljön, akkor viszonylag sokáig lágy marad az anyag, ezáltal deformáció jön létre, és nem tudjuk a rétegeket megfelelően egymáshoz kötni. Ennek megoldására található a nyomtatófejen egy ventilátor, ami közvetlenül a fúvóka hegye alá összpontosítja a hűvösebb levegőt, aminek köszönhetően, amint az olvadt filament elhagyja a fúvókát, egyből meg is szilárdul. A megszilárdult anyag még kellően meleg ahhoz, hogy megtapadjon a tárgyasztalon, illetve az előző réteghez, de már nem elég meleg ahhoz, hogy szétfolyjon. Amikor egy előző rétegre nyomtat egy új réteget a gép, akkor a fűtőblokkból (Heatblock) áradó hő kellően megmelegíti az alsóbb réteget is, ami éppen csak meglágyul annyira, hogy az új réteggel összeolvadjon, így hozva létre a fizikai adhéziós kötést a két réteg között.

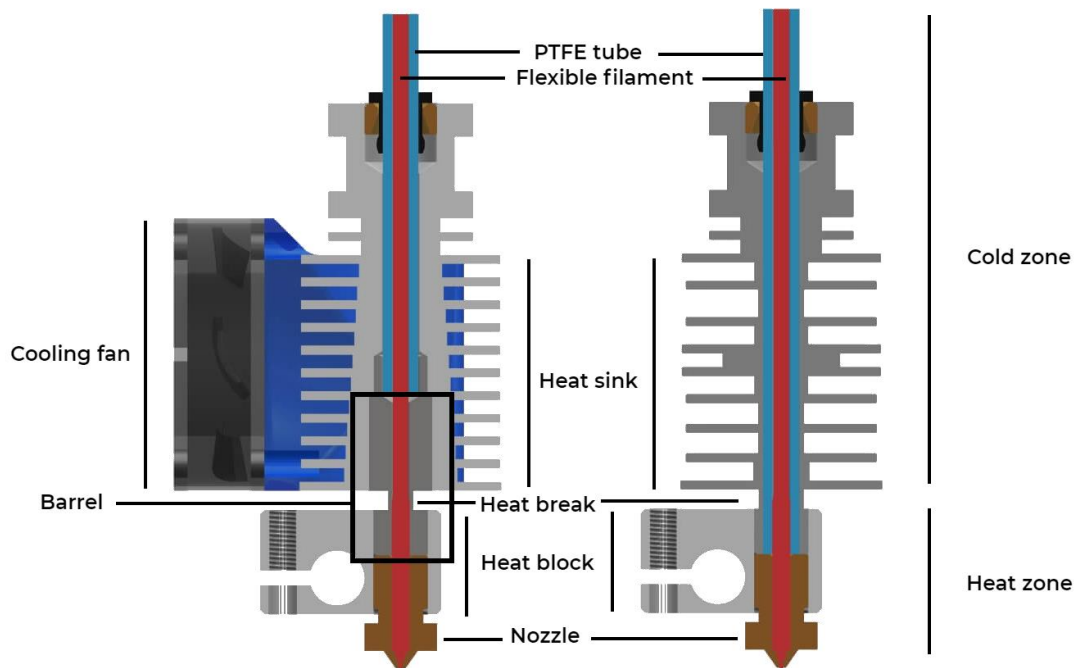
A Hotendek kialakításában kettő típust különböztetünk meg egymástól, amelyek:

- Teflon line Hotend (*E3D lite6*);
- All metal Hotend *E3D v6*).

Teflon line Hotend esetében, ha a keresztmetszetet megfigyeljük (6. ábra), látható, hogy a PTFE teflon cső egészen leér a fűtőblokkig, érintve a fúvókát. Ennek köszönhetően a teflon cső átveszi a fúvóka hőmérsékletét, és mivel ez az anyag 240-250 °C felett kezd el lebomlani, hosszabb hőhatásnak kitéve a teflon cső mérgező gázokat, füstöket bocsát ki, ami káros az egészségre.

All metal Hotendnél pedig a PTFE teflon cső, illetve a fúvóka között egy fémből készült közdarab helyezkedik el, ez látható a 6. ábrán. Ennek eredményeképp a teflon cső a hideg zónában, azaz a hűtőbordában végződik. Ez lehetővé teszi a speciális és a magas hőmérsékletű anyagok nyomtatását. Az ehhez tartozó fűtőblokkot és a fúvókát, beállíthatjuk akár 300 °C fölötti hőmérsékletre is.

E3D v6 E3D lite6



6. ábra: Jobb oldalon a Teflon line Hotend, míg a baloldalon az All metal Hotend látható
[Forrás: <https://recreus.com/gb/noticias/learn-with-recreus/filaflex-vs-all-metal-hotends>;
letöltve: 2023.06.19.]

Az FDM technológia pontos, azonban a minőség nagyban függ a fúvóka furat átmérőjétől. Emellett a nyomtatási anyag tulajdonságai hűlés közben is megváltozhatnak, és váratlanul deformálódhatnak. Ezért a nyomtató tárgyasztalt általában szintén hevíteni kell. Ez az a terület, ahova a 3D modellt kinyomtatjuk. Hőmérséklete a felhasznált filament alapanyagától függ, de általában 50 és 120 °C közöttire tehető. Így az alapanyag hűlése szabályozható. Megkülönböztetünk többféle tárgyasztal típust: [6].

I. Üveg:

Ez a tárgyasztal főleg az első 3D nyomtatóknál volt jellemző.

II. Karbondum üveg (Carborundum glass):

Ennek a felülete már recésebb, ami lehűlés után összezsugorodik kis mértékben, ennek köszönhetően a kinyomtatott 3D modell könnyebben leszedhető.

III. Teflonbevonatú lemez (PEI sheet):

Általában egy flexibilis tárgyasztal, amelyről könnyű leszedni az elkészült 3D modellt. Fontos megjegyezni ezzel kapcsolatban, hogy minden nyomtatás előtt meg kell tisztítani izoopropil-alkohollal (IPA-lal).

Az FDM technológiának számos előnye van, de hátrányok is léteznek, ezek a következők:

Előnyök:

- Könnyen hozzáférhető és használható, de professzionális gépek is elérhetőek;
- Viszonylag gyors eljárás;
- Különböző tulajdonságokkal rendelkező alapanyag szálak és színek érhető el a piacon;
- Alacsony üzemeltetési költségek.

Hátrányok:

- Csak hőre lágyuló műanyagokkal használható;
- Alacsony nyomtatási pontosság;
- Durvább felület minőség, ami utólagos megmunkálást igényel;
- A nyomtatott modellek eredendően anizotrop anyagok, azaz csak egy irányban erősek:
 - Nyomás esetén egy FDM modell csak abban az irányban erős, ahol az erő merőleges a rétegekre.
 - Feszítésben a modell csak akkor erős, ha a rétegek párhuzamosak az erővel.

2.3. FDM alapanyagok

Ahogy egy irodai nyomtatónak is szüksége van tintapatronra, úgy az FDM 3D nyomtatónak is szüksége van műanyag szálra, hogy különböző színű, méretű és tulajdonságú tárgyakat vagy modelleket nyomtathassunk. A megfelelő filament kiválasztása lényeges szempont, hogy a kinyomtatott alkatrészt milyen hő, illetve mechanikai tulajdonságnak akarjuk kitenni, és hogy ezáltal mennyire lesz tartós. „Eltérő feladatok és szituációk esetén eltérő követelményeknek kell megfelelni a nyomtatott prototípusunknak vagy modellünknek, így minden adott helyzetben meg kell vizsgálni, melyik anyag alkalmazása a leghatékonyabb az adott feladatra.” [7].

A filament műanyagok a következők szerint csoportosíthatók:

- **Az anyag típusa** (pl.: mechanika vagy rugalmasság szerint);
- **A szál átmérője** (1,75 mm vagy 2,8 mm átmérőjű szálak);
- **A tisztaság** (fának látszó anyag);
- **Egészségvédelmi, és környezetvédelmi szempontok** (egyes szálak biológiailag és/vagy UV hatására lebomlóak);
- **Hőmérsékleti ellenállás.**

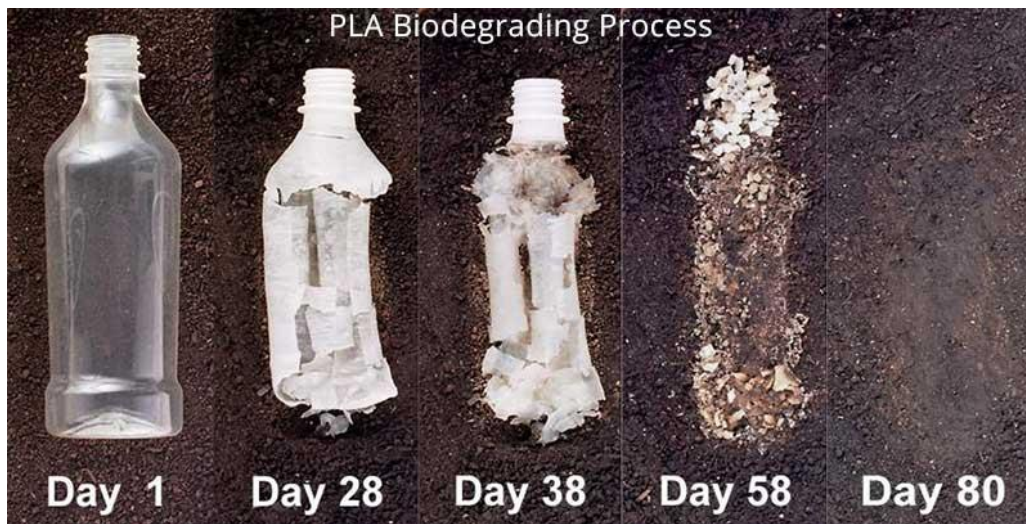
A **PLA** (PoliLactic Acid, magyarul politejsav) filament a világ legnépszerűbb műanyag szálja, amely egy tejsav alapú, biológiailag és/vagy UV hatására lebomló műanyag, amelyet kukoricából vagy burgonyából állítanak elő, és nedves talajban és/vagy UV hatására néhány hónap, illetve év alatt komposztálhatóak, ezt szemlélteti a 7. ábra. Az alapanyagok között az egyik legolcsóbb. A huzalok extrúziója 180-220 °C között történik. A PLA-t színezik, tehát számtalan variáns létezik belőle, az egyszínűtől a színes átlátszókon át a „multikolor”-ig. [8].

Előnye:

- Környezetbarát és biológiailag, valamint UV hatására lebomló;
- Gyorsan hűl, ami megakadályozza a modell deformálódását;
- Alkalmos fűtetlen tárgyasztalokhoz;
- Számtalan színvariáns elérhető viszonylag olcsón.

Hátránya:

- Alacsony az olvadáspontja, ami deformálódást okozza nagy hőhatás esetén;
- Nem alkalmas illesztések, vagy egymásba illeszkedő alkatrészek készítésére.



7. ábra: PLA természetes alapanyagokból felépülő műanyag, amely képes elbomolni
 [Forrás: <https://www.3dbeginners.com/pla-vs-abs/>; letöltve: 2023.06.08.]

Az **ABS** (Akrinitril-Butadién-Sztirol), ami a világ legközkedveltebb építőjátékának, a LEGO kocka alapanyaga is. Merev, fényes és a deformációnak remekül ellenáll. Rengetegféle színű műanyag szál elérhető a piacon, viszonylag olcsón. A PLA-val szemben ez nem környezetbarát filament, mivel kőolaj-alapú anyagból készül. A nyomtatása is 50%-al több időbe telik. Az ABS-t 215-250 °C között nyomtatjuk, de azonban sokkal nehezebben tapad, mint az előbb említett PLA, ezért érdemes fűtött platformmal rendelkező nyomtatóval nyomtatni. és/vagy tapadást segítő szereket alkalmazni. A fűtött asztallal kiküszöbölhetjük az ABS huzal deformálódását is. Itt érdemes megjegyezni, hogy nyomtatása során csekély füst emisszióval kell számolni, ami az arra érzékenyeknél panaszokat okozhat. [8].

Előnye:

- Jól nyomtatható, így könnyen használható illesztések és egymásba illeszkedő alkatrészek gyártásához;
- Számptalan színvariáns elérhető olcsó beszerezhetőség mellett;
- Kinyomtatva ellenáll a mechanikai sérüléseknek és a különböző vegyi anyagoknak.

Hátránya:

- Nem környezetbarát az előállítás;
- Nehézkes nyomtatást tesz lehetővé;
- Ha az anyag hűtése nem szabályozott, akkor a termék deformálódik;
- Nyomtatás során vegyi füstök képződnek.

A **PETG** (Polyethylene Terephthalate+Glycol) egy glikol tartalmú polietilén-tereftalát. Az előnyös mechanikai tulajdonságait a glikolnak köszönheti. Ez a kedvelt filament alapanyag ötvözi a PLA és az ABS előnyeit, mivel a PLA-hoz hasonlóan könnyű nyomtatni, de annál magasabb hőmérsékletet is kibír deformálódás nélkül, valamint erősebb is tőle a 3D modellünk. Környezet barát alapanyagokból készül mivel azon kevés filamentek egyike, amelyek érintkezhetnek élelmiszerrel. Vegyszerekkel szemben kiválóan ellenáll, és terhelés hatására inkább nyúlik, mint törik. Hőtágulási együtthatója kicsi, emiatt nem vetemedik úgy mind az ABS alapanyag, és nem is rideg, mint a PLA filament. A PETG nyomtatása viszonylag könnyű, azonban lassabb nyomtatási sebességgel érdemes nyomtatni, mint a PLA műanyagot. Tárgyhűtésre pedig sokkal kevésbé van szükség. Ajánlott nyomtatási hőmérséklete: 220-250 °C, a lágyulási hőmérséklete pedig: 70-75 °C. Tárolását tekintve száraz helyen kell tárolni, és egyes esetekben szárítani is kell, mivel érzékeny a levegőben lévő páratartalomra. [8].

Előnye:

- Az FDA¹ által jóváhagyott, így alkalmas élelmiszerrel érintkező tárgyak gyártására;
- Környezetbarát előállítás és könnyen újrahasznosítható;
- Előnyös mechanikai tulajdonságok;
- Könnyű nyomtatás, ami nem okozza a modell vetemedését;
- Hő és vízálló.

Hátránya:

- Hajlamos a levegőben lévő nedvességet magába szívni;
- Biológiai szempontból nem lebomló anyag;
- Drágább, mint a PLA vagy az ABS műanyag filament.

¹ FDA ≈ Food and Drug Administration (Élelmiszer- és Gyógyszerügyi Hivatal)

A **PVA** (PolyVinyl Alcohol) egy olyan speciális, kissé sárgás színű műanyag, amely támaszanyagként szolgál a 3D modellek nyomtatásakor. Olyan összetett szerkezetek támasztására használják, amelyet nélküle nagyon nehéz vagy lehetetlen lenne kinyomtatni. Miután a nyomtatást befejeztük, a kinyomtatott modellt egyszerűen vízzel átmosva, csak az eredeti szerkezet marad meg, mivel a PVA egy vízben kiválóan oldódó filament, ahogy azt a 8. ábra mutatja.



8. ábra: Kinyomtatott modell PVA támaszanyaggal, átmosás előtt és után

[Forrás: <https://3dpass.de/3d-drucker-filament/>, letöltve: 2023.06.22.]

2.4. FDM nyomtatás előkészítési folyamatai

2.4.1. 3D modellek létrehozásának módjai

Egy 3D nyomtatott tárgy előkészítésének folyamata a nyomtatandó tárgy realisztikus modelljének elkészítésével kezdődik. A digitális tárgyakat **3D modellező számítógépes szoftverekben**, például: SolidEdge, SolidWorks, AutoCAD és ezekhez hasonló programokban készíthetjük el parametrikusan, vagy szabadfelület modellezéssel. Lehetőség szerint olyan szoftvert kell választani, amely képes STL. formátum exportálására, mivel a szeletelő szoftver ezen kiterjesztésű fájlokkal tud dolgozni. Előnyös CAD szoftverek azon tulajdonsága, ha tartalmaznak terheléses vizsgálatot. A bonyolultabb tárgyak esetén a modelleket gyakran szimulációkkal terhelik, hogy az adott munkadarabra ható igénybevételek esetén milyen feszültségek, erők vagy deformációk keletkeznek a modellben, így szükség szerint tudjuk azt módosítani és/vagy áttervezni.

Ha 3D modellező programokat nem tanultuk, illetőleg, ha az alapokat autodidakta módon sajátítottuk el, esetleg nem szeretnénk a modellezéssel időt tölteni, vagy olyan tárgyat keresünk, amit már más korábban elkészített egy CAD/CAM tervezőprogramban akkor azt le is tudjuk az **internetről tölteni** akár ingyen, akár egy kisebb összegért. Itt fontos megjegyezni, hogy ezek a modellek csak és kizárólag saját felhasználásra állnak rendelkezésre. Ilyen ellenőrzött adatbázisok kiváló minőségű 3D modellek letöltésre az alábbiak: myminifactory.com; cults3D.com; all3Dp.com stb....

Egy másik módja annak, hogy egy 3D modell realisztikus modelljét megkapjuk, ha az adott tárgyat **3D szkennel**ssel beolvassuk, 9. ábra. Ez egy olyan eszköz, amely képes egy 3D tárgy alakját és felületét beolvasni és digitális formára alakítani. Precizitása meghaladja $\pm 20 - 50$ mikron pontosságot. Maga a digitalizálás csak az első lépés, amit egy szoftveres utómunka követ, mivel a szkennelés nem tud 100%-os munkát végezni. Ezzel összeáll a szkennelés végeredményeként létrejövő 3D modell.



9. ábra: 3D szkennelés alkalmazása

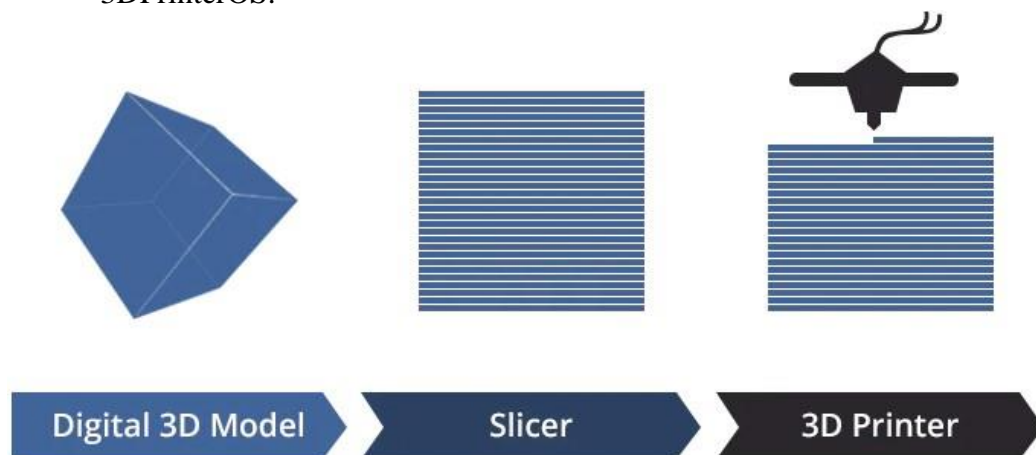
[Forrás: <https://www.freedee.hu/3d-szkennerek/>; letöltve: 2023.06.26.]

2.4.2. Szeletelő szoftver ismertetése

A modellezéssel és az esetleges szimulációk végeztével exportálni kell a modellt STL kiterjesztésben, (a legszélesebb körben alkalmazott formátum), ugyanis a 3D nyomtatáshoz nélkülözhetetlen a modell felszeletelése. (Ez az angol slicing ~ szeletelő szóból ered). Az STL fájl formátum a modell háromszögekkel burkolt geometriáját írja le vektorok segítségével színek és textúrák nélkül. A 3D modellt több száz vagy akár több ezer egyenlő „szeletre” osztva szét, (jellemzően 0,1-0,3 mm nagyságban). Ehhez ma már több szeletelő szoftver közül is válogathatunk. A szeletelő szoftver lényegében közvetítőként működik a 3D modell és a nyomtató között, 10. ábra. A szoftver a szeletekből legenerálja a CNC-nél is jól ismert G-kódokat, amely egy numerikus programozási nyelv. Ezek olyan utasításokat tartalmaznak, amelyek a 3D nyomtatott modellek vagy tárgyak nyomtatására vonatkoznak. A szoftverekben be kell állítani a paramétereket az optimális eredmény érdekében, mivel minden egyes nyomtatás más és más beállítást igényel. A szoftver a legtöbb esetben tartalmazza a nyomtatáshoz szükséges támasztékokat is, amire azért van szükség, mert a tárgyat nem lehet a levegőben elhelyezni, vagy kinyomtatni, így kell egy olyan támaszték, amire a nyomtató fel tudja hordani az alapanyagot. Ezeknek az elemeknek a nyomtatás után el kell távolítani. [9].

Megemlítve pár 3D nyomtatószeletelő szoftvert, azonban ezeken kívül számos szeletelő szoftver létezik a piacon.

- Ultimaker CURA;
- PrusaSlicer;
- 3DPrinterOS.



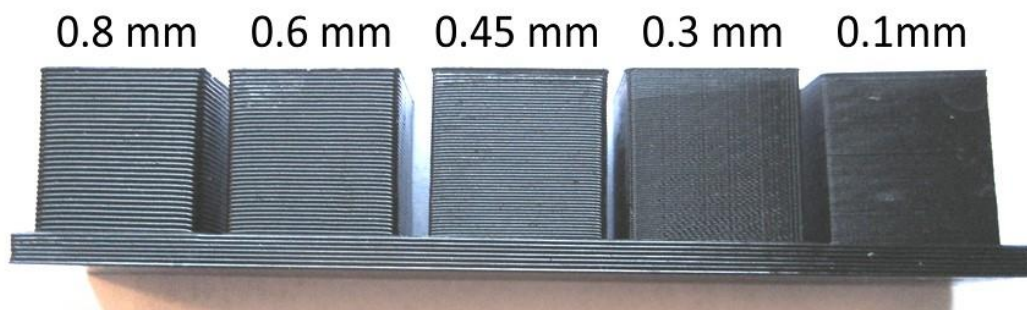
10. ábra: A szeletelő szoftver működési folyamata

[Forrás: <https://www.anycubic.com/blogs/3d-printing-guides/best-3d-printing-slicer-software>; letöltve: 2023.06.27.]

A szeletelő szoftverben számos beállítási lehetőség van, amelyek nagymértékben befolyásolják a 3D nyomtatási részek minőségét, ezek közül a legalapvetőbbek:

I. Rétegvastagság (Layer Hight):

Ez a tulajdonság határozza meg a nyomtatott tárgy felületi minőségét, azaz, hogy a 3D nyomtatásban milyen vastag legyen minden egyes felvitt réteg. Minél nagyobb értéket állítunk be, annál durvább felületet kapunk. A vékony rétegű nyomtatás részletgazdagabb, simább felületet készít, ennek a hátránya az, hogy több idő kell a nyomtatáshoz, mivel a tárgy több rétegből tevődik össze, 11. ábra. Ezek a beállítások azonban nagyban függenek a nyomtató minimum és maximum értékétől, amely nyomtatásra az eszköz képes. [10].

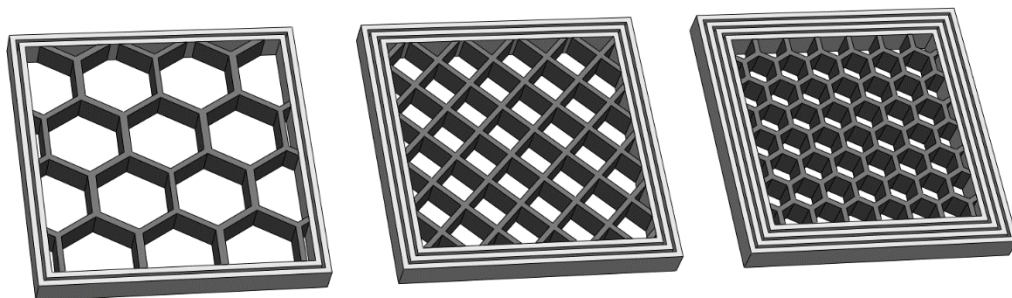


11. ábra: A rétegvastagság (Layer Hight) különböző mméretei

[Forrás: <https://43dprint.org/layer-height-3d-printing/>; letöltve: 2023.06.27.]

II. Falvastagság (Wall Thickness):

Ez a tulajdonság határozza meg, hogy a 3D nyomtató hányszor megy körbe a nyomtatott tárgy peremén, mielőtt elindítja az üreges belső profilok nyomtatását, azaz milyen vastag fallal rendelkezzen a munkadarab. Ez a beállítás határozza meg a nyomtatott tárgy teherbírását. Ha növeljük ezt a paramétert, akkor a munkadarab fala vastagabb és szilárdabb lesz, ez látható a 12. ábrán. [11].



12. ábra: A falvastagság (Wall Thickness), illetve a kitöltés (Fill Density) alakulása

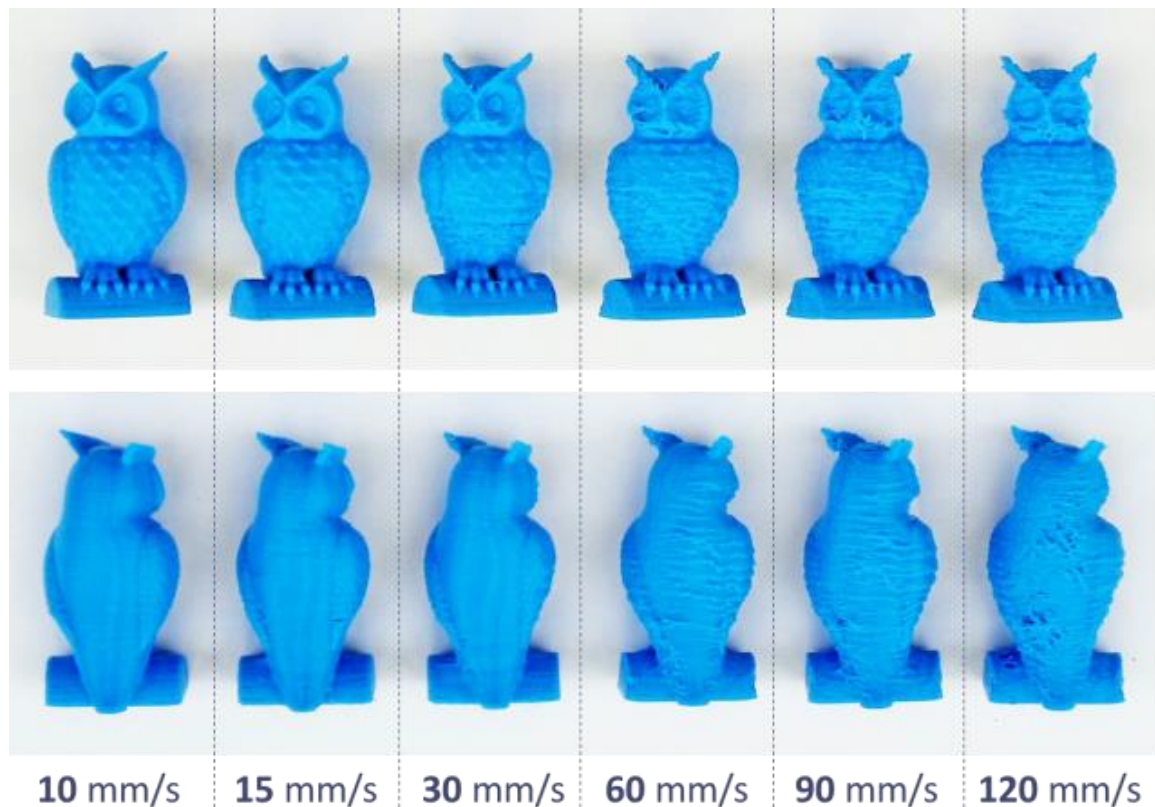
[Forrás: <https://3dprototypesandmodels.com.au/3d-printing-terminology-specifications/>; letöltve: 2023.06.27.]

III. Belső kitöltés (Infill Density):

A kitöltés a nyomtatott tárgy külső fala által körbefogott belső területre vonatkozik, amely a tárgy tömörségét is adja, 12. ábra A kitöltés értékét mm helyett százalékban lehet megadni. 0%-nál teljesen üreges, míg 100%-nál tömör tárgyat kapunk. Azonban érdemes megjegyezni, hogy ilyenkor is „szivacsos” a szerkezet, mivel ezzel a technológiával nem tudunk teljes mértékben tömör testet elérni. Nagyító alatt láthatóak ezek a „üregék”. Minél magasabb a kitöltés százalékos aránya, annál erősebb és nehezebb a nyomtatott tárgyunk, illetve annál több időt és anyagot is igényel.

IV. Nyomtatási sebesség (Print Speed):

Ennél a beállításnál adható meg a nyomtató fej által végzett mozgások sebessége *mm/s*-ban. Az optimális beállítási érték függ a modell alakjától, felhasznált alapanyagtól, a nyomtatótól és a rétegek vastagságától is. Alacsony nyomtatási sebesség jobb minőséget eredményez, bár ez erősen időigényes. A nagy nyomtatási sebesség azonban csúnya és rossz felületi eredményt okozhat, amely látható a 13. ábrán is. [12].

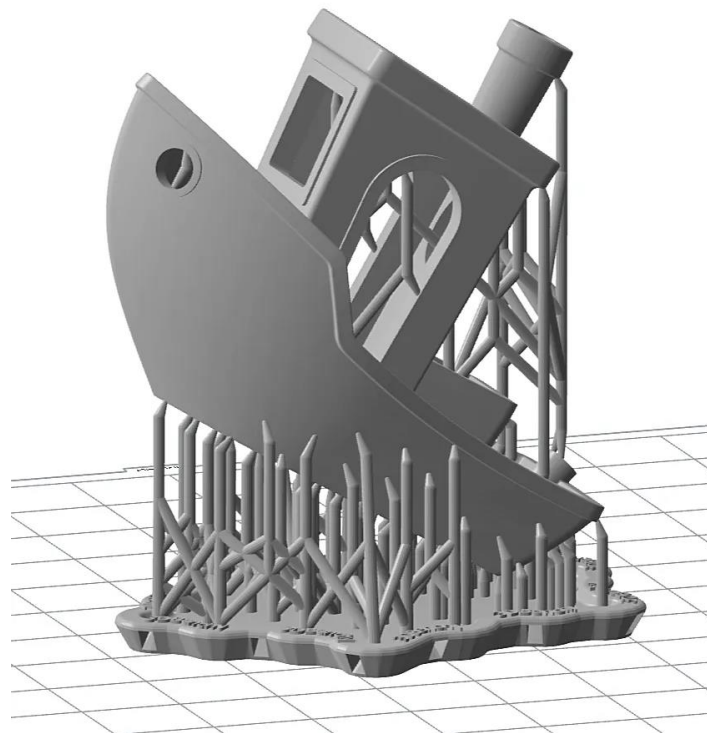


13. ábra: A felületi minőségek a sebesség függvényében

[Forrás: <https://www.easy3dhome.com/printing-speed/>; letöltve: 2023.06.27.]

V. Alátámasztás (Support):

A 3D nyomtatásnál a támaszték egy olyan struktúra, amely segít megtartani azokat a 3D tárgyakat, amelyeknél úgy jönnek ki a rétegezések, hogy egyes részeknek a levegőben kellene megállniuk a nyomtatás során. Mivel a modelleket rétegenként nyomtatjuk, azok a részek, amelyek 45° foknál jobban döntöttek nem tudnak az alattuk lévő rétegekre támaszkodni, vagy nyomtatáskor eleve lebegnének. Ebben az esetben minden 45° foknál nagyobb dőlésszögű kiszögellésnél az alkalmazása erősen ajánlott, 14. ábra. A kettős extruder fej előnye itt válik hasznossá, hiszen nyomtatás közben együttesen képes a támasz, és a munkadarab anyagát is nyomtatni eltérő anyagokból. A szeletelő szoftver tartalmazza a „támasztási lehetőség” (Support) funkciót, amit kiválasztva támasztékokat generál olyan helyeken, ahol az algoritmus érzékeli, hogy jobb eredményt ér el, ha megtámasztja az adott részt. Természetesen, ha ez nekünk nem megfelelő saját magunk is generálhatunk támasztási pontokat. Ezeket a támasztékokat nyomtatás után könnyedén eltávolíthatjuk. Ha vízben oldódó támaszanyagot alkalmazunk, akkor az eltávolítás gyorsabb és könnyebb, ha pedig más féle alapanyagot alkalmazunk, akkor a nyomtatást követően utómunkával elérhetjük a modell végső alakját.



14. ábra: Teszt hajó alátámasztása a szeletelő szoftver segítségével

[Forrás: <https://3dprintyorkshire.com/>; letöltve: 2023.06.27.]

VI. Nyomatási és a tárgyasztal hőmérséklete (Temperature of Print and Platform):

Nagyon fontos meghatározni a nyomtató fej, illetve a nyomtató tárgyasztal hőmérsékletét. Előbbinél ugyanis figyelembe kell venni, hogy milyen alapanyagot használunk, emellett befolyásolja a nyomtatás minőségét is. Utóbbi esetben pedig a modell a tárgyasztalhoz való tapadásában játszik fontos szerepet, valamint, hogy a hűlés szabályozott legyen és a kinyomtatott tárgy ne deformálódjon vagy vetemedjen.

VII. Tárgyasztal tapadása (Platform Adhesion):

Ebben az esetben megadhatunk extra réteg felületeket, amelyek elősegítik a modell tárgyasztalhoz való tapadását. Ha a nyomtatni kívánt tárgy alapterülete kicsi, célszerű növelni a tapadás felületét, 15. ábra. Erre 3 féle lehetőség áll rendelkezésre:

a) Skirt (szoknya):

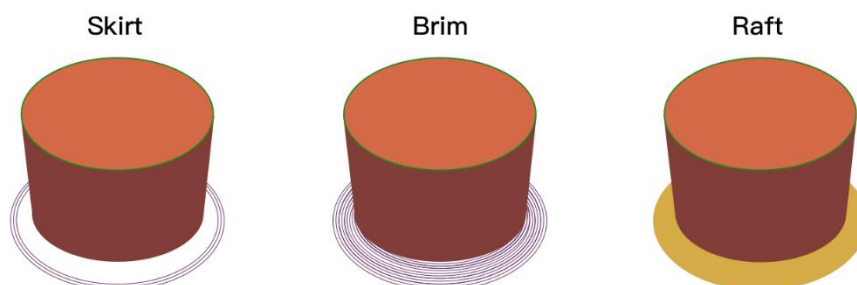
A tárgy körül egy vékony vonalat nyomtat, ezzel stabilizálva a fűvókából kijövő anyagot.

b) Brim (karima):

Koncentrikus köröket nyomtat a nyomtatni kívánt tárgy alja körül. Ez a karima a 3D modell sarkait a tárgyasztalon tartja. Kiváló megoldás vetemedésre hajlamos anyagok nyomtatásánál.

c) Raft (tutaj):

Egy réteget nyomtat a tárgyasztalra, és ezután erre kezdi el nyomtatni a 3D tárgyat. Megfelelő karcsú, vékony és álló tárgyak nyomtatásánál.



15. ábra: Különböző tárgyasztal tapadási felületek

[Forrás:

https://www.ideamaker.io/dictionaryDetail.html?name=Skirt/Brim%20Extruder&category_name=Platform%20Additions; letöltve: 2023.06.28.]

3D nyomtatásnál figyelembe kell venni a nyomtatás orientációját, azaz, hogy a modell mely felületen fekszik fel a tárgyasztalra – ezt elsősorban a tárgy végfelhasználása határozza meg. A rétegek között, vagyis a Z tengely mentén sokkal gyengébb kötés jön létre, mint az X-Y tengelyek mentén. Ebben az esetben, ha a terhelés Z irányban hat, akkor nagyobb eséllyel megy tönkre a végtermék. Másodsorban az alátámasztásokra is figyelni kell, mivel más és más orientációkban kevesebb, vagy több alátámasztás szükséges.

Ha beállítottuk a legalapvetőbb paramétereket, megvizsgáltuk, hogy van-e szükség alátámasztásokra, meghatároztuk a legoptimálisabb orientációt, valamint beállítottuk a megfelelő hőmérsékletet – mind a tárgyasztalra, illetve mind a nyomtatófejre – nem maradt más, mint rányomni a szeletelés gombra.

Némi számolás és gondolkodás után a szoftver elkészíti a modell felszeletelt változatát. Itt lehetőségünk van rétegenként megnézni a felszeletelt modellt, ellenőrizhetjük, hogy megfelelőek-e a beállítások, amiket korábban állítottunk be. A szoftver kiszámolja azt is, hogy mennyi időbe telik a művelet, valamint, hogy mennyi anyagot fog felhasználni a nyomtatás során, és annak költségét is.

Ha mindent rendben van, megnyomhatjuk az exportálás gombot. Ekkor a szoftver elkészíti a korábban említett G kódot pl.: az SD kártyára, vagy a pendrive-ra. Ezt az SD kártyát vagy pendrive-ot behelyezve a nyomtatóba elindíthatjuk a nyomtatást.

2.5. Roncsolásos és roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer

„Az anyagvizsgálat az anyagok mechanikai, kémiai, fizikai jellemzőinek meghatározásával, az anyag szerkezetének vizsgálatával és a szerkezeti anyagok helyi hibáinak kimutatásával foglalkozik.” [13]

Az anyagvizsgálati eljárások célja:

- A tervezési alapadatok szolgáltatása;
- A gyártási technológia ellenőrzése;
- A műszaki gyakorlatban előforduló káresetek vizsgálata.

Anyagvizsgálati módszereket tekintve kettő csoportot különböztetünk meg.

I. Roncsolásmentes anyagvizsgálat:

„Az alkatrész vagy szerkezet roncsolása nélkül vizsgálhatók a felületi, illetve az anyag belsejében lévő hibák. Ezért szokás ezeket az anyagvizsgálati módszereket hibakereső eljárásoknak is nevezni.” [13]

Ezeket tovább bonthatjuk még kettő további csoportra:

A. A darab felületén lévő hibák kimutatása:

- Vizuális megfigyelés;
- Mágneses vizsgálat;
- Penetrálófolyadékos vizsgálat;
- Örvényáramos vizsgálat.

B. A darab belsejében lévő hibák kimutatása:

- Röntgen vizsgálat;
- Gamma (γ) sugárzó izotópos vizsgálat;
- Ultrahangos vizsgálat;
- Akusztikus emissziós vizsgálat.

II. A roncsolásos anyagvizsgálat:

„Próbatestet kell készíteni a vizsgálni kívánt anyagból. Az elkészített próbatestet az adott vizsgálati módszerrel legtöbbször a tönkremenetelig vizsgáljuk. A módszerből következik, hogy a vizsgálatok eredményei csak statisztikusan jellemzik az anyagot.” [13]

A gépiparban alkalmazott szerkezeti és szerszám anyagok egyik legfontosabb tulajdonságcsoportja a mechanikai tulajdonságok, amelyek „az anyagok szilárdsági, törésmechanikai, kifáradási tulajdonságait határozzák meg. A vizsgálatok közvetlenül felhasználható mérőszámokat, anyagjellemzőket szolgáltatnak. A vizsgálat során törésig vagy nagymérvű alakváltozásig terheljük a próbatestet.” [6]

Az igénybevételek időbeli lefolyása szerint megkülönböztetünk:

- Statikus igénybevételt:
 - Az igénybevétel időben állandó vagy csak igen lassan, lökésmentesen változik.
- Dinamikus igénybevételt:
 - Az egyszeri hirtelen erőhatás.
- Ismétlődő, fárasztó igénybevételt:
 - Fárasztó igénybevétel az ismétlődő, periodikus erőhatás.

2.5.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat az egyik legismertebb és leggyakrabban alkalmazott anyagvizsgáló eljárás, melyet az egységes értékelés és a mérési eredmények összehasonlíthatósága miatt az aktuális, hatályos szabványok ajánlásai alapján célszerű elvégezni.

„A szakítóvizsgálat célja az anyagok húzó igénybevétellel szembeni viselkedésének vizsgálata, a szilárdsági és képlékenységi jellemzőinek meghatározása.

A szakítóvizsgálat folyamán a vizsgálandó anyagból készített szabványos próbatestet állandó, nagy sebességgel (körülbelül 50 mm/perc) húzva elszakítjuk, miközben mérjük a próbatest megnyúlását. A nagy sebességre azért van szükség, mivel kis sebességnél (1-2 mm/perc) a polimereknél kialakul a „kúszás” jelensége, amely állandó terhelés hatására kialakuló folyamatos alakváltozást jelent. Egy adott idő múlva a darab károsodását, törését eredményezi. Kúszás szobahőmérsékleten csak polimereknél, vagy kis olvadáspontú fémeknél (pl.: ólom, tiszta alumínium) jelentkezik.”[13]; [14].

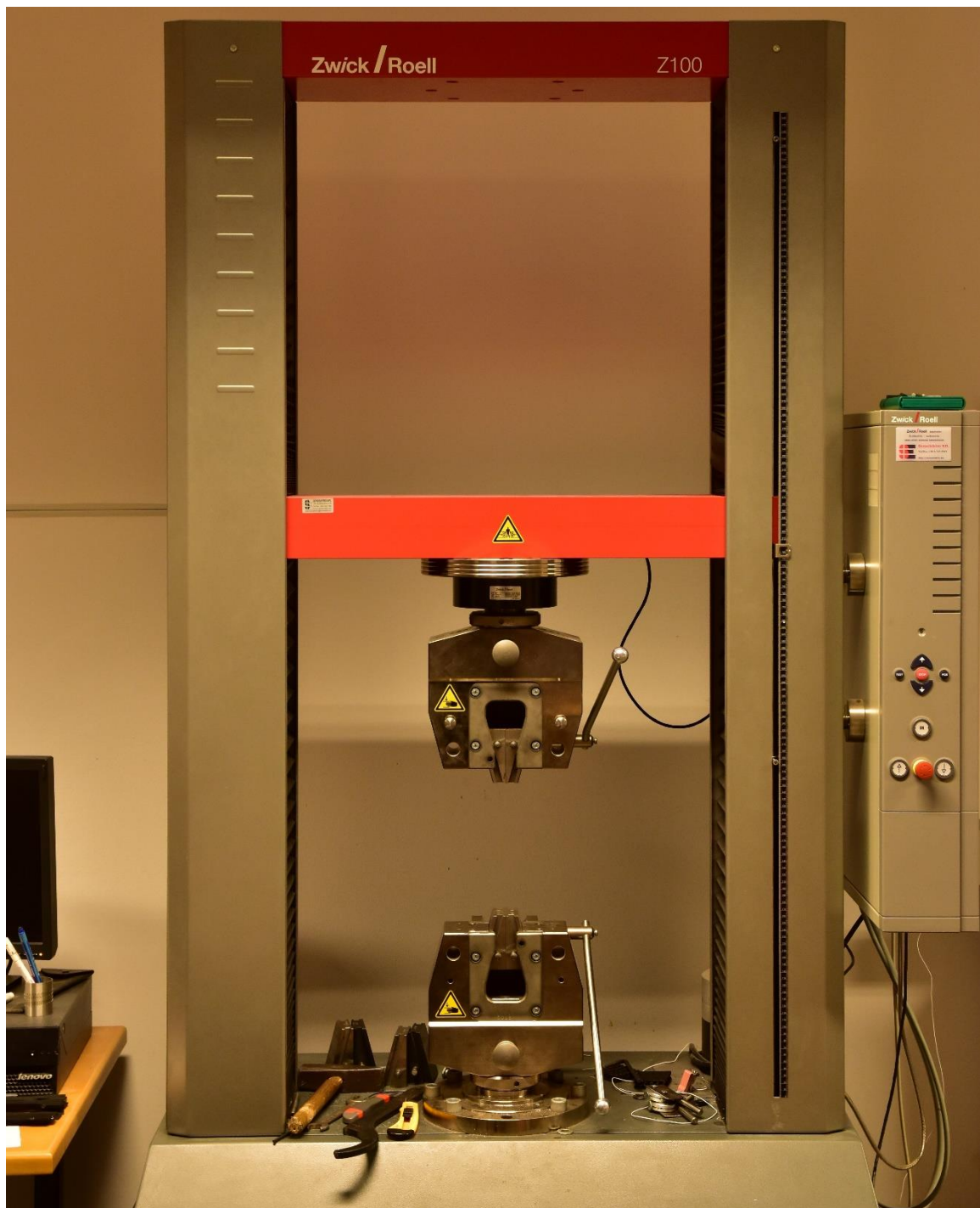
Fémek esetében:

- ISO 6892-1:2010

Polimerek esetében:

- ISO 527-1:2012

A szakítógépek kialakítását tekintve lehetnek függőleges vagy vízszintes elrendezésűek. Mechanikus, hidraulikus vagy elektronikus működésűek. Terhelésük néhány száz Newtontól [N], akár több ezer kilóNewton [kN] nagyságrendig terjedhet. A régebbi szerkezetek még mechanikus írószerkezetűek voltak, azonban mostanában már számítógéppel vezérelt szakítógépek terjedtek el, amiknek az előnye, hogy az adatokat részletesebb elemzéssel és óriási tárolhatósággal dolgozzák fel, ami a minőségbiztosításnál fontos követelmény. Ezek a készülékek univerzális anyagvizsgáló berendezések is egyben, amelyek szakítóvizsgálaton kívül a megfelelő tartozékok segítségével hajlító, nyomó és fásztóvizsgálat elvégzésére is alkalmasak. A szakítógépek fő részei a gépkeret, a hajtómű, az erő és nyúlásmérő berendezés valamint a befogószerkezetek, ezt láthatjuk a 16. ábrán. Ez a gép a Gödöllői MATE egyetem anyagvizsgáló laborjában lévő Zwick Roell Z100 anyagvizsgáló gépje. Ez egy elektromechanikus szakító gép ékes szorítású befogópofákkal.



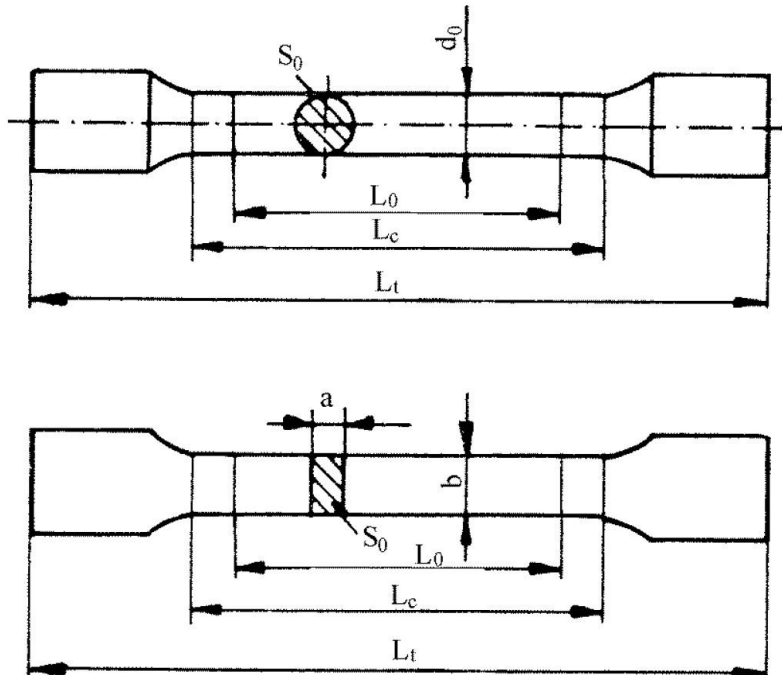
16. ábra: Zwick Roell Z100 anyagvizsgáló gép
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]

2.5.2. Próbatétel kialakítás fémek esetében

„A próbatétel keresztmetszete kör, négyzet, négyszög, körgyűrű valamint különleges esetekben más alak is lehet. Az olyan próbatétel, amelynek eredeti jeltávolsága és eredeti keresztmetszete között $L_0 = k\sqrt{S_0}$ összefüggés áll fent arányos próbatételnek nevezzük. A „k” tényező értéke 5,65 és 11,3 között változik. A megmunkált próbatételek vizsgálati hossza és fejrésze eltérő keresztmetszetű, köztük lekerekítéssel vagy vékonyítással. Az alkalmazott fejrész tetszőleges az alkalmazott szakítógépfogópóráinak megfelelő kialakításához.” [13] Ezeket a kialakításokat láthatjuk a 17. ábrán.

Az ábrák és jelölései:

- S_0 = a vízszintes szakasz eredeti keresztmetszete mm²-ben;
- d_0 = a hengeres próbatétel vizsgálati hosszának átmérője mm-ben;
- a = a hasáb alakú próbatétel vizsgált részének vastagsága mm-ben;
- b = a hasáb alakú próbatétel vizsgált részének szélessége mm-ben;
- L_c = a próbatétel hengeres, vagy hasáb alakú részének a hossza mm-ben;
- L_t = a próbatétel hosszúsága a fejrésszel együtt mm-ben;
- L_0 = a próbatétel vizsgálati hosszán kijelölt szakasz, az ún. eredeti jeltávolság, amelynek növekedése az alakváltozás meghatározására szolgál.

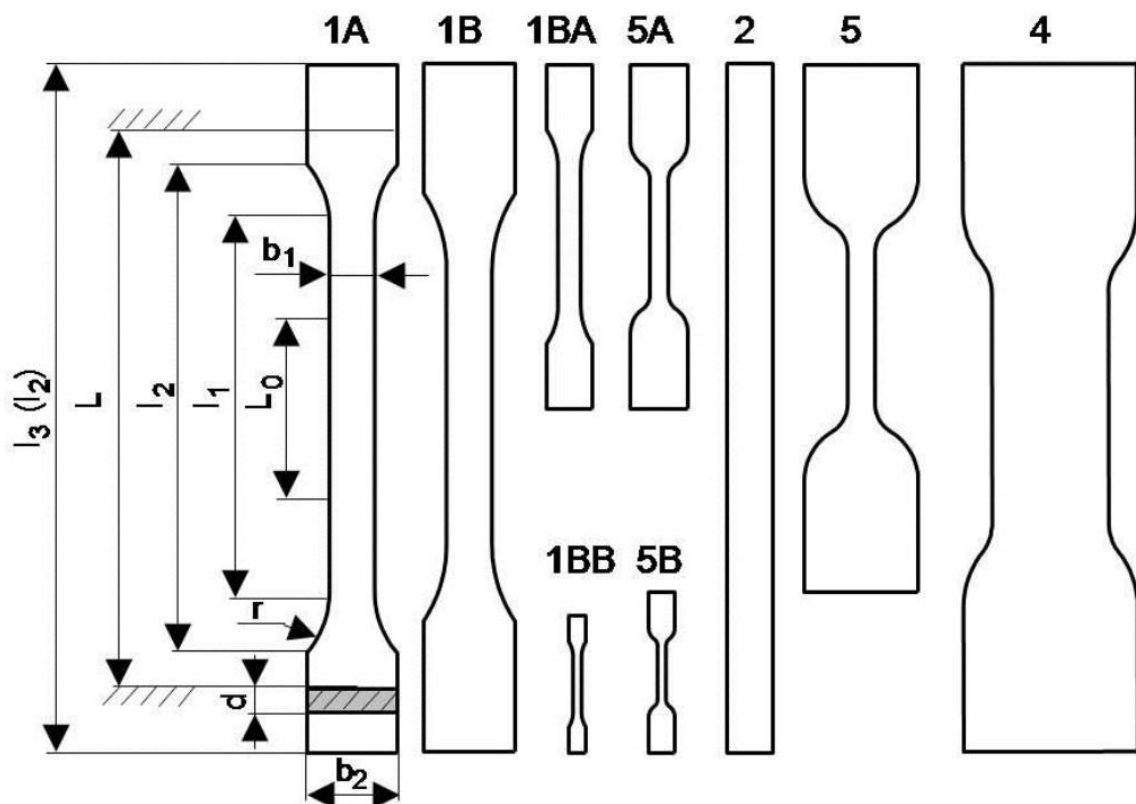


17. ábra: Szakító próbatétel kialakítás fém esetében a jellemző adatokkal
[Forrás: Szakál Zoltán: Anyagismeret, Szakítóvizsgálat, Gödöllő, 2015]

2.5.3. Próbatétel kialakítás műanyagok esetében

Szakítóvizsgálatok céljára polimerek esetében téglalap keresztmetszetű próbatéteket alkalmaznak. A szabványos próbatétek az anyag típusától függően eltérő kialakításúak lehetnek, ez látható a 18. ábrán. Egy adott anyagtípusnál melyik típusú próbatéteket kell használni azt az ISO 527-es szabvány tartalmazza. Továbbá ad ajánlásokat, és pontos méreteket. Hőre lágyuló polimer anyagok esetében az A1 típusú fröccsöntött próbatéteket szokták alkalmazni. Amennyiben egy konkrét alkatrész anyagát szeretnénk jellemezni, akkor a próbatétel kimunkálható belőle forgácsolással is. pl.: 1B, 1BA, 1BB típusok. A polimer próbatétek általános jellegzetessége, hogy kutyacsont alakúak. Ez a kialakítás segít elkerülni, hogy a próbatétel a merev befogások közvetlen közelében szakadjon el.

Szakítóvizsgálat során a műanyagok esetében csak fröccsöntött, kivágott és forgácsolt próbatétek alkalmazhatók hivatalos vizsgálatra. A 3D nyomtatás még fiatal technológiának számít, amit jelenleg még nem tudunk alkalmazni szakítógépen történő hivatalos vizsgálatra.

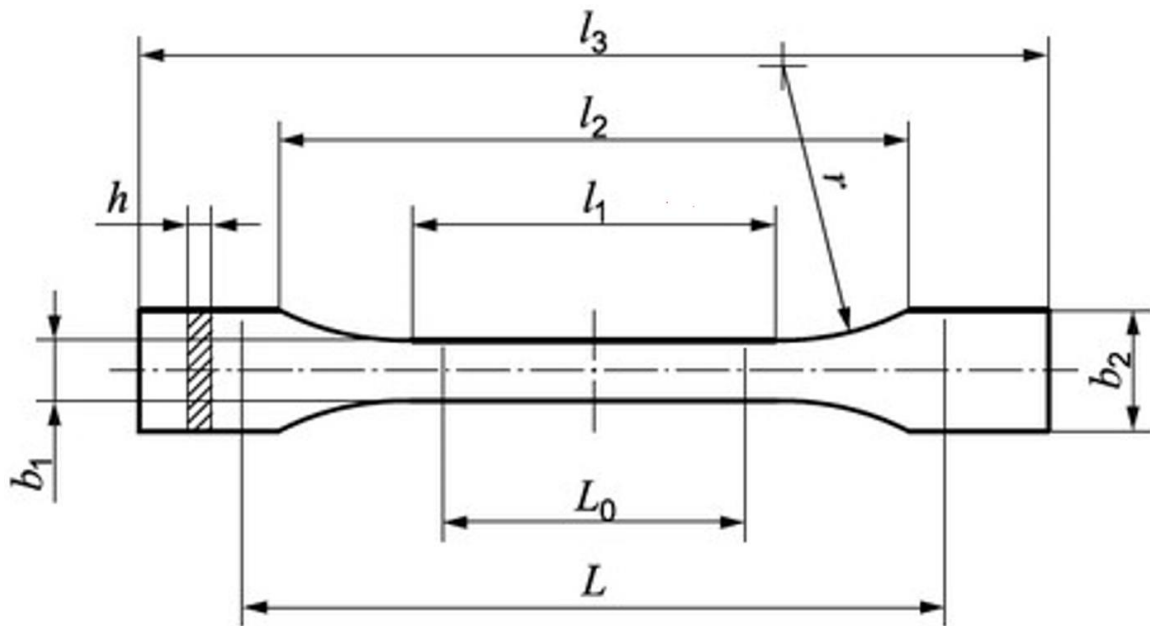


18. ábra: Polimer szakító próbatétek

[Forrás: BME: Szakítás, 2019.02.05. letöltve: 2023.06.30.]

2.5.4. A szabványos 1BA próbatest

A 19. ábrán a szabványnak megfelelő 1BA próbatest látható.



19. ábra: ISO 527 1BA próbatest jellemző adatai

[Forrás: https://www.researchgate.net/figure/Specimen-1BA-dimensions-BS-EN-ISO-5272012-Specimen-thickness-was-3mm_fig6_332817517, letöltve: 2023.06.30.]

1. táblázat: Az ISO 527 1BA próbatest adatainak megnevezése méretekkel

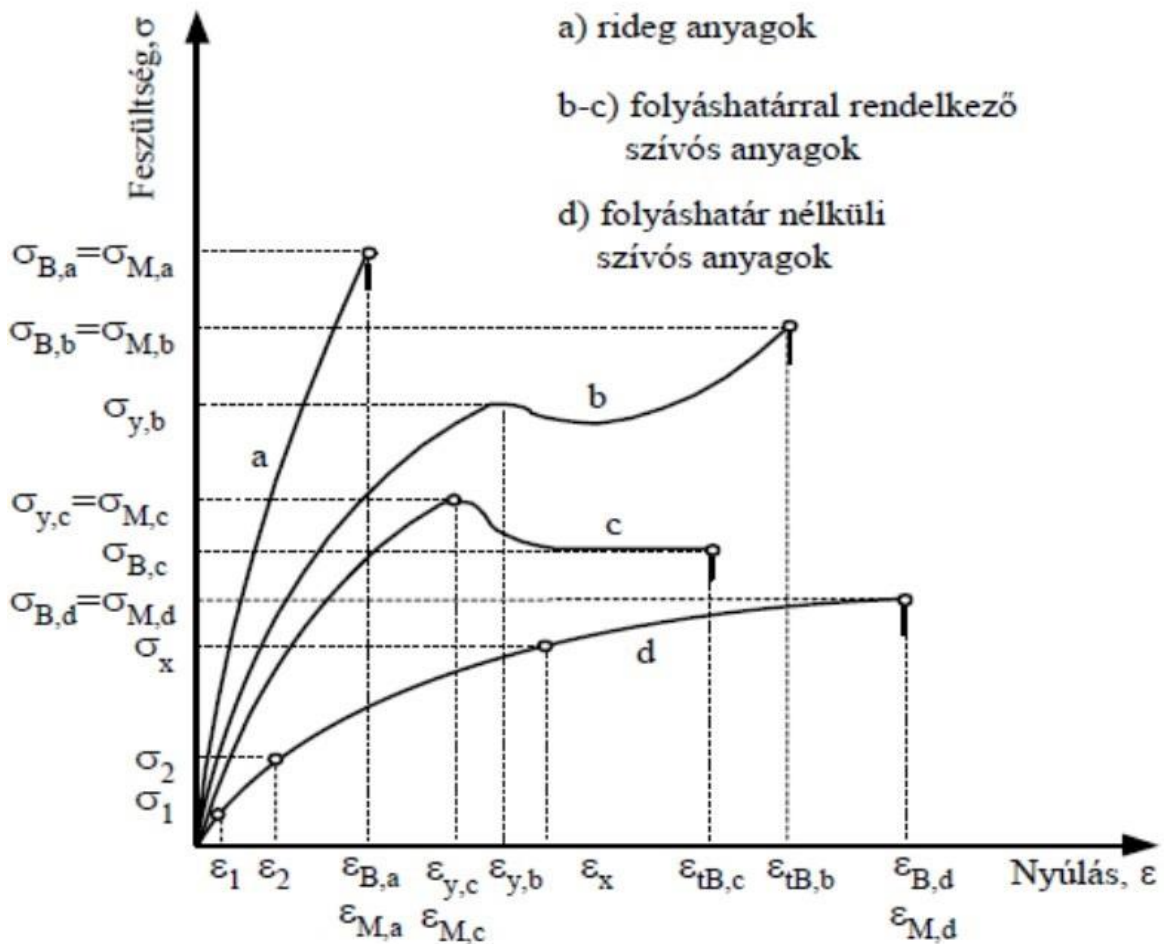
	Megnevezés	1BA
l_3	Teljes hossz:	≥ 75
l_1	Keskeny középső rész hossza:	$30,0 \pm 0,5$
r	Rádiusz:	≥ 30
l_2	Távolság a széles, rádiusz vastagabb részénél:	58 ± 2
b_2	Próbatest végén lévő szélesség:	$10,0 \pm 0,5$
b_1	Szélesség a keskeny részen:	$5,0 \pm 0,5$
h	Vastagság	≥ 2
L_0	Mérőhossz:	$25,0 \pm 0,5$
L	A befogó pofák közötti kezdeti távolság:	$l_2^{+2}_0$

A dimenziók [mm]-ben értendők.

2.5.5. Műanyagok szakítóvizsgálata

A műanyagok szakítóvizsgálata során különböző diagramokat tudunk felrajzolni, annak függvényében, hogy milyen tulajdonságokkal rendelkeznek az adott polimerek, amint az látható a 20. ábrán.

- a) **Rideg anyagok:** Hőre keményedők, vagy olyan hőre lágyuló polimerek, amelyeknél a képlékeny alakváltozás valamilyen oknál fogva korlátozott.
- b-c) **Folyáshatárral rendelkező szívós (képlékeny) anyagok:** Különböző hőre lágyuló amorf és részben kristályos polimerek.
- d) **Folyáshatár nélküli szívós (rugalmas) anyagok:** A felhasználás hőmérsékletén nagyfokú gumirugalmasságot tanúsító hőre lágyuló polimerek.



20. ábrára: Polimerekre vonatkozó szakítógörbék

[Forrás: Széchenyi István Egyetem, Dr. Hargitai Hajnalka, Polimerek anyagvizsgálata; letöltve: 2023.07.01.]

ahol:

σ : Húzófeszültség (az eredeti keresztmetszetre vonatkoztatva) [Mpa];

σ_y : Húzófeszültség megfolyáskor (folyáshatár);

σ_B : Szakítószilárdság (ahol a próbatest elszakad);

σ_M : Húzószilárdság (a legnagyobb húzófeszültség, amelyet a próbatest elvisel);

σ_x : Húzófeszültség x %-os nyúláskor;

ε : Nyúlás (a hosszúság megnövekedése az eredeti mérőhosszhoz viszonyítva);

ε_y : Nyúlás megfolyáskor;

ε_B : Szakadási nyúlás;

ε_M : Nyúlás a húzószilárdságnál;

ε_t : Névleges nyúlás (a hosszúság megnövekedése a pofák távolságához viszonyítva);

ε_{tB} : Névleges szakadási nyúlás;

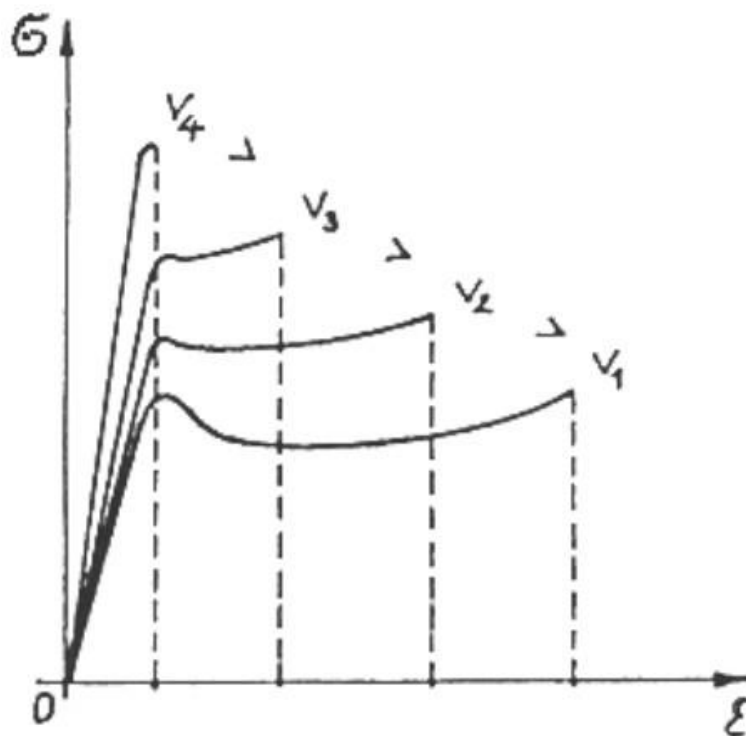
ε_{tM} : Névleges nyúlás a húzószilárdságnál.

2.5.6. Műanyagok mérési körülményei

A hőre lágyuló műanyagok szakító diagramját jelentősen befolyásolják az alábbi tényezők:

- A rugalmassági modulus;
- Folyáshatár;
- Az alakváltozási sebesség;
- A nedvességtartalom;
- Valamint a hőmérséklet.

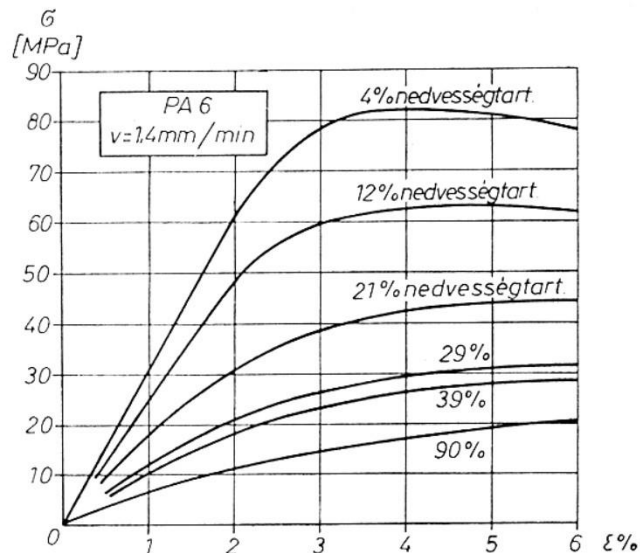
Nagyobb szakítási **sebességnél** a műanyag merevebben viselkedik, amely nagyobb szilárdsági értéket eredményez. A szakítási sebesség fémek esetében 1mm/perc, azonban a polimereknél 20-50, vagy akár nagyobb mm/perc is alkalmazható, 21. ábra. [15].



21. ábra: Polimerek szakítási görbéi különböző sebességgel a Feszültség és Nyúlás függvényében.

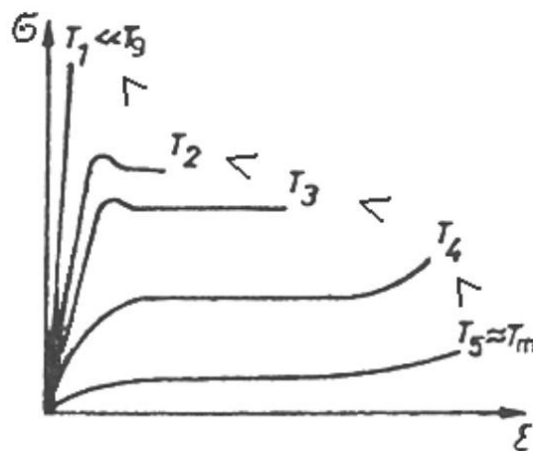
[Forrás: Széchenyi István Egyetem, Dr. Hargitai Hajnalka, Polimerek anyagvizsgálata; letöltve: 2023.07.01.]

Nedvességtartalom esetében vannak olyan polimerek, amelyek képesek a környezetből a nedvesség felvételére. Ezeket a polimereket hidrofil polimereknek nevezzük. A nedvességnek lágyító hatása van, azaz csökkenti a rugalmassági moduluszt, a szilárdságot és növeli a szakadási nyúlást, ez látható a 22. ábrán.



22. ábra: PA6 polimer szakítógörbéi különböző nedvességtartalom mellett
 [Forrás: BME: Szakítás, 2019.02.05. letöltve: 2023.06.30.]

Vizsgálati **hőmérséklet** esetében már kis hőmérsékletváltozás is jelentősen befolyásolja a merevséget, a szilárdságot, illetve a tönkremeneteli folyamat jellegét. A polimerek az üvegesedési átmenetük hőmérséklete alatt üvegszerű fizikai állapotban ridegen, míg felette a nagyrugalmasság fizikai állapotában szívósabban viselkednek és nagyobb a szakadási nyúlásuk, 23. ábra.



23. ábra: Polimerek szakítógörbéi különböző hőmérséklete.

[Forrás: Széchenyi István Egyetem, Dr. Hargitai Hajnalka, Polimerek anyagvizsgálata; letöltve: 2023.07.01.]

2.6. Szakítóvizsgálatból meghatározható mechanikai jellemzők

A szakítóvizsgálat során az erőt folyamatosan mérjük és regisztráljuk egészen a szakadásig. A próbatest megnyúlását legegyszerűbb esetben a szakítógépet által létrehozott elmozdulásból számolhatjuk. Ennél sokkal pontosabb eredményt kapunk, ha a próbatest középső részén az elmozdulást tapintóval, nyúlásmérő bélyeggel vagy optikai úton folyamatosan mérjük és regisztráljuk ennek a megváltozását.

A szakítóvizsgálat eredményeként megkapjuk az anyag erő-nyúlás ($F - \Delta l$) görbét. A műszaki életben általában ismerjük a fajlagos anyagjellemzőket. A szakítógörbét ennek megfelelően át lehet paraméterezni feszültség-relatív nyúlás ($\sigma - \varepsilon$) görbévé

A **feszültséget** a próbatest kiindulási keresztmetszetére vonatkoztatva megkapjuk, ha az erőt osztjuk a próbatest kiindulási keresztmetszetével.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]}$$

ahol:

- σ : az adott húzófeszültség [MPa];
- F : a mért vonatkozó erő [N];
- A_0 : a próbatest kiindulási keresztmetszete [mm].

A **relatív nyúlást** általában százalékban, vagy mértékegység nélkül fejezzük ki. Azaz azt mutatja meg, hogy a próbatest a mérés adott pillanatában éppen hány százalékkal hosszabb, mint terheletlen állapotban. A megnyúlást a próbatest eredeti hosszára (L_0) vonatkoztatva kapjuk a relatív deformációt.

Valamennyi nyúlásérték a mérőhosszra vonatkoztatva:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} * 100 = \frac{\Delta L_0}{L_0} \text{ [%]}$$

ahol:

- ε : az adott nyúlásérték, dimenzió nélküli viszonyszám vagy százalék;
- L_0 : a próbatest mérőhossza [mm];
- ΔL_0 : a próbatest hosszúságának növekedése a mérési jelek között [mm].

Névleges nyúlásértékek a befogópofák közötti eredeti távolságra vonatkoztatva:

$$\varepsilon_t = \frac{L - L_0}{L_0} * 100 = \frac{\Delta L_0}{L_0} [\%]$$

ahol:

- ε_t : a névleges nyúlás;
- L : a befogópofák közötti eredeti távolság [mm];
- ΔL : a befogópofák közötti távolság növekedése [m].

2.7. ISO 527-es szabvány

Az ISO 527-es szabványt a műanyagok szakító tulajdonságainak meghatározására hozták létre. Ez a szabvány általános elveket határoz meg a műanyagok és műanyag kompozitok szakítótulajdonságainak meglévő feltételek melletti meghatározására. A szabvány számos típusú próbatestet határoz meg. A módszert a próbatestek szakítószilárdságának vizsgálatára, valamint a szakítószilárdság, a húzó modulus és a húzó alakváltozás egyéb szempontjainak meghatározására használják meglévő feltételek mellett.

Az ISO 527-es szabványcsalád a következő részekből áll: [16].

I. ISO 527-1:

Műanyagokra vonatkozó általános alapelvek a szakító tulajdonságok definiálására. Ez a szabvány általános elveket határoz meg a műanyagok és műanyag kompozitok húzó tulajdonságainak meghatározott körülmények közötti értelmezéséhez.

II. ISO 527-2:

Vizsgálati körülmények műanyagok öntéséhez és extrudálásához Ez a szabvány az öntő- és extrudált műanyagok húzó tulajdonságainak meghatározására vonatkozó vizsgálati feltételeket fedi le az ISO 527-1-es szabványban megadott általános elvek alapján.

III. ISO 527-3:

A műanyag film és a műanyag lemez vizsgálati körülményei. Ez a szabvány meghatározza az 527 mm-nél kisebb vastagságú műanyag fóliák vagy lapok szakító tulajdonságainak meghatározásának feltételeit az ISO 527-1-es szabvány általános elvei alapján.

IV. ISO 527-4:

Izotróp és ortotróp szálerősítésű műanyag kompozitok vizsgálati körülményei. Ez a szabvány a meghatározott izotróp és ortotróp szálerősítésű műanyag kompozitok húzó tulajdonságainak értelmezésére vonatkozó vizsgálati feltételeket fogalmazza meg az ISO 527-1-es szabvány általános alapelvei szerint.

V. ISO 527-5:

Egyirányú szálerősítésű műanyag kompozitok vizsgálati körülményei. Ez a szabvány a meghatározza a vizsgálati feltételeket az egyirányú szálerősítésű műanyag kompozitok húzó tulajdonságainak definiálásához az ISO 527-1-es szabvány általános elvei alapján.

2.7.1. ISO 527-1: Az általános alapelvek és módszerek

A módszer szelektíven alkalmas a következő műanyagokhoz és kompozitokhoz.

- Merev és félmerev fröccsöntött anyagok, illetve extrudált és hőre lágyuló anyagok, beleértve a kitöltött és megerősített keverékeket, valamint a merev és félmerev hőre lágyuló műanyag lapok és fóliák;
- Kemény és félmerev hőre keményedő formázóanyagok, beleértve a kitöltött és megerősített keverékeket, továbbá a merev és félmerev hőre keményedő lapok és laminátumok;
- Szálerősítésű hőre keményedő anyagok és hőre lágyuló kompozitok, amelyek egyirányú vagy nem egyirányú erősítéseket tartalmaznak;
- Termotróp (hőmérsékleten) folyadékkristályos műanyagok.

Az ISO 527-1 szerint a műanyagok szakítóvizsgálatát úgy hajtják végre, hogy a próbadarabot egy fő hossz tengely mentén állandó megnyújtási sebességgel húzzák, amíg a műanyag minta meghibásodik, (azaz elszakad) vagy egy előre meghatározott feszültség illetve alakváltozás értékéig. A szabvány előírja, hogy a feszültség- és alakváltozási méréseket a műanyag szakítószilárdsági vizsgálaton keresztül rögzíteni kell. [16].

Tipikus jellemző értékek:

- Szakítófeszültség: a próbatest kezdeti keresztmetszetéhez viszonyított erő;
- Nyúlás: a próbatest hosszának változása a kezdeti méretekhez képest;
- Szakító modulus: a görbe gradiense a feszültség-nyúlás diagramban;
- Folyáshatár: a feszültség és alakváltozás a görbe azon pontjában, ahol a gradiens nulla;
- Töréspont: nyomás és feszültség a munkadarab törési pillanatában;
- Poisson tényező: a keresztirányú alakváltozás negatív aránya az tengelyirányú alakváltozáshoz képest.

Az alapelv:

A próbatestet a szakítógéppel a hossz tengelye mentén állandó sebességgel megnyújtjuk, amíg a próbatest el nem törik, vagy amíg a feszültség vagy a nyúlás el nem ér egy előre meghatározott értéket. A szakítási vizsgálat során mérendő a próbatest által elszenvedett terhelés és nyúlás. [16].

A módszer:

A módszereket olyan minták felhasználásával alkalmazzák, amelyek a kiválasztott méretekre formázhatóak, vagy kész és félkész termékekből, pl.: öntvényekből, laminátumokból, fóliákból és extrudált vagy öntött lapokból megmunkálhatók, vághatóak vagy lyukaszthatók. A próbatestek típusait és azok elkészítését az ISO 527-e szabványcsalád írja le. Egyes esetekben többcélú próbatest is használható. A többcélú és miniatürizált próbatesteket az ISO 20753 írja le.

A különböző módszerek meghatározzák a próbatestek méreteit. A különböző méretű vagy különböző körülmények között elkészített próbatesteken végzett vizsgálatok nem összehasonlítható eredményeket adhatnak. Más tényezők, mint pl.: vizsgálat sebessége és a nedvességtartalom szintén befolyásolhatják az eredményeket. Következésképpen, ha összehasonlítható adatokat szeretnénk, akkor ezeket a tényezőket gondosan kell ellenőrizni és rögzíteni. [16].

2.7.2. Berendezés: Szakítógépj

A szakítógépjnek meg kell felelnie az ISO 7500-1 és ISO 953 szabványoknak, valamint az alábbi feltételeknek: [16].

Szakítósebesség:

A szakítógépjnek képesnek kell lennie az 1. táblázatban meghatározott vizsgálati sebességek fenntartására.

2. Táblázat: Ajánlott szakítási sebességek

szakítósebesség: $v = \frac{mm}{min}$	tolerancia: %
0,125	±20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	
20	±10
50	
100	
200	
300	
500	

Befogó pofák:

A próbatestek tartására szolgáló befogópofákat úgy kell a géphez rögzíteni, hogy a próbatestek fő tengelye egybeessen a befogópofák középvonalán keresztüli nyúlás/húzás irányával. A próbatesteket úgy kell befogni, hogy a befogópofákhoz képest nem csússzon el. A befogórendszer nem okozhat idő előtti törést a pofáknál vagy a próbatest összenyomódását a befogópofákban. A Young-modulus meghatározásához elengedhetetlen, hogy az húzási sebesség állandó legyen, és ne változzon például a befogópofákban való mozgás miatt.

Erőmérő:

Az erőmérőnek meg kell felelnie az ISO 9513:1999 szabvány 1. osztályának. Ennek az osztálynak a pontosságát abban a nyúlási tartományban kell elérni, amelyen a méréseket végzik. Az erőmérőnek alkalmasnak kell lennie arra, hogy a vizsgálat során bármikor meghatározza a próbatest deformálódásához szükséges erőt. Kívánatos, de nem elengedhetetlen, hogy az erőmérő műszer ezeket a változásokat automatikusan rögzítse. A húzási rugalmassági modulus (Young-modulus) pontos meghatározásához olyan műszert kell alkalmazni, amely képes mérni a mérőhossz változását a vonatkozó érték 1%-ának megfelelő vagy annál nagyobb pontossággal.

Nyúlásmérő:

A próbatestek hosszirányú nyúlásmérővel is felszerelhetők, amelyek pontossága a vonatkozó érték 1%-a vagy annál jobb.

Adatok rögzítése:

Az adatok rögzítéséhez szükséges adatgyűjtési gyakoriságnak (erő, feszültség, nyúlás) kellően magasnak kell lennie ahhoz, hogy a pontossági követelményeknek megfeleljenek.

Az alakváltozási adatok rögzítése:

Az alakváltozási adatok rögzítésének adatgyűjtési gyakorisága a vizsgálati szakítósebességtől, a próbatest hosszától és a kezdeti befogó pofák közötti távolság arányától, illetve a minél kisebb mértékre felbontott alakváltozási jel gyűjtése.

Erőadatok rögzítése:

Az erőadatok rögzítése a vizsgálati sebességtől, a nyúlási tartománytól, a pontosságtól és a megfogási távolságtól függ. Az erő növekedési sebességének és a szükséges pontosságának az aránya határozza meg a rögzítési gyakoriságot. [16].

2.7.3. Próbatestek kialakítása és a teszt eljárása

Mérési jelek:

Ha optikai extenzométert használnak, különösen vékony lemezek és filmek esetében, akkor szükséges lehet a próbatesten lévő mérőjelekre a mérőhossz meghatározásához. Ezeknek egyenlő távolságra kell lenniük a felezőponttól (± 1 mm), és a próbatest hosszát 1%-os vagy jobb pontossággal kell mérni. A mérőjeleket semmilyen módon nem szabad megkarcolni, lyukasztani vagy rányomni a próbatestre, ami károsíthatja a vizsgált anyagot.

A próbatestek ellenőrzése:

Ideális esetben a próbatesteknek csavarodás mentesnek kell lenniük és egymásra merőleges és párhuzamos felületpárokkal kell rendelkezniük. A felületnek és élnek mentesnek kell lenniük a karcolásoktól, repedésektől, gödröcskéktől, süllyedésnyomoktól és sorjáktól.

Ellenőrizni kell, hogy a próbatestek megfelelnek-e ezeknek a követelményeknek akár szemrevételezéssel, szintező léccel, derékszögvel, illetve tolómérővel.

A próbatestek száma

Minden előírt vizsgálathoz legalább öt próbatestek kell megvizsgálni. A mérések száma ötnél több is lehet, ha az átlagértékek nagyobb pontossága szükséges. Azokat a próbatestek, amelyek eltörnek, vagy elcsúsznak a befogópofákban, félre kell tenni és további próbatesteket kell megvizsgálni.

Körülmények

A próbatesteket az érintett anyagra vonatkozó szabvány előírásai szerint kell kondicionálni és tárolni. Az előnyben részesített légkör (23 ± 2) °C és (50 ± 10) % relatív páratartalom.

A teszt körülmények:

A vizsgálatot célszerű ugyanabban a környezetben vizsgálni, mint ahol a próbatest kondicionálása történik. [16].

A próbatest méretei:

Az egyes próbatestek szélességére és vastagságára vonatkozó minimális és maximális értékeket a próbatest közepén és a mérőhossz mindkét végén 5 mm-en belül kell rögzíteni ügyelve arra, hogy az adott anyagra vonatkozó szabványban megadott tűréshatárokon belül kell lenni. Többrétegű formák esetében ügyelni kell arra, hogy a próbatestek méretei ne térjenek el $\pm 0,25\%$ -nál nagyobb mértékben az üregek között.

Befogás:

A próbatesteket úgy kell a befogó pofák közé helyezni, hogy a próbatest hossz tengelye igazodjon a befogó pofák tengelyével. Egyenletesen kell beszorítani a próbatestet, úgy, hogy a próbatest ne tudjon elmozdulni a vizsgálat során. A megfogás nem okozhatja a próbatest törését vagy összenyomódását.

Előfeszítés:

A próbatestet nem szabad jelentősen megfeszíteni a vizsgálat előtt. Befogáskor jelentkező feszültségek lehetnek a befogó pofák közötti nyomás vagy húzás, különösen kevésbé merev anyagok esetén. Ha az előfeszítés beállításához szükséges Young-modulus nem ismert, előzetes méréseket kell végezni ezen érték becsléséhez.

Nyúlásmérés:

A Poisson-tényező mérésére két nyúlás- vagy alakváltozás mérő eszközt kell felszerelni, amelyek a hossz- és a keresztirányú tengelyben egyidejűleg működnek. A nyúlásmérőket szimmetrikusan kell felhelyezni a próbatest középvonalán. Az optikai mérés esetén mérőjeleket kell felhelyezni a próbatestre.

A szakítási sebesség:

Be kell állítani a vizsgálati szakítósebességet az adott anyagra vonatkozó megfelelő szabvány szerint. A különböző sebességek alkalmazása lehetségessé teszi a különböző tulajdonságú diagramok meghatározását, mint pl.: folyáshatár, Young-modulus, feszültség diagram stb.

Adatok rögzítése:

A vizsgálat során mérni és jegyezni kell az erőt és a próbatest hosszának megnövekedésének változását. [16].

2.8. Az anyag tulajdonsága

Izotrópia:

Egy anyagot akkor mondunk izotróp testnek, ha az anyagjellemzők minden pontban azonosak és az anyagjellemzők nem függenek az iránytól. Az anyag izotróp jellege annak kristályszerkezetétől függ. Az izotróp anyagok egyedülálló értékeket képviselnek az anyag tulajdonságaihoz, pl.: sűrűséghez, a rugalmassági modulusához, a hőtágulási együtthatóhoz, a Poisson-tényezőhöz, a csillapításhoz, erőhöz, stb... Ilyen anyagnak tekintjük a fémek többségét és az üveget is. [17].

Anizotrópia:

Az anyag azon tulajdonsága, amely lehetővé teszi számára, hogy különböző irányokba változzon, vagy eltérő tulajdonságokat vegyen fel. Olyan anyagokra utal, amelyeknek atomrendszerei irányfüggők, azaz a fizikai tulajdonságok az anyag különböző irányai mentén változnak. A fa és a kompozit anyagok, esetünkben a 3D nyomtatott műanyagok bizonyos irányokban nagyobb szilárdságot mutatnak.

A mechanikai modellalkotás folyamata:

Ahhoz, hogy a műszaki alkotások, szerkezetek mechanikai viselkedését leírhassuk, nem elegendő *egy* modellt létrehozni. Másképp: a mechanikai modell részmodellek összessége. Egy szerkezetet terhelések érnek, ezeket el kell viselnie, valamilyen anyagból készül, a rendeltetésszerű használata csak valamilyen határterhelésig lehetséges, van valamilyen alakja, szerkezeti felépítése. Ennek megfelelően a mechanikai modell megalkotásához többféle részmodellt kell létrehozni, és ezek együttese alkotja a mechanikai modellt:

- terhelési modell;
- anyagmodell;
- tönkremeneteli modell;
- szerkezeti modell.

Végül a mechanikai modellt azért hozzuk létre, hogy annak viselkedéséből következtetéseket vonjunk le.

A felsorolt részmodellek azonban nem választhatók szét teljes egészében. Egymásra hatással vannak. A szerkezet rendeltetése, kialakítása hat a geometriára, de az anyag vagy

terhelés megválasztása meghatározhatja a tönkremeneteli modellt, azaz azt a méretezési elvet, amelyet használni kívánunk. Végül az alkalmazni kívánt számítási módszer és méretezési elv is hatással van egymásra.

Anyagmodell:

A rugalmassági lapegyenletek három csoportra bonthatók. Az *egyensúlyi egyenletek* az \mathbf{F} feszültségtenzor koordinátái közötti kapcsolatot határozzák meg. A folytonossági vagy *geometriai egyenletek* az \mathbf{A} alakváltozási tenzor és a \mathbf{t} elmozdulási vektor között létesítenek kapcsolatot. Ez a két egyenletcsoport minden nyugalomban lévő, folytonosnak modellezhető deformálható testre igaz. A harmadik egyenletcsoport, az *anyagegyenletek* az \mathbf{A} alakváltozási és \mathbf{F} feszültségi tenzor-mező koordinátái között teremtenek kapcsolatot.

Anyagszerkezeti modell:

A legtöbb anyagmodell homogénnek tekinti az anyagot, bár annak mikroszerkezete közel sem az. Mégis, a tapasztalat azt mutatja, hogy ez a modell igen sok esetben jó eredményeket ad a valósággal való összevetéskor az egész szerkezet viselkedésére vonatkozóan. Homogén anyagmodell használható nem csak az acéloknál általában, de kompozitok (műanyagok) egy részénél is, ahol pedig akár hosszú, akár rövid szálakban a homogenitást megzavaró erősítők helyezkednek el az anyagban. Ez vonatkozik a szálerősítő műanyagokra, de akár a vasbeton anyagára is. Eloszlásuk egyenletes, így a homogén anyagmodell jó közelítést jelent. Ugyanez a helyzet a faanyagoknál, amelyeknél még nyilvánvalóbb az anyag szerkezeti inhomogenitása. [17].

Lineárisan rugalmas anizotrop anyagmodellek:

Az elemi szilárdságtanban általában izotrop anyagmodellt használunk, ami azt jelenti, hogy az anyag viselkedése a testhez kötött koordinátarendszerhez viszonyított valamennyi irányban azonos. Lineárisan rugalmas, izotrop anyagmodellt az általános Hooke.-törvény írja le.

$$\mathbf{F} = 2G \left[\mathbf{A} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} A_1 \mathbf{E} \right]$$

Ez összesen két, egymástól független anyagállandót tartalmaz, azaz a feszültségi és az alakváltozási állapot kapcsolatát az adott anyag két jellemzőjével le tudjuk írni. Anizotrop anyag esetén a legáltalánosabb esetben mind a feszültségi, mind az alakváltozási állapotot hat-hat adat határozza meg. Tekintettel arra, hogy az anyagot lineárisan rugalmasnak

modellezzük, minden egyes alakváltozási koordináta általánosan a hat feszültségkoordináta lineáris, homogén függvénye lehet. Ez azt jelenti, hogy hat konstanssal adhatjuk meg a függvénykapcsolatot, mivel terheletlen állapothoz alakváltozási-mentes állapotot feltételezünk. Valamennyi alakváltozási koordinátára ezt felírva, harminchat egymástól független állandóval írhatjuk le a keresett kapcsolatot. Feszültségi, ill. alakváltozási *állapotvektorok*:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z; \tau_{xy}; \tau_{xz}; \tau_{yz}], \quad \boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x; \varepsilon_y; \varepsilon_z; \gamma_{xy}; \gamma_{xz}; \gamma_{yz}]$$

E $\boldsymbol{\varepsilon}$ vektort a $\boldsymbol{\sigma}$ vektorba egy hatszoros hatos mátrix transzformálhatja:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}$$

ahol \mathbf{C} az anyagállandó mátrix:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix}$$

Az energia skalármennyiség voltának felhasználásával is kimutatható, hogy a \mathbf{C} mátrixnak szimmetrikusnak kell lennie. Tehát a \mathbf{C} -t huszonegy egymástól független adat határozza meg. Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a homogén lineárisan rugalmas anizotrop anyagmodellt általánosságban huszonegy anyagállandóval írhatjuk le.

Az általános Hooke-törvényt skalár összefüggések formájában felírva, és G , E , ν közötti ismert kapcsolatot használva:

$$\sigma_x = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)], \quad \tau_{xy} = G\gamma_{xy};$$

$$\sigma_y = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)], \quad \tau_{xz} = G\gamma_{xz};$$

$$\sigma_z = \frac{2G}{1-2\nu} [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)], \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}.$$

A korábban meghatározott leírást figyelembe véve a \mathbf{C} mátrix könnyen láthatóan az alábbi alakú lesz:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5 - \nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 - \nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 - \nu \end{bmatrix}$$

Az anizotrop anyagokat nem lehet és főleg nem is érdemes általánosan anizotropnak modellezni. Elsősorban azért, mert a leíráshoz szükséges anyagállandók meghatározása nem végezhető el kellő pontossággal. Ezt a mérési módszerek pontossága sem teszi lehetővé, de ha „pontosan” meglehetne mérni az anyagállandókat, az esetek nagy részében akkor sem lenne pontosabb a leírás, mivel az anyag létező inhomogenitása és az anizotrópia változása ezt nem tenné lehetővé.

A szokásos anizotrop anyagmodell az ortogónálisan anizotrop, röviden szólva ortotrop anyagmodell. Ebben az esetben feltételezzük, hogy három, kölcsönösen egymásra merőleges irányban, az anyagi főirányokban, különböznek egymástól az anyagállandók. A kompozitok (műanyagok) anyagtulajdonságait közelítjük ilyen anyagmodellel. Az ilyen anyagmodell \mathbf{C} anyagállandó mátrixban nullától különböző elemek csak ott vannak, ahol a korábban leírt mátrixban. A mátrix szimmetrikus volta miatt az összesen *kilenc egymástól különböző anyagállandót* jelenthet. [17].

3. 3D nyomtatott próbatestek méretezése és vizsgálata

3.1. Mérési terv:

- Szabványos ISO 527 1BA próbatest kialakítása 3D tervezőkörnyezetben;
- Az elkészült próbatest beimportálása a szeletelő szoftverbe;
- A szeletelő szoftver paramétereinek a beállítása a vizsgálathoz szükséges értékekkel:
 - 2 db főiránynak megfelelő nyomtatás előkészítése;
 - A különböző hőmérsékletek beállítása;
- A próbatestek felszeletelése és G-kóddá alakítása a 3D nyomtató számára;
- A próbatestek kinyomtatása 3D nyomtatóval;
- A próbatestek dokumentálása orientációnként és hőmérsékletenként fotózással;
- A próbatesteken a jeltávolság bejelölése;
- A próbatestek befogása a szakítógépre, ha van nyúlásmérő elhelyezése;
- A próbatestek elszakítása a megadott paraméterekkel és azok rögzítése;
- Az elszakadt próbatestek dokumentálása orientációnként fotózással együtt;
- A filament szálak befogása a szakítógépre;
- A filamentek elszakítása a megadott paraméterekkel és azok rögzítése;
- Az elszakadt filamentek dokumentálása és fotózása;
- A szakítási diagramok elkészítése és lementése majd feldolgozása;
- A mért paraméterek által kiszámolni a szakítószilárdságot, valamint a hozzájuk tartozó nyúlást az összes próbatestnél és filamentnél;
- A számított értékek alapján meghatározni a szakítószilárdságok, illetve a nyúlások szórását;
- Hőfokonkénti szakítószilárdságok összehasonlítása;
- Következtetések levonása;
- Összegzés meghatározása.

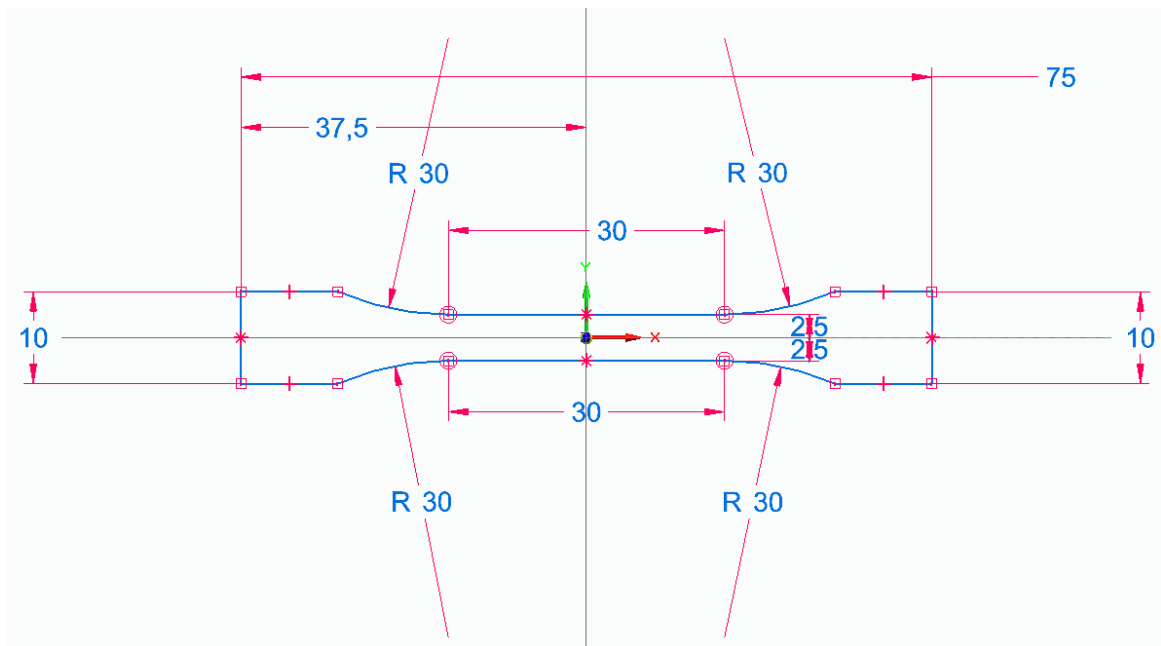
3.2. A 3D próbatest modelljének elkészítése

Az ISO 527-es szabvány által előírt próbatestet a SolidEdge 2020-as 3D-s CAD/CAM/CAE tervező szoftverrel rajzolom meg. A program számos kényelmi funkcióval rendelkezik a modellek megtervezéséhez. A szoftver a felhasználónak a modelltörténeten alapuló, alaksajátosságokkal rendelkező, parametrikus modellezést tesz lehetővé.

Első lépésként a szabvány által előírt méretekkel rajzolom meg az 1BA próbatestet. A választásom azért erre a próbatestre esik, mivel ez a próbatest a 75 mm-es hosszával és 2 mm-es magasságával, valamint átlagos 7,5 mm-es szélességével negyedóra kinyomtatási idővel rendelkezik. Továbbá a nyomtatási idő kulcsfontosságú a 3D nyomtatás során, ami nagyban megnehezíti a termelékenységet. A szabványban 9 db próbatestet határoztak meg, amelyek különböző alakúak és méretűek. Többségük kutyacsont alakú, a 2-es próbatest azonban téglalap alakú. A fémekhez hasonló méretekkel rendelkező próbatestek kinyomtatási ideje körülbelül 50 perc és 1 óra közé tehető. Ez az oka annak, hogy kisebb méretekkel rendelkező próbatestet választok. A szakítási vizsgálatok során az anyag mechanikai tulajdonságai számítanak, nem pedig a próbatest mérete, így ez a választás egyben rövidebb nyomtatási időt eredményez, kevesebb áramot és kevesebb filamentet is.

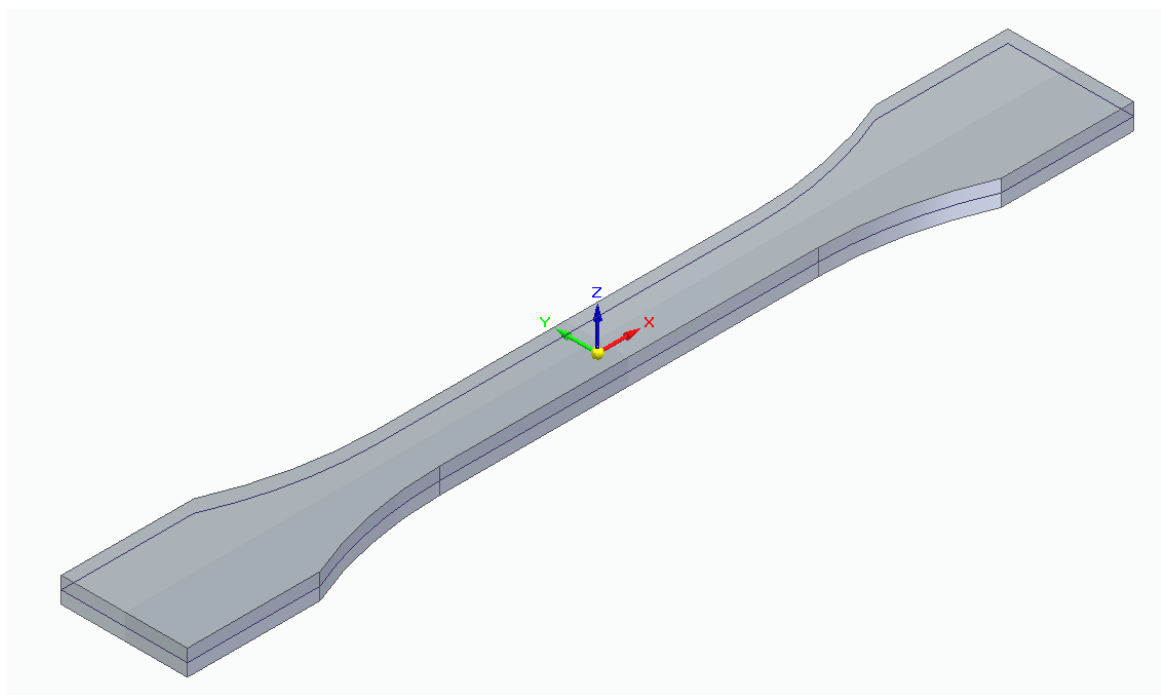
Az általam rajzolt próbatest létrehozásának a menete:

- a) A program elindítása után a „New” fülön az „ISO Metric Part” kiválasztása.
- b) A referencia síkokat láthatóvá teszem, hogy a tervezés orientációt figyelemmel tudjam kísérni, valamint a testet el tudjam helyezni a térben.
- c) Ezután az XY sík kiválasztásával egy új vázlatot (New Sketch-et) hozok létre.
- d) A vetület megrajzolása, majd a méretek megadása a szabványból, valamint szükség esetén a kényszer kapcsolatok (merőlegesség, párhuzamosság stb.) megadása.
- e) Ezután az Extrude paranccsal ki kell „húzni” a próbatestet az XY síkra merőlegesen a megadott magassággal.
- f) Legenerálva a próbatest elkészül. A kész modellt exportálni kell STL formátumba, mivel a szeletelő program ezzel a fájlformátummal tudja létrehozni a 3D nyomtatóhoz szükséges vezérlő G-kódot.



24. ábra: Az IBA próbatest tervezése az ISO 527-es szabvány szerint SolidEdge 2020-as környezetben

[Forrás: A szerző saját készítése, 2023.06.04.]



25. ábra: AZ IBA próbatest axonometrikus nézete SolidEdge 2020-as környezetben

[Forrás: A szerző saját készítése, 2023.06.04.]

3.3. Geeetech A20M 3D nyomtató bemutatása

A számomra rendelkezésre álló 3D nyomtató márkája és típusa a Geeetech A20M, amely a Shenzhen Getech Technology CO., LTD kínai gyártó terméke. Ez egy innovatív, technológia-orientált vállalkozás, amely a 3D nyomtatók és a 3D alkatrészeinek kutatás-fejlesztésére, gyártására és értékesítésére szakosodott. A Geeetech teljes gyártási rendszert és szigorú minőségirányítási rendszert alakított ki, és számos CE, FCC, ROHS tanúsítvánnyal rendelkezik. Termékeinek megbízható és stabil minőségeivel, valamint teljesítményeivel széles körben elismertek a piacon. A Geeetech 2011-es alapítása óta az egyik legjelentősebb feltörekvő csillag a 3D nyomtatás területén Kínában, valamint a világon is. A Geeetech támogatja a 3D nyomtatás egyszerűvé és gazdaságossá tételét a világ minden táján. A Geeetech A20M egy kettős extrudálású 3D nyomtató egyetlen fűvókával és nagy nyomtatási térfogattal. Ez a termék különböző weboldalakon található információk szerint 250-280 USD körüli árával viszonylag olcsó kategóriájú 3D nyomtatók közé tehető. A technikai jellemzői a következők: [18];[19].

❖ Nyomtatási paraméter:

- Nyomtatási technológia: FDM;
- Nyomtatási tér: 255x255x255 [mm³];
- Nyomtatási pontosság: 01~02 [mm];
- Pozícionálási pontosság: X/Y: 0,011 [mm], Z: 0,0025 [mm];
- Maximális nyomtatási sebesség: 180 [mm/s];
- Fűvóka: 2 az 1-ben fűvóka;
- Fűvóka átmérő: 0,4 [mm];
- Bevezetett filament átmérő: 1,75 [mm];
- Filament: PLA/ABS/PETG/HIPS/PVA/wood-polymer.

❖ Hőmérsékleti paraméterek:

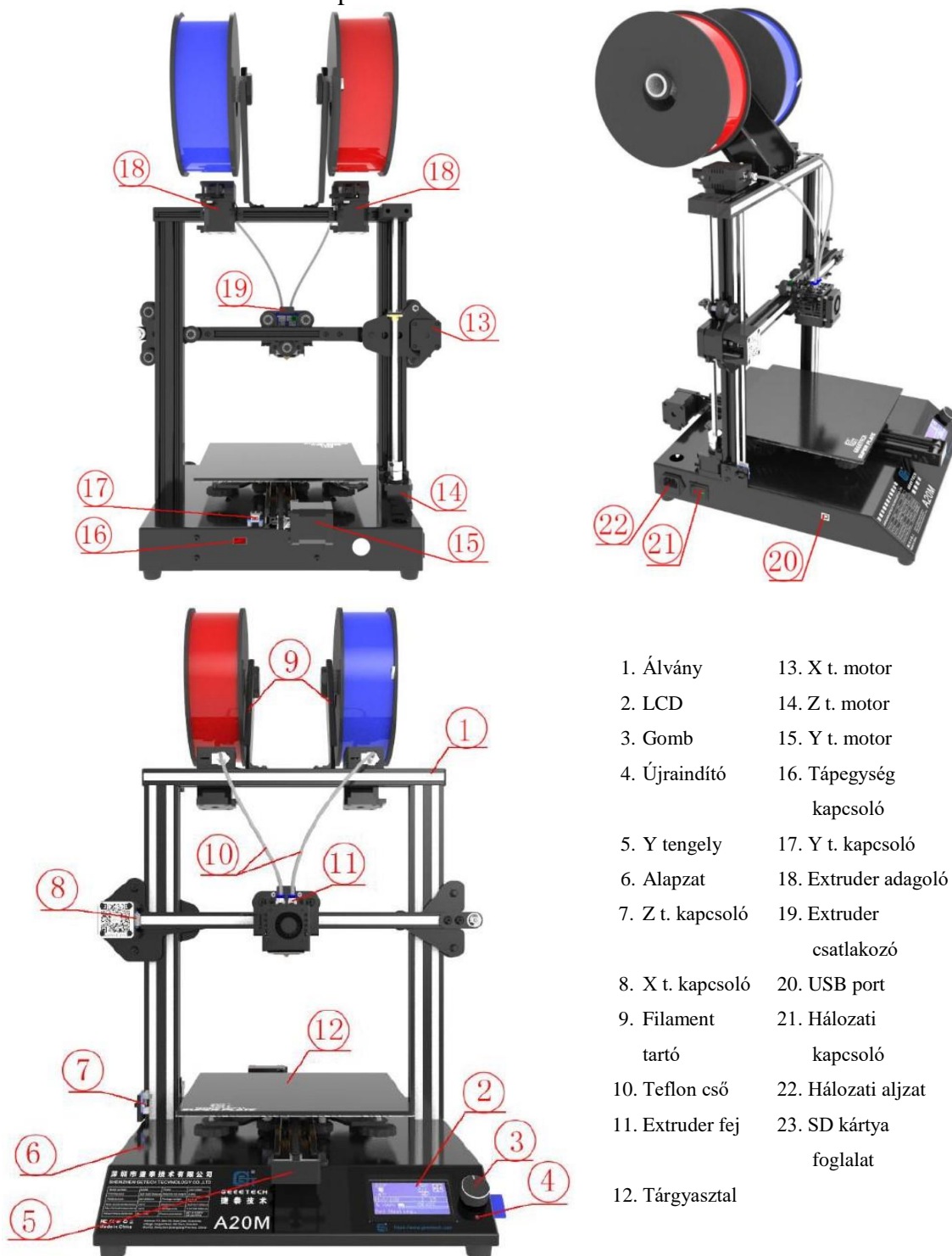
- Környezeti hőmérséklet: 10 °C ~ 40 °C;
- Fűvóka maximális hőmérséklete: 250 °C;
- Tárgasztal maximális hőmérséklete: 100 °C.

❖ Mechanikai paraméterek:

- Nyomtató befoglaló méretei: 442x447x480 [mm³];
- Nettó tömeg: 8,8 [kg];

❖ Elektromos paraméterek:

- Bemeneti feszültség: 115 [V] vagy 230 [V];
- Teljesítmény: DC24 [V], 360 [W];
- Csatlakozási lehetőség: mikor SD kártya vagy USB;
- LCD panel: LCD 12864.



- | | |
|------------------|-----------------------------|
| 1. Álvány | 13. X t. motor |
| 2. LCD | 14. Z t. motor |
| 3. Gomb | 15. Y t. motor |
| 4. Újraindító | 16. Tápegység kapcsoló |
| 5. Y tengely | 17. Y t. kapcsoló |
| 6. Alapzat | 18. Extruder adagoló |
| 7. Z t. kapcsoló | 19. Extruder csatlakozó |
| 8. X t. kapcsoló | 20. USB port |
| 9. Filament | 21. Hálózati tartó kapcsoló |
| 10. Teflon cső | 22. Hálózati aljzat |
| 11. Extruder fej | 23. SD kártya foglalat |
| 12. Tárgyasztal | |

26. ábra: Geeetech A20M 3D nyomtató hátoldáról, oldalról és szemből
 [Forrás: Geeetech A20M 3D Printer, User Manual, letöltve: 2023.10.24.]

3.3.1. Geeetech A20M 3D nyomató működése

A 3D nyomtató működése egyszerű folyamat. Az X, Y és Z irányokban történő mozgást, valamint az alapanyag adagolását léptető motorok végzik. X és Y irányokban a mozgást bordás szíjjal, Z irányban pedig menetes orsóval valósítják meg. Az extruder fej (11) X irányban képes mozogni az állványon, míg maga a tárgyasztal (12) Y irányban végzi a mozgást. Z irányt az állvány középső vízszintes tartója végzi. Mindhárom irányban egy-egy végállás kapcsoló helyezkedik el (7, 8, 17), amivel a 0, 0, 0 pozíciót érzékeli a készülék. Az alapanyagot egy léptető motor (18) egy fogaskerék segítségével továbbítja a megfelelő mennyiségben az extruder fejbe (11). A filament szál az alapanyag adagoló és az extruder fej között egy merevebb teflon PTFE csőben halad, hogy az adagoló toló hatása a fűvókánál is érvényesüljön. Az extruder fej (11) egy ventilátorral rendelkezik, amely a kinyomtatott filament hűtésére szolgál. Elektronikusan az alaplap (2) össze van kötve az öt léptetőmotorral, a három végállás kapcsolóval, a tárgyasztal (12) hőmérséklet érzékelőjével, illetve az extruder fej (11) hőmérséklet érzékelőjével. A nyomtatási felület (11) egy hajlékony, az egyik oldalán permanens mágnessel ellátott PEI (poli-éterimid) lap, amely egy porbevonatos felülettel rendelkezik, így a reá nyomtatott műanyag könnyebben tapad meg, és könnyebben válik le is.

A 3D nyomtató a következő alap feladatokat tudja ellátni:

- Felfűti a tálcát a megadott hőmérsékletre;
- Eközben felfűti az extruder fejet is a megadott hőmérsékletre;
- Elmozgatja az extruder fejet X, Y és Z irányban, és esetleg közben;
- Kiprésel adott mennyiségű olvadt filamentet;
- A fej hűtőventilátorát 0-100 % közötti fordulatszámom működteti.

A készülék vezérlőegysége (2) az alapfeladatok vezérlésén túl felelős még a felhasználók felé történő kommunikációért, beleértve az USB csatlakozón keresztül a számítógépről érkező program folyamatos fogadását, vagy az adatkártyán érkező program fogadását és értelmezést, valamint a közvetlen vezérlő gombról (3) érkező utasítások értelmezését, végrehajtását és azok információk megjelenítését a kijelzőn (2). Ez a kis felbontású, néhány soros kijelző csak arra szolgál, hogy ki lehessen választani az adathordozóról a megfelelő kinyomtatandó állományt, illetve, elindítani/ szüneteltetni/ megállítani a nyomtatást, felfűteni a tárgyasztalt, a fejet, valamint mozgatni a fejet bármilyen irányban. [20].

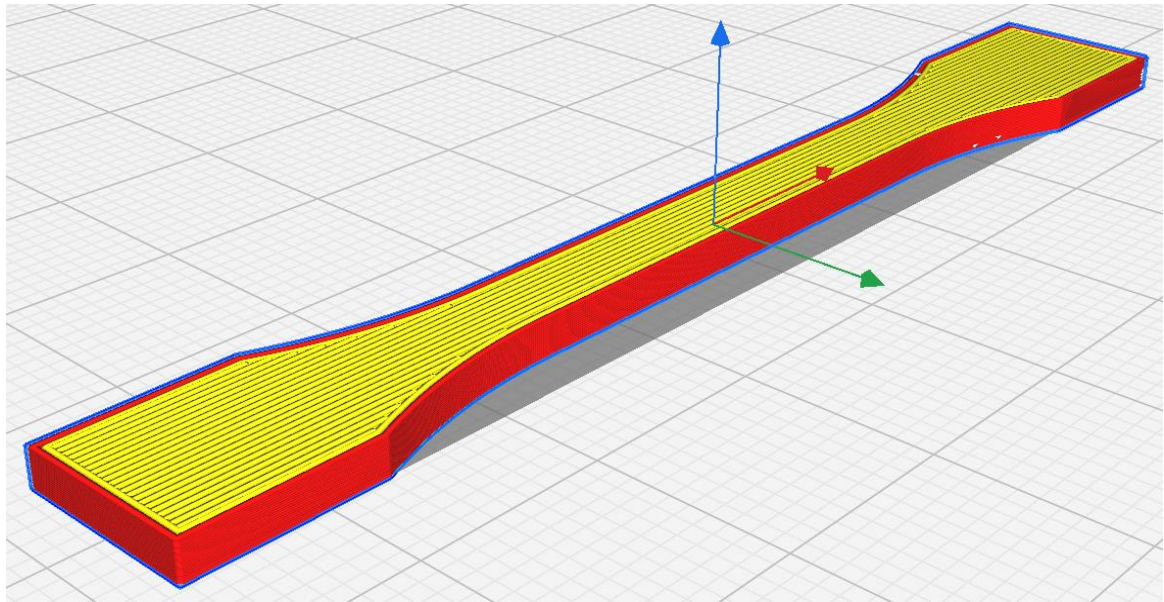
3.4. A CURA szeletelő program

Miután végeztem az IBA próbatest megtervezésével és STL fájlformátum lementésével, nem maradt más, minthogy a kész próbatestet beimportáljam az általam választott, valamint az internet által leggyakrabban ajánlott szeletelő szoftverbe, az UltiMaker CURA 5.3.1 verzióba. A CURA egy nyílt forráskódú szeletelő szoftver 3D nyomtatókhoz.

A beimportálás után érdemes beállítani a szoftverben, hogy milyen 3D nyomtatóval rendelkezünk, mivel a szoftver memóriája számos 3D nyomtatóval rendelkezik, amelyek különböző méretűek és kialakításúak és nem mindegy, hogy mekkora nyomtatási területtel rendelkeznek. A programban kiválasztottam a korábban bemutatott 3D nyomtatót, a Geeetech A20M 3D Printert.

Beimportált modellt elhelyeztem a munkatér közepére, a 27. ábra szerint. A rétegvastagságot beállítottam „Fine” értékre, amely 0,1 [mm]-es rétegvastagságot eredményez, így a 2 [mm]-es magasságú modellt 20 egyenlő részre osztotta fel. A „Walls” fülön a falak számát lecsökkentettem 1-re. A Z irányú varratot, azaz minden egyes síkot elkezdő nyomtatási varratot véletlenszerű elhelyezésre állítottam be, hogy a varratok kialakításának összpontosítása ne gyengítse az adott keresztmetszetet, A „Top/Bottom” fülön az alsó/felső mintázatra, valamint az alsó kezdő réteg mintázatára „Line”, azaz egyenes vonalazást állítottam be. Továbbá az alsó/felső vonal irányának 90 °-os értéket állítottam be. Ugyanez az eljárás szerint állítottam be az „Infill”, azaz a kitöltés fülön a kitöltési mintát, ami úgyszintén vonalazásra van beállítva, valamint a kitöltési vonal irányok 90°-ok értékkel rendelkeznek. Ennek a beállítási paraméternek köszönhetően a nyomtatás iránya a próba testel párhuzamos lesz. A tárgyasztal hőmérsékletét 60 °C-ra állítottam be. A többi beállítási lehetőséget azon az értéken hagytam, amelyeket a szoftver automatikusan beállított. Végül a kitöltés sűrűségét felvettem 100 %-ra, hogy a vizsgálatot egy közel tömör anyagon végezhessem el. Nyomtatás sebessége: 60 [mm/s], hűtése 100 %.

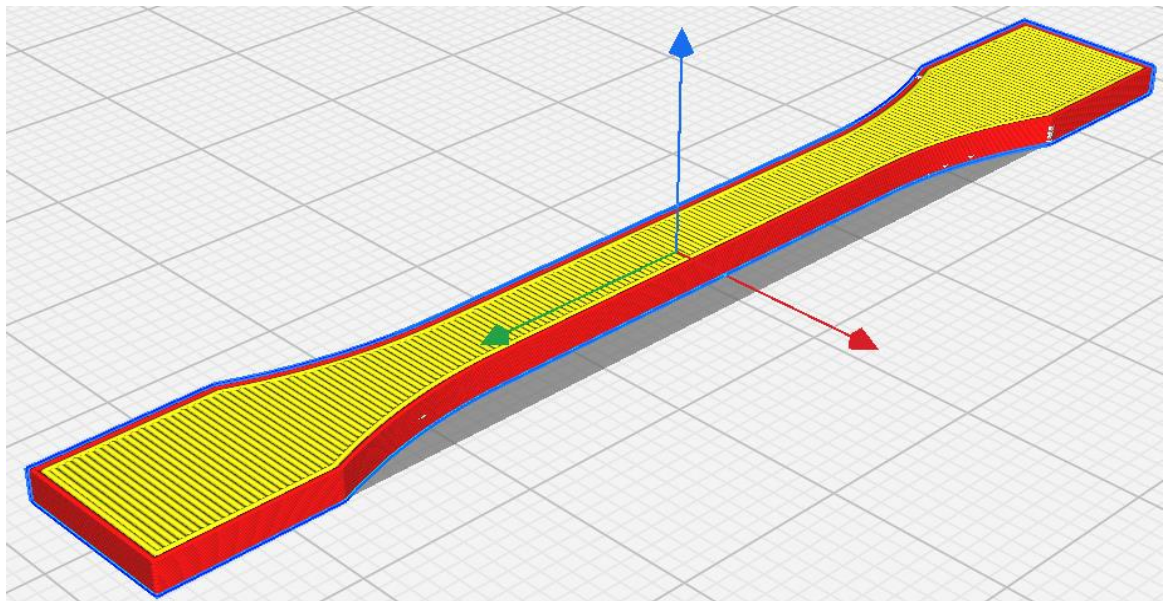
A főbb beállítások az alapanyag, „Material” fülön kerültek definiálásra. Itt a nyomtatási hőmérsékleteket állítottam be, a vizsgálni kívánt hőmérsékletekre. Ebből adódóan az első beállítási nyomtatási hőmérsékletet 180 °C-ra állítottam be. A kezdő réteg nyomtatási hőmérséklete úgyszintén 180 °C. A kezdeti nyomtatási hőmérséklet 180 °C, valamint a befejező nyomtatási hőmérséklet is 180 °C. A mérési tervnek megfelelően a hőmérsékleteket 10 °C-onként növelem 220 °C-ig.



27. ábra: A próbatesttel párhuzamos nyomtatási nézet a CURA szoftverben

[Forrás: A szerző saját készítése, 2023.06.15.]

A próbatesttel merőleges nyomtatás beállításánál a modellt úgyszintén a munkatér közepében helyeztem el. A korábban leírt beállítási paramétereket használtam ennél a próbatestnél is, azzal a kivétellel, hogy a modellt a munkatér X-Y síkjához képest 90° -al elforgattam. Így kaptam meg a próbatestre merőleges nyomtatási irányokat, ez látható a 28. ábrán. Feltételezhető, hogy egy rétegen belül erősebb az anyag kötése, mint a két réteg között, ez alapján a próbatesttel merőleges nyomtatásnak kell gyengébbnek lennie, a próbatesttel párhuzamos nyomtatásnak pedig erősebbnek.



28. ábra: A próbatesttel merőleges nyomtatási nézet a CURA szoftverben

[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.06.15]

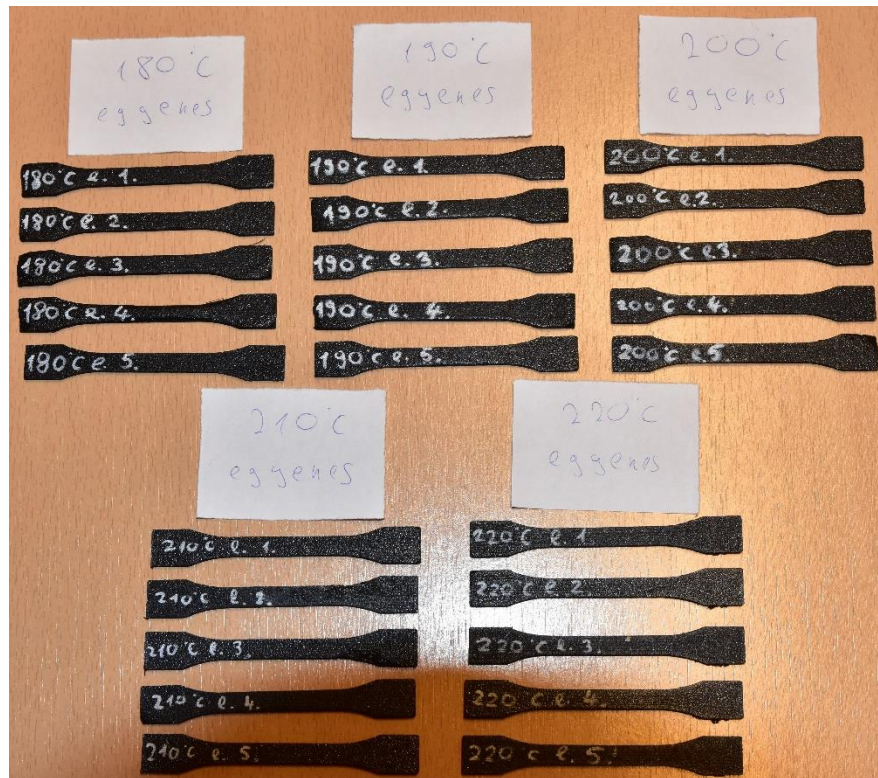
3.5. A kinyomtatott próbatestek

A 3D szoftverben megrajzolt ISO 527-1:2012-es szabványnak megfelelő próbatestet a CURA szeletelő programmal felszeletelve a Geeetech A20M nyomtatóval kinyomtattam. Ezt a nyomtatást a Gödöllői MATE Egyetem Tudástranszfer Központjában a 226-os termében végeztem el. A terem hőmérséklete a légkondicionálási berendezésnek köszönhetően állandó 23 °C-on volt, valamint a terem páratartalma 60 % volt. Az általam felhasznált PLA műanyag filamentet a nyomtatás előtt a zacskójában tároltam, hogy ne szívja fel a nedvességet a levegőből, valamint így kondicionáltam a környezet hőmérsékletére.

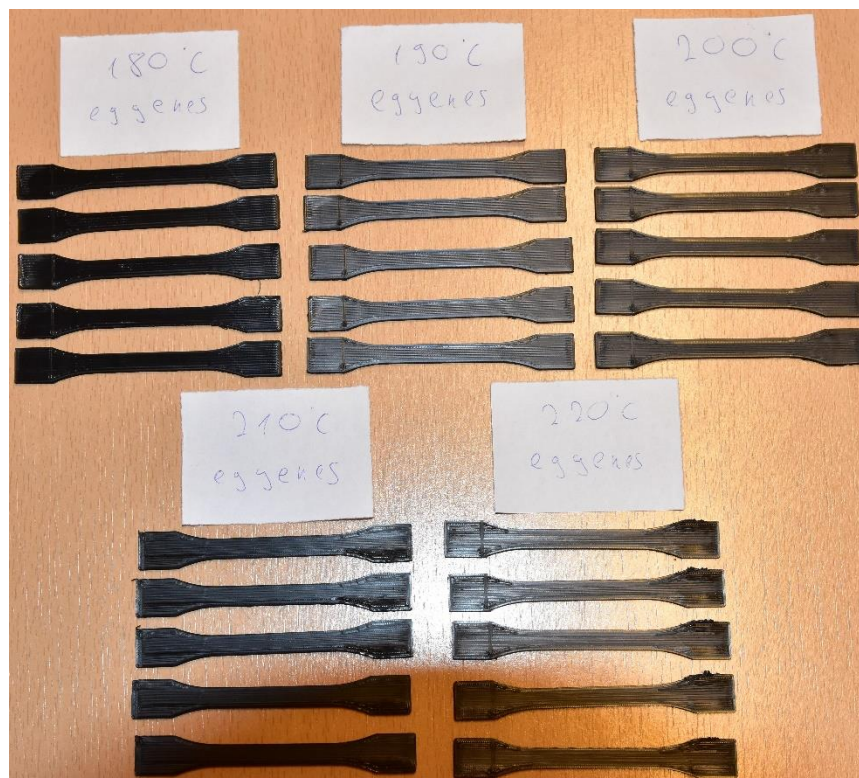
A nyomtatás elkezdése előtt a nyomtató fejet, illetve a tárgyasztalt izopropil-alkohollal megtisztítottam, majd üzemi hőmérsékletre melegítettem, amelyeket a szoftverben adtam meg. Ezután választottam ki az LCD kijelzőn az aktuális nyomtatási sort. Először a próbatesttel párhuzamos nyomtatási irányt nyomtattam ki, azon belül is a 180 °C-kal kezdtem. Egy db próbatest nyomtatási ideje kb: 15 percet vett igénybe. Egy adott nyomtatási hőmérsékletet, (pl.: 180 °C-os nyomtatást) 5 alkalommal végeztem el. Ez az a minimum darabszám, amit a kísérletek száma megkövetel a szabvány szerint, A nyomtatási hőmérsékleteket 180 °C-tól 220 °C-ig vizsgáltam. Ennek köszönhetően a próbatesttel párhuzamos nyomtatás során 5x5 db próbatestet, azaz 25 db próbatestet nyomtattam ki. Miután végeztem a párhuzamos nyomtatással, kiválasztottam az LCD kijelzőn a próbatesttel merőleges irányokat, amelyeket az előbb említett séma szerint 180 °C-tól 220 °C-ig vizsgáltam. Ebben az esetben is a megadott hőmérsékleteken 5 db próbatestet nyomtattam, ami 5x5 db próbatest. Összesen 2x25, azaz 50 próbatestet nyomtattam ki a későbbi szakítási vizsgálatokra.

Az általam választott PLA filament gyártó (Wuhu R3D Technology Co., Ltd.) 190 °C - 215 °C fűvóka hőmérsékletet, illetve 40 °C-60 °C fűtött tárgyasztalt ajánl a termékekhez. A műanyag deformálódási (megfolyási) hőmérséklete: 61,5 °C. Mivel a célom az ajánlott nyomtatási hőmérséklet alatti, ideális hőmérsékleten, valamint az ajánlott nyomtatási hőmérséklet feletti nyomtatás, ezért az első nyomtatás 180 °C-on történt. Tapadást segítő perem vagy szoknya nyomtatására nem volt szükség, a PLA tökéletesen tapadt a tárgyasztal PEI lapjához. A próbatestek kialakítása és felülete megfelelőek lettek, azonban közelítve a magasabb hőmérsékletekhez (210-220 °C), a fűvóka megolvastotta a szélső rétegeket, ezért azokon sorja alakult ki, és esztétikai megjelenésük romlott.

3.5.1. A próbatesttel párhuzamos nyomtatás képei

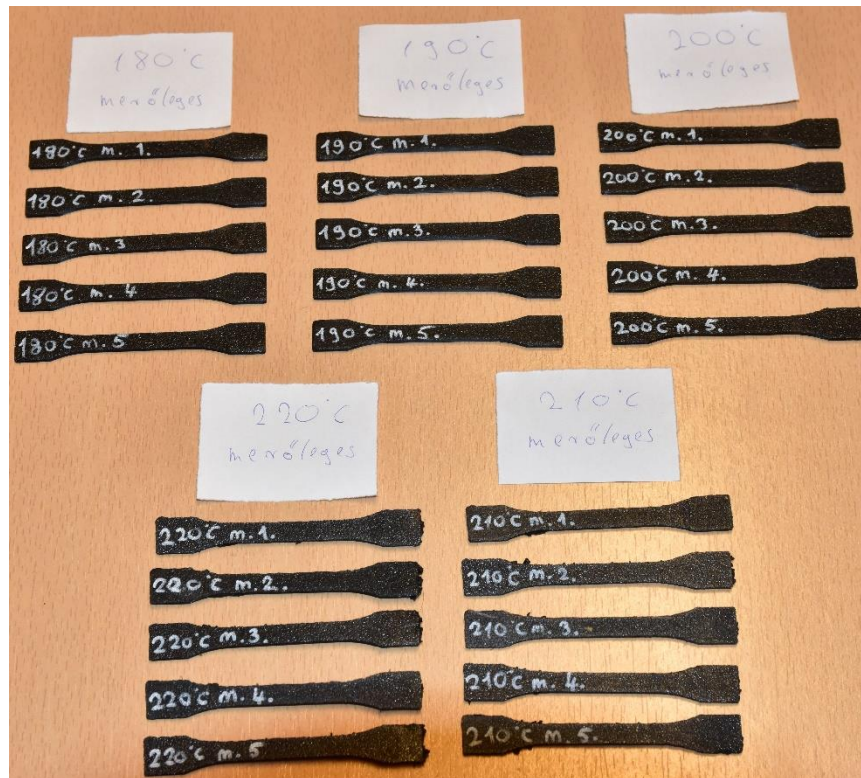


29. ábra: A próbatesttel párhuzamos nyomtatás összes hőmérsékleten előnézet
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.10.25.]



30. ábra: A próbatesttel párhuzamos nyomtatás összes hőmérsékleten hátulnézet
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.10.25.]

3.5.2. A próbatesttel merőleges nyomtatás képei



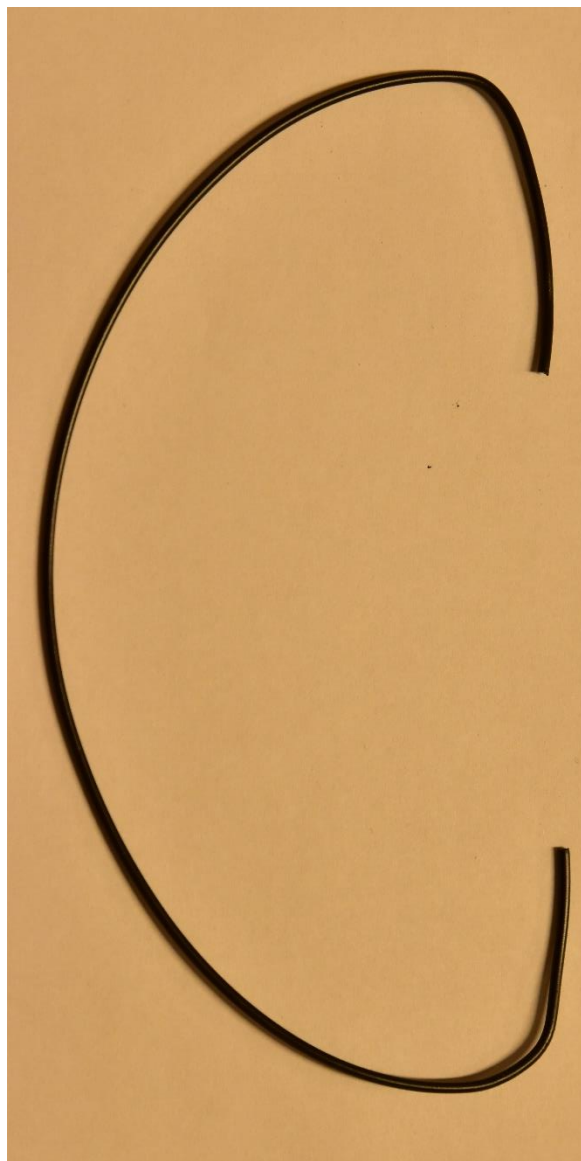
31. ábra: A próbatesttel merőleges nyomtatás összes hőmérsékleten előnézet
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.10.25.]



32. ábra: A próbatesttel merőleges nyomtatás összes hőmérsékleten hátulnézet
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.10.25.]

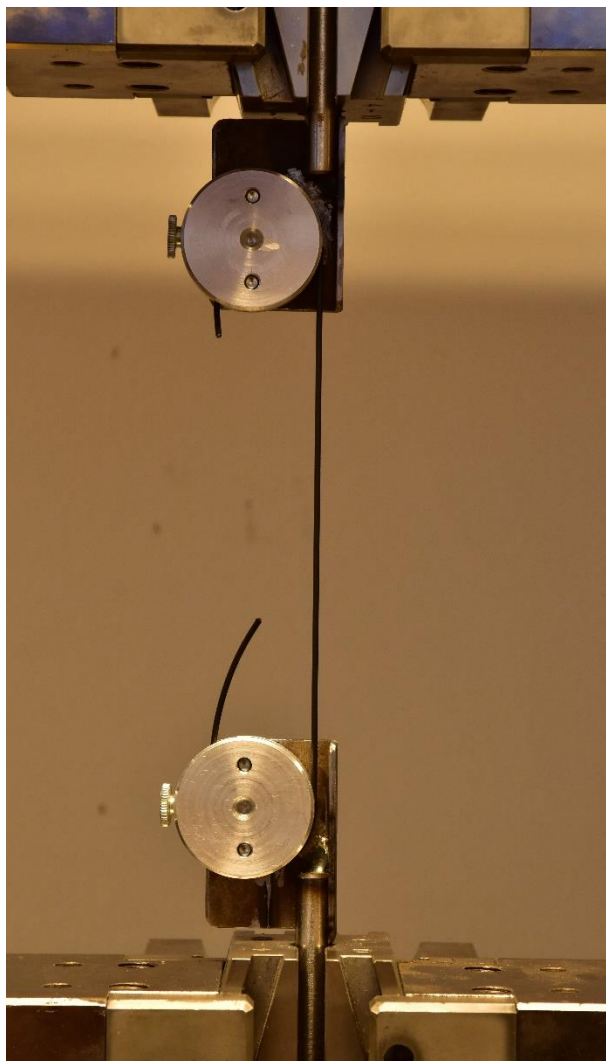
3.5.3. A vizsgált filament, illetve a befogásának a képe

A kinyomtatott próbatestek mellett megvizsgálom magát a PLA filamentet is, az erre a feladatra kialakított szerkezettel. Ez egy olyan szerkezet, amin, egy rúdon helyezkedik el egy henger, amelyben van egy megvezetés, hogy a filament szál abban fusson a vizsgálat során. Ez a henger egy átmenő furattal rendelkezik, amibe vissza lehet hajlítani a műanyag szálát és leszorítani, hogy ne csússzon ki belőle. Ebből van 2 db és a magát a rudat fogom be a szakítópofák közé, amelyek a megfeszített műanyagot szakítják el. A 33. ábrán egy filament szál látható, amelyet a feltekereselt dobról levágtam. Ezt a 1,75 mm vastag szálát fogom befogni az erre a célra kialakított szerkezetbe.



33. ábra: Feltekereselt dobról levágott filament szál darab
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.10.25.]

A 34. ábrán maga a szál befogására alkalmas szerkezet, és a közte kifeszített műanyag szál látható.



*34. ábra: A filament szál befogására kialakított szerkezet
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.10.25.]*

3.6. A méréshez felhasznált műszerek és eszközök

A mérést végző műszer:

A műszer megnevezése	A műszer típusa	A műszer gyári száma/gyártója:
Univerzális anyagvizsgálógép	Zwick Roell Z100	Zwick, Németország S/N: 753023

A méréshez felhasznált egyéb eszközök:

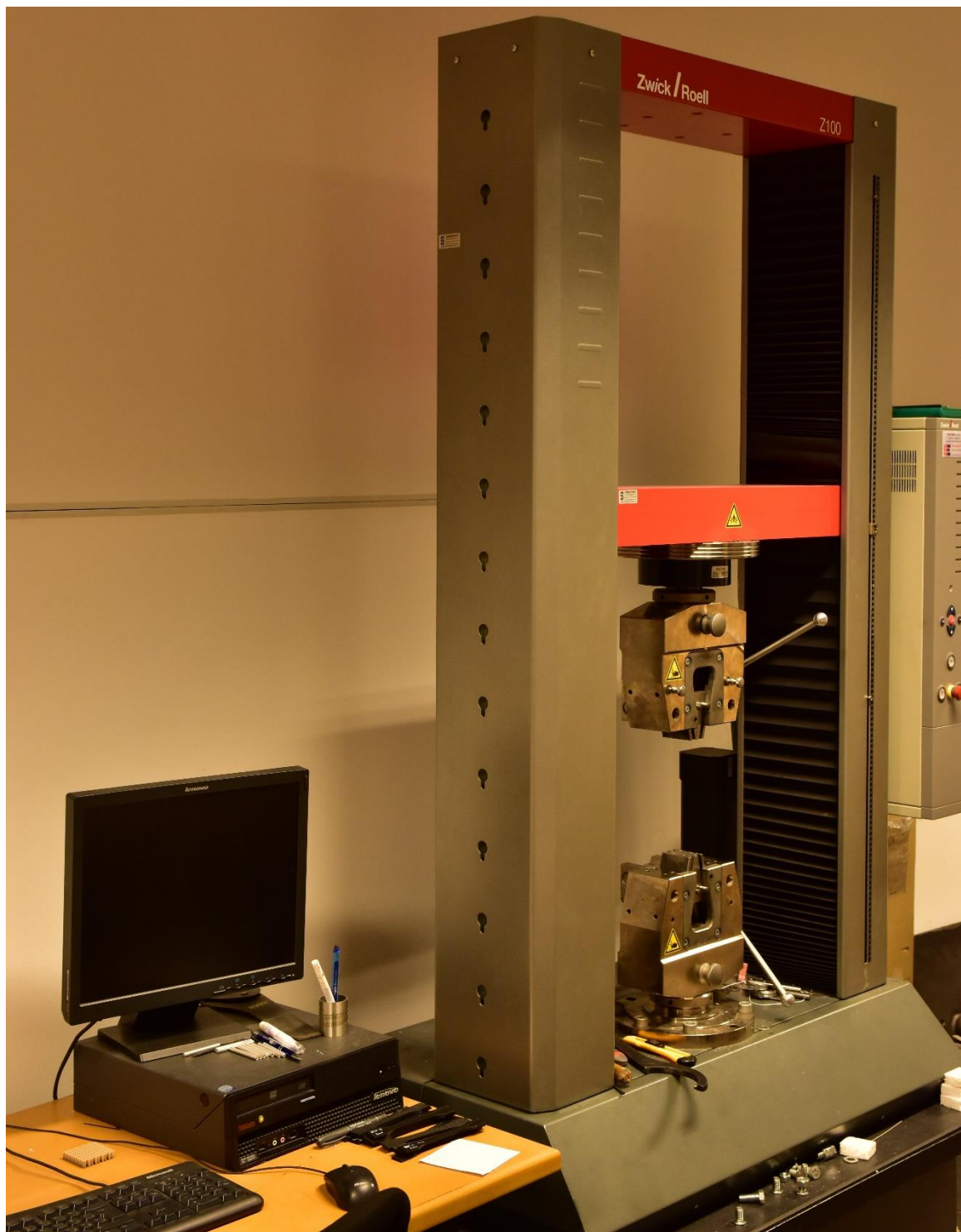
A műszer megnevezése	A műszer típusa	A műszer gyári száma/gyártója:
Hőmérséklet és páratartalom mérő	Testo 400	Testo GmbH, Németország B-4749
Digitális vastagságmérő	Mitutoyo 541	Mitutoyo GmbH, Japán B- 4852

A Zwick Roell Z100 anyagvizsgáló főbb műszaki jellemzői:

- Terhelhetőség (húzásra nyomásra egyaránt): **100 [kN]**
- Keresztfej maximális sebessége: **1000 [mm/min]**
- Keresztfej minimális sebessége: **0.001 [mm/min]**
- Keresztfej elmozdulása: **1980 [mm]**
- Pozicionálási pontosság: **0.1 [µm]**
- Súly: **660 [kg]**

A készülék programozása:

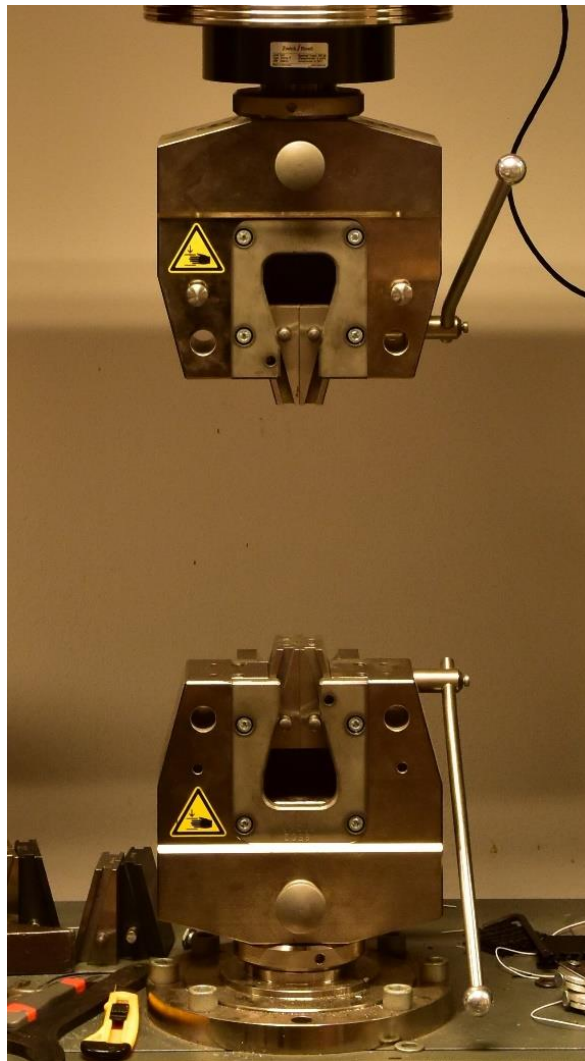
A gép közvetlenül csatlakozik egy számítógéphez. A méréshez beállítandó paramétereket csak a számítógépen található Text Expert software segítségével lehet beállítani. A software gyűjti a mérési adatokat. Ezek az adatok közvetlenül a software-ben is feldolgozhatóak. A mért paraméterek további feldolgozására lehetőség van Excel formátumban is. Én ebben a formátumban értékelem ki az adatokat és ábrázolom a diagramokban nyúlás és erő síkjaként. A következő ábra a Zwick Roell Z100 anyagvizsgáló berendezést mutatja. A szakítóvizsgálatot 5 [mm/min] értékkel fogom vizsgálni.



35. ábra: A Zwick Roell Z100 anyagvizsgálót használtam a próbatestek elszakítására
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]

3.6.1. A mérés módszere és körülmények:

A mérést ISO 527-1:2012 szabványnak megfelelően végeztem el. A mérés folyamán a teremben 23 °C illetve 60% páratartalom volt. A nyomtatás után a test nem volt megmunkálva és nem voltak rajta szennyeződések, de a tisztasága megfelelt a szabványoknak. A testet szabványos ékes szorítóba fogtam be, amely látható a 36. ábrán. A test kondicionálása 24 óra volt. Ez azt jelenti, hogy a próbatest a teremben tartva át tudta venni a szoba hőmérsékletét, így biztosítva azt, hogy a próbatest minden pontban ugyanolyan valószínűséggel szakadjon el a vizsgálat során.



36. ábra: A próbatestek befogása szabványos ékes szorítóval
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]

4. Mérési eredmények

4.1. A mérési eredmények próbatesttel párhuzamos nyomtatásnál

4.1.1. 180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 1. próbatestnél

Az általam nyomtatott IBA próbatestek keresztmetszete, ahol a próbatestek a legvékonyabb, és ahol a próbatestek elszakadtak:

$$A = 2 * 5 = 10 \text{ [mm}^2\text{]}$$

1-es próbatesthez tartozó maximális erő a számítógép által készített Excelből:

$$F_{1max} = 556,107 \text{ [N]}$$

1-es próbatesthez tartozó nyúlás a számítógép által készített Excelből:

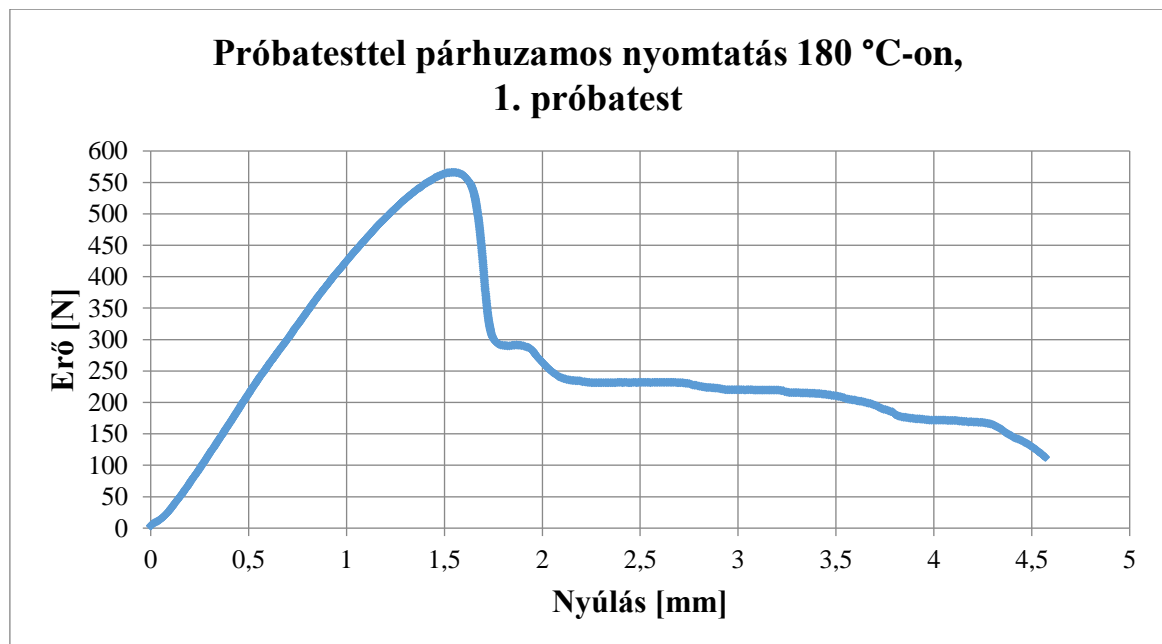
$$\varepsilon = 1,545 \text{ [mm]}$$

1-es próbatesthez tartozó maximális húzófeszültség értékének a számítása:

$$\sigma_{1max} = \frac{F_{1max}}{A} = \frac{556,107}{10} = 55,61 \text{ [MPa]}$$

1-es próbatest nyúlás értéke a húzószilárdságnál:

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta L_0}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{(75 + 1,545) - 75}{75} * 100 = 2,06 \text{ [%]}$$



1. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 180 °C-on az 1. próbatestnél
[Forrás: A szerző saját készítése, 2023.10.31.]

4.1.2. 180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

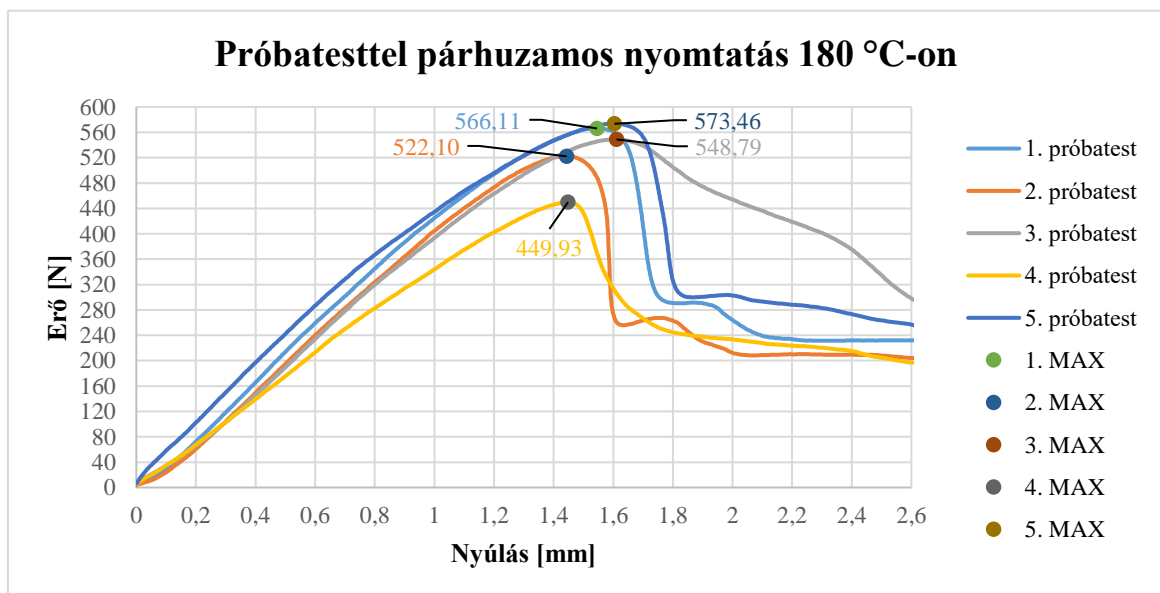
3. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	56,611	52,210	54,879	44,993	57,346
Nyúlás: [%]	2,061	1,925	2,148	1,931	2,139

A szakítószilárdság szórását valamint az alakváltozás szórását az 5 db próbatest esetén a 3. táblázat mutatja. A szórás azt méri, hogy az értékek a várható értéktől (középértéktől) milyen mértékben térnek el. A relatív szórás pedig azt mutatja, hogy a szórás az átlagnak hány százaléka.

4. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	5
Nyúlás szórása: [%]	0,108
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	9,395
Nyúlás relatív szórása: [%]	5,361



2. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 180 °C-on
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.1.3. 190 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

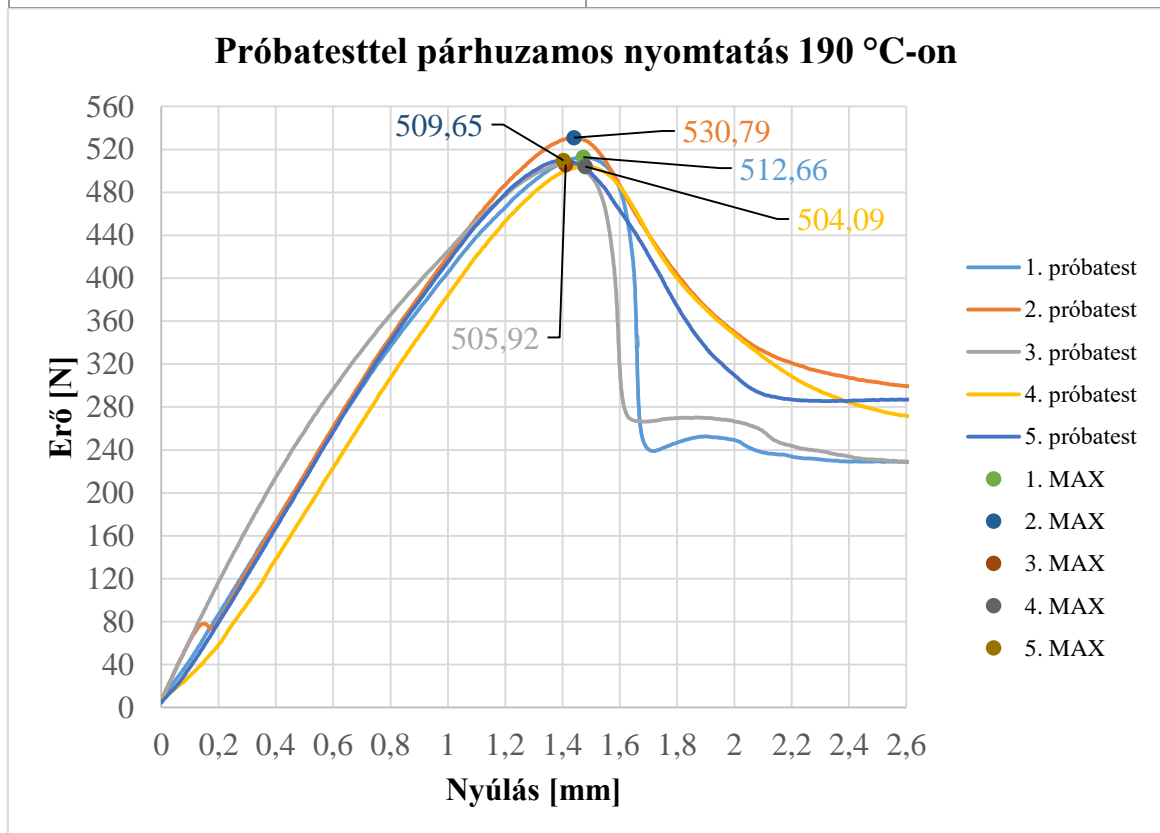
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

5. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	51,266	53,079	50,592	50,409	50,965
Nyúlás: [%]	1,963	1,921	1,882	1,972	1,871

6. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	1,068
Nyúlás szórása: [%]	0,046
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	2,083
Nyúlás relatív szórása: [%]	2,384



3. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 190 °C-on
 [Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.1.4. 200 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

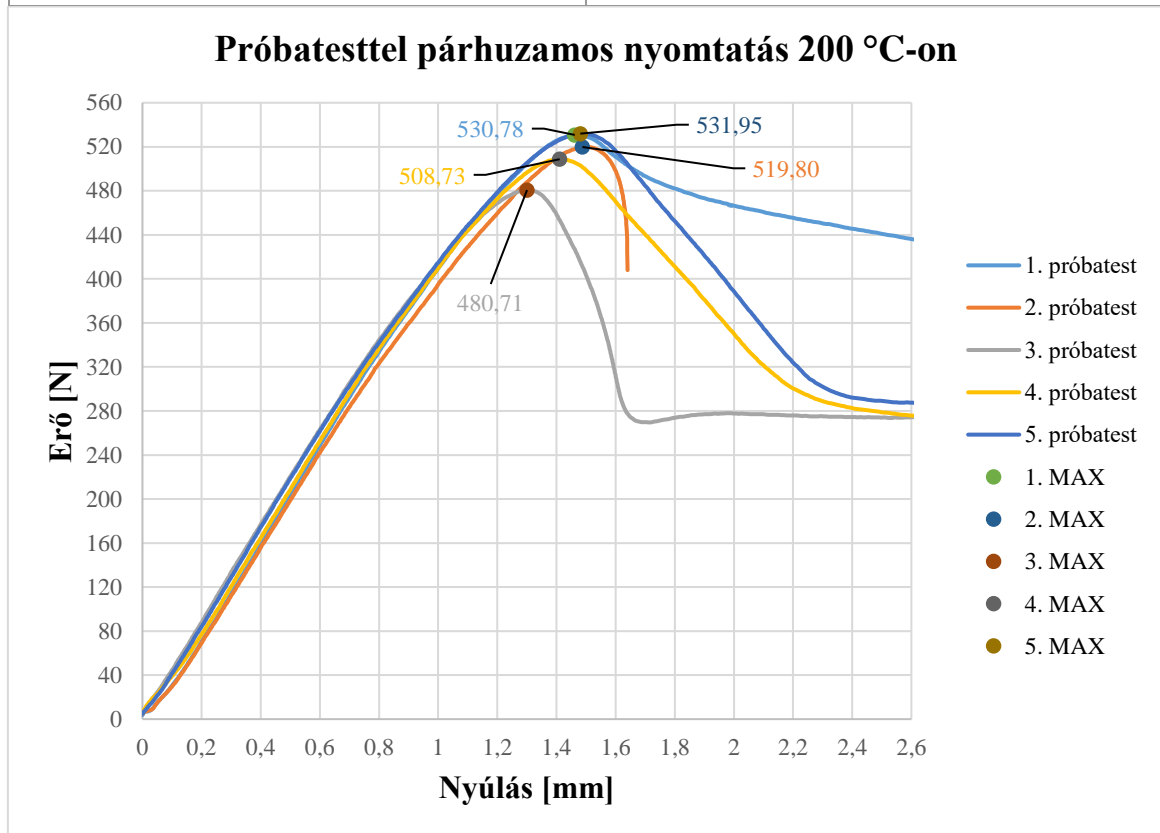
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

7. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	53,078	51,98	48,071	50,873	53,195
Nyúlás: [%]	1,949	1,984	1,734	1,881	1,974

8. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	2,105
Nyúlás szórása: [%]	0,103
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	4,092
Nyúlás relatív szórása: [%]	5,428



4. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 200 °C-on
 [Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.1.5. 210 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

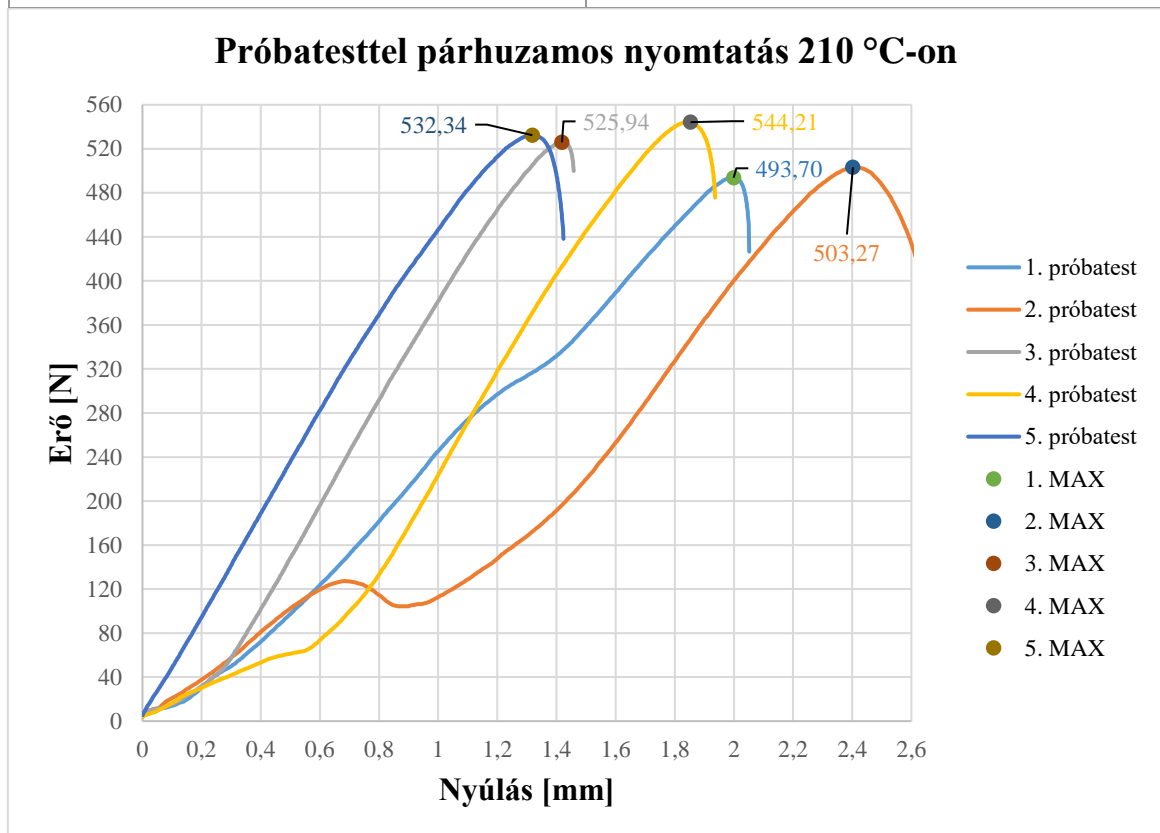
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

9. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	49,37	50,327	52,594	54,421	53,234
Nyúlás: [%]	2,665	3,203	1,891	2,471	1,758

10. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	2,089
Nyúlás szórása: [%]	0,59
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	4,018
Nyúlás relatív szórása: [%]	24,6



5. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 210 °C-on
 [Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.1.6. 220 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

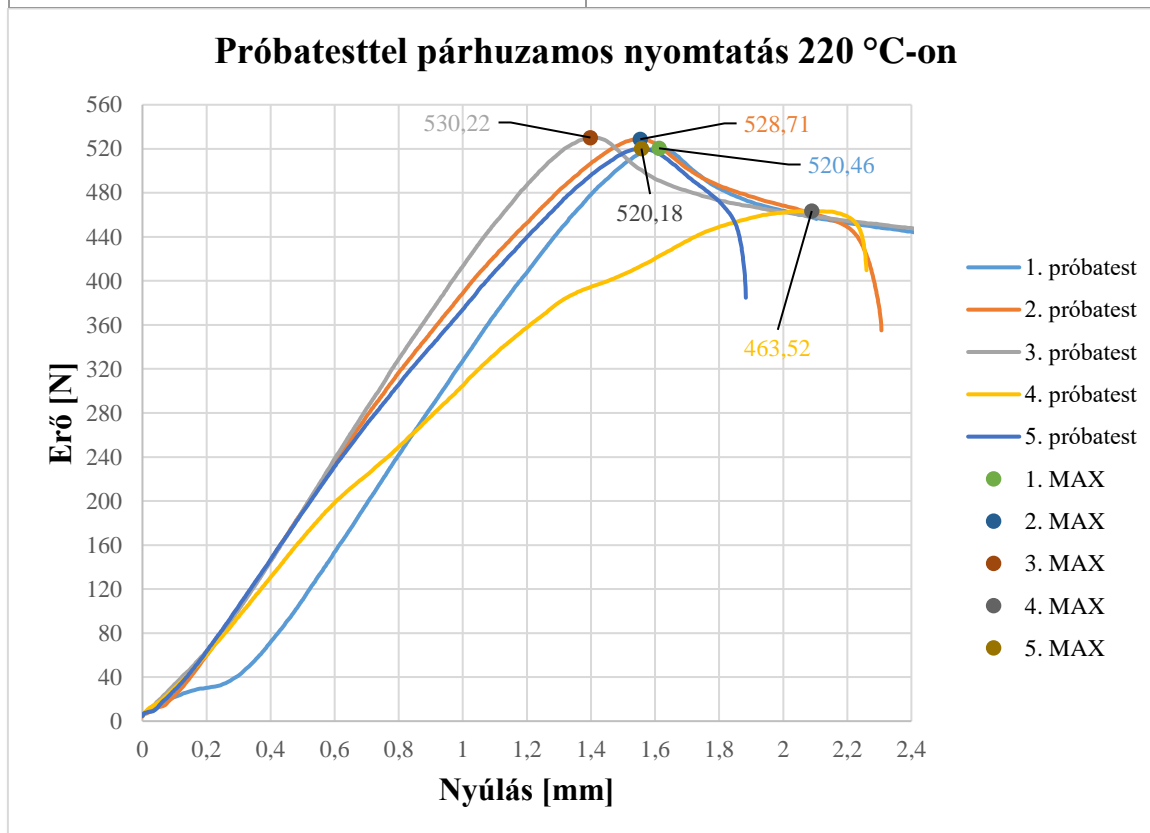
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

11. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	52,046	52,871	53,022	46,352	52,018
Nyúlás: [%]	2,15	2,072	1,864	2,785	2,077

12. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	2,783
Nyúlás szórása: [%]	0,35
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	5,43
Nyúlás relatív szórása: [%]	15,97



6. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 220 °C-on
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.1.7. A próbatesttel párhuzamos nyomtatás elszakított képei



37. ábra: Párhuzamos nyomtatás összes hőmérsékleten a szakítás után, előnézet
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]



38. ábra: Párhuzamos nyomtatás összes hőmérsékleten a szakítás után, hátulnézet
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]

4.2. A mérési eredmények próbatesttel merőleges nyomtatásnál

4.2.1. 180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 1. próbatestnél

Az általam nyomtatott 1BA próbatestek keresztmetszete, ahol a próbatestek a legvékonyabb, és ahol a próbatestek elszakadtak:

$$A = 2 * 5 = \mathbf{10} \text{ [mm}^2\text{]}$$

1-es próbatesthez tartozó maximális erő a számítógép által készített Excelből:

$$F_{1max} = \mathbf{379,393} \text{ [N]}$$

1-es próbatesthez tartozó nyúlás a számítógép által készített Excelből:

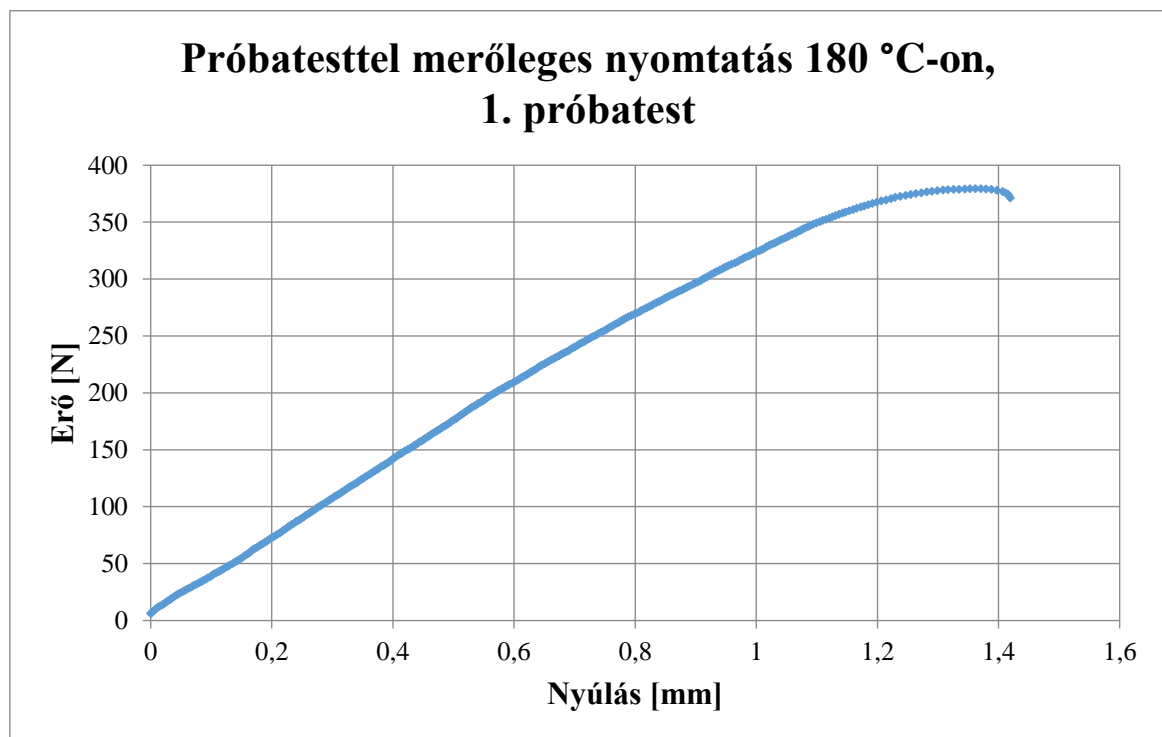
$$\varepsilon = \mathbf{1,352} \text{ [mm]}$$

1-es próbatesthez tartozó maximális húzófeszültség értékének a számítása:

$$\sigma_{1max} = \frac{F_{1max}}{A} = \frac{379,393}{10} = \mathbf{37,939} \text{ [MPa]}$$

1-es próbatest nyúlás értéke a húzószilárdságnál:

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta L_0}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{(75 + 1,352) - 75}{75} * 100 = \mathbf{1,803} \text{ [%]}$$



7. diagram: Próbatesttel merőleges nyomtatás 180 °C-on az 1. próbatestnél
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.2.2. 180 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

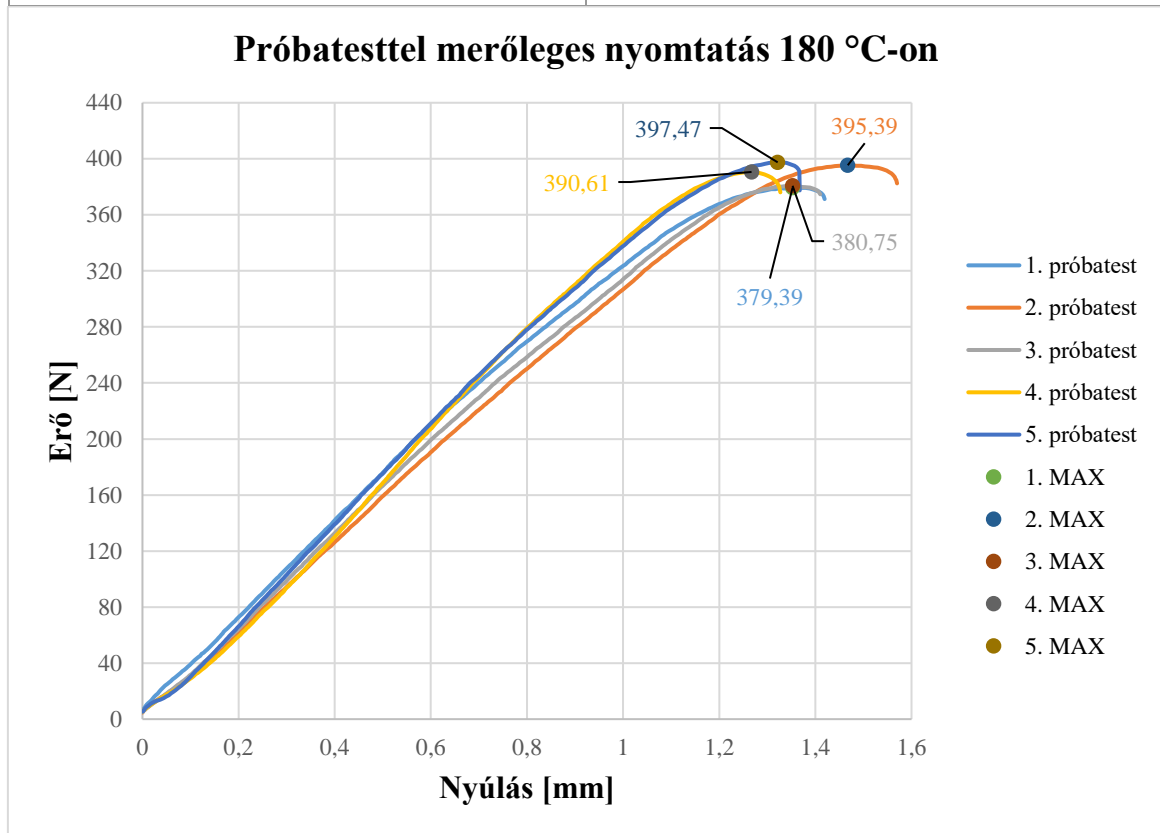
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

13. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	37,939	39,539	38,075	39,061	39,747
Nyúlás: [%]	1,803	1,957	1,803	1,69	1,762

14. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	0,829
Nyúlás szórása: [%]	0,098
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	2,133
Nyúlás relatív szórása: [%]	5,414



8. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 180 °C-on
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.2.3. 190 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

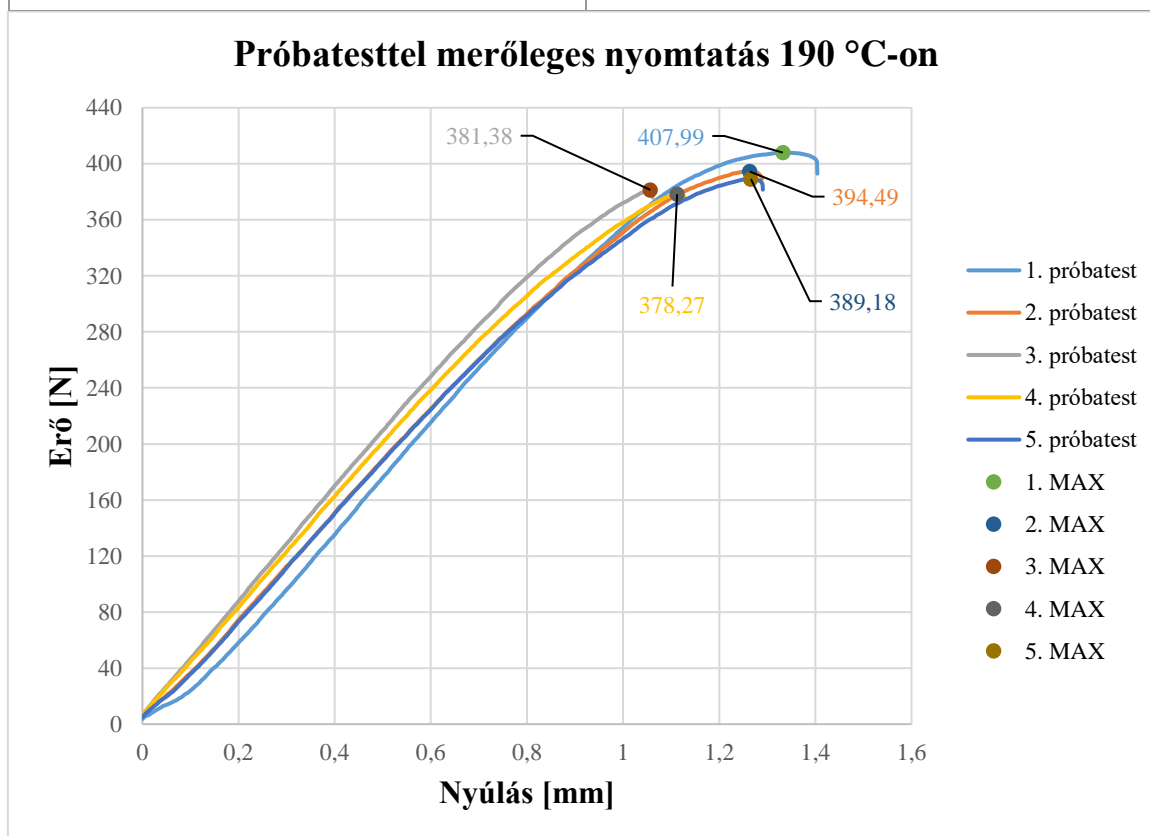
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

15. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	40,8	39,45	38,138	37,827	38,918
Nyúlás: [%]	1,777	1,684	1,409	1,483	1,688

16. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	1,179
Nyúlás szórása: [%]	0,155
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	3,021
Nyúlás relatív szórása: [%]	9,628



9. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 190 °C-on
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.2.4. 200 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

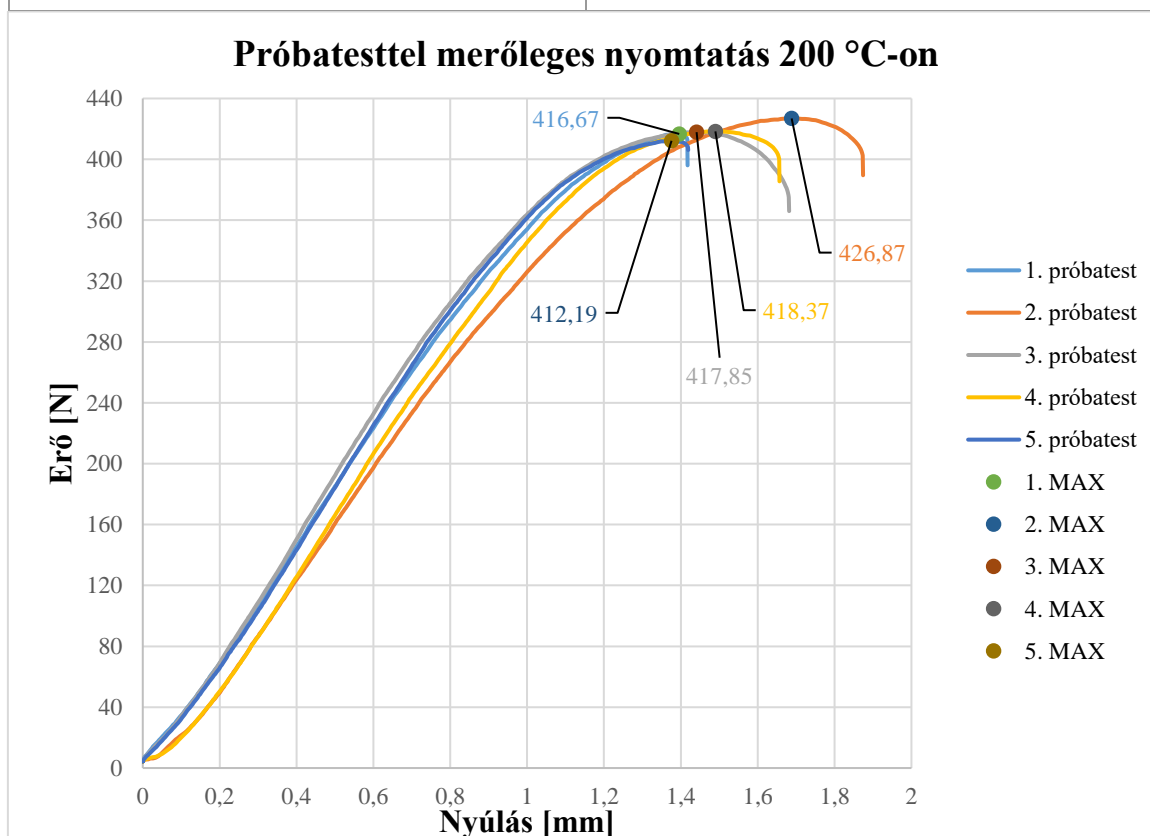
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

17. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	41,667	42,687	41,785	41,837	41,219
Nyúlás: [%]	1,861	2,251	1,921	1,987	1,834

18. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	0,533
Nyúlás szórása: [%]	0,167
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	1,274
Nyúlás relatív szórása: [%]	8,487



10. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 200 °C-on
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.2.5. 210 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

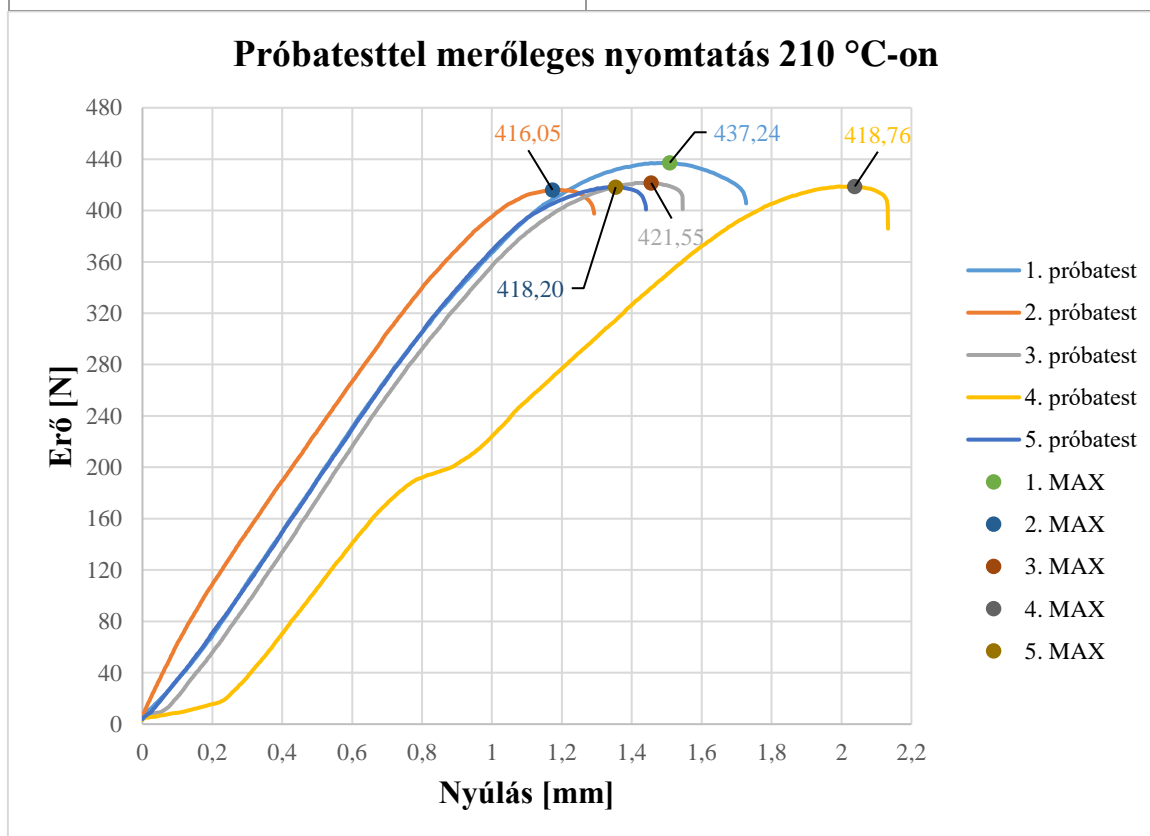
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

19. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	43,724	41,605	42,155	41,876	41,82
Nyúlás: [%]	2,012	1,564	1,941	2,718	1,805

20. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	0,854
Nyúlás szórása: [%]	0,432
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	2,022
Nyúlás relatív szórása: [%]	21,506



11. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 210 °C-on
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.2.6. 220 °C-on létrejövő húzófeszültség és alakváltozás az 5 próbatestnél

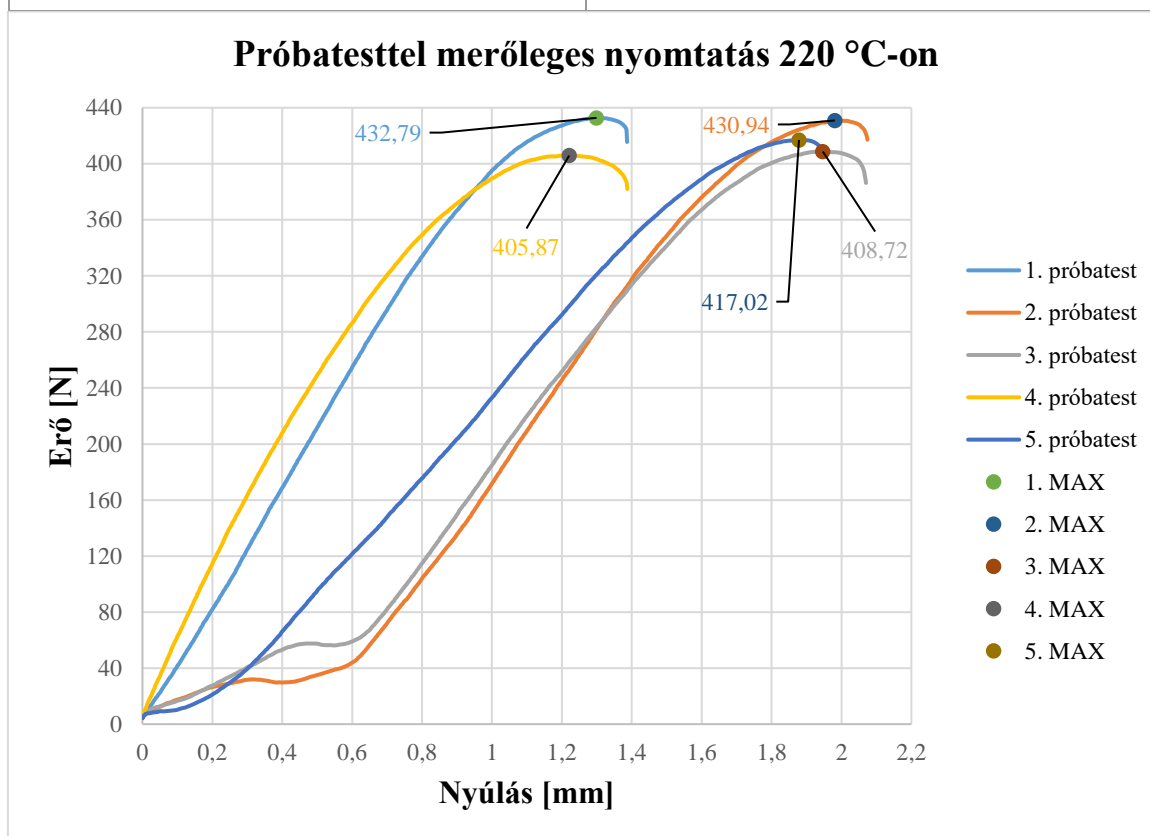
A próbatestek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

21. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	43,279	43,094	40,872	40,587	41,702
Nyúlás: [%]	1,732	2,641	2,596	1,628	2,505

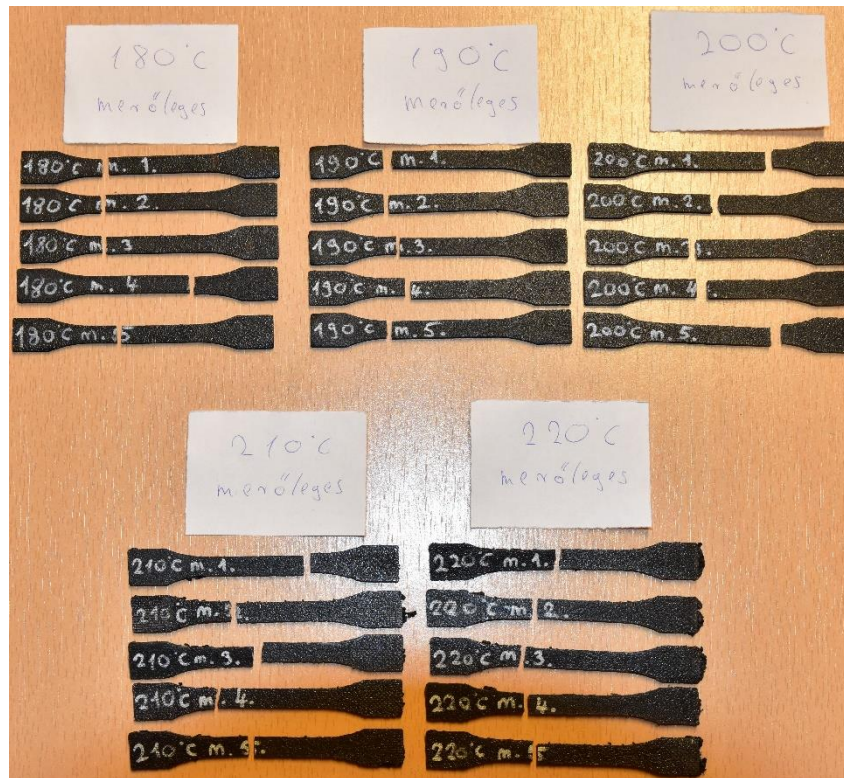
22. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	1,24
Nyúlás szórása: [%]	0,497
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	2,96
Nyúlás relatív szórása: [%]	22,385



12. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatás 220 °C-on
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.2.7. A próbatesttel merőleges nyomtatás elszakított képei



39. ábra: Merőleges nyomtatás összes hőmérsékleten a szakítás után, előnézet
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]



40. ábra: Merőleges nyomtatás összes hőmérsékleten a szakítás után, hátulnézet
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]

4.3. A mérési eredmények filament szálak esetén

4.3.1. A 4. filament szál esetén létrejövő húzófeszültség és alakváltozás

Az általam nyomtatott 1BA próbatetek a feltekereselt PLA filamentből készültek, amely 1,75 mm átmérőjű szál

$$A = \frac{d^2\pi}{4} = \frac{1,75^2\pi}{4} = 2,4053 \text{ [mm}^2\text{]}$$

1-es próbatesthez tartozó maximális erő a számítógép által készített Excelből:

$$F_{1max} = \mathbf{97,634 \text{ [N]}}$$

1-es próbatesthez tartozó nyúlás a számítógép által készített Excelből:

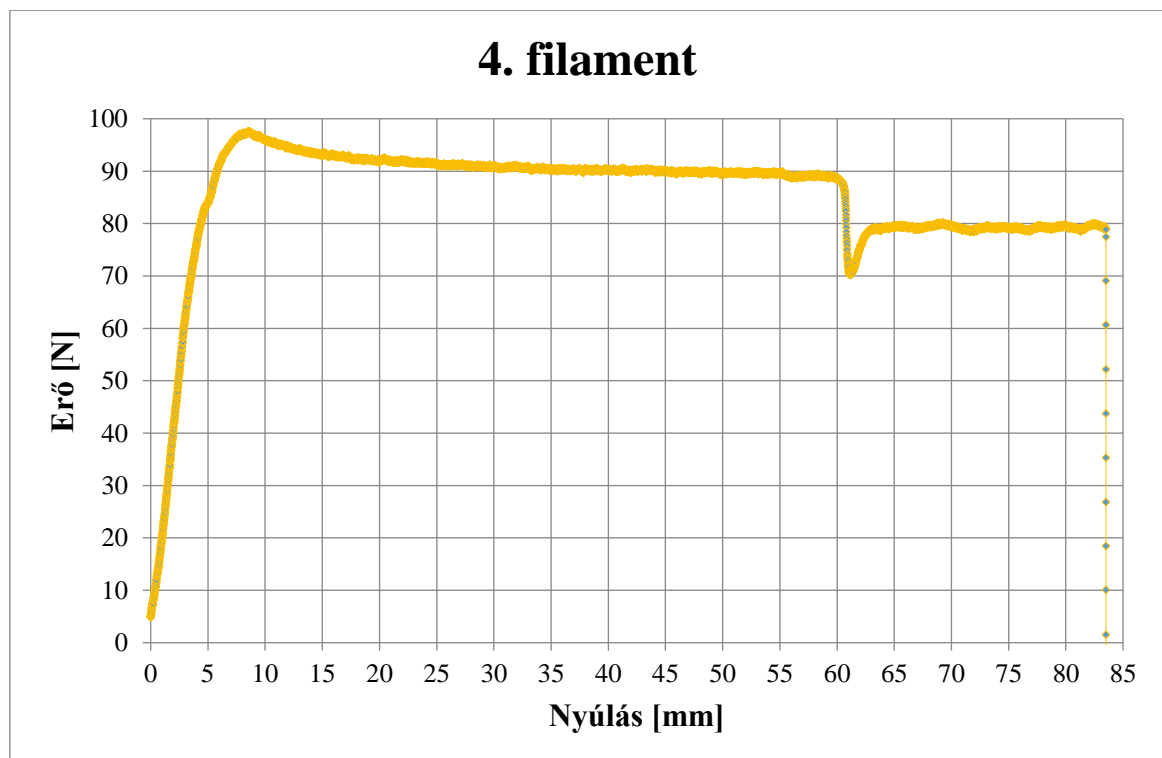
$$\varepsilon = \mathbf{8,588 \text{ [mm]}}$$

1-es próbatesthez tartozó maximális húzófeszültség értékének a számítása:

$$\sigma_{1max} = \frac{F_{1max}}{A} = \frac{97,634}{2,4053} = \mathbf{40,592 \text{ [MPa]}}$$

1-es próbatest nyúlás értéke a húzószilárdságnál:

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta L_0}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{(26 + 8,588) - 26}{26} * 100 = \mathbf{33,031 \text{ [%]}}$$



13. diagram: A 4. filament szál szakításai diagramja
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.3.2. Mind az 5 db filament esetén létrejövő húzófeszültség és alakváltozás

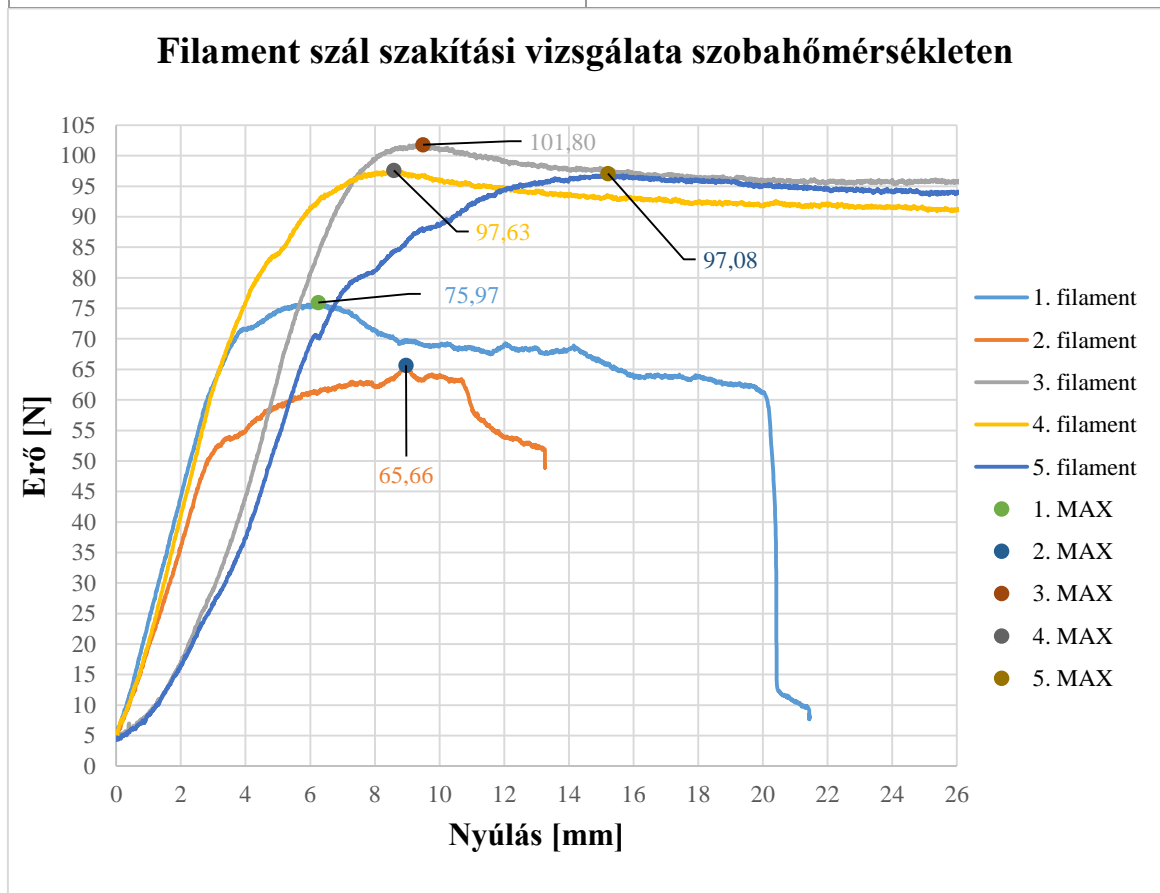
A filamentek maximális húzófeszültsége, illetve a hozzájuk tartozó alakváltozás:

23. táblázat: A számított eredményeket tartalmazó táblázat

	1. próbatest	2. próbatest	3. próbatest	4. próbatest	5. próbatest
Szakítószilárdság: [MPa]	31,585	27,3	42,325	40,592	40,363
Nyúlás: [%]	24,0764	41,635	29,637	33,032	60,169

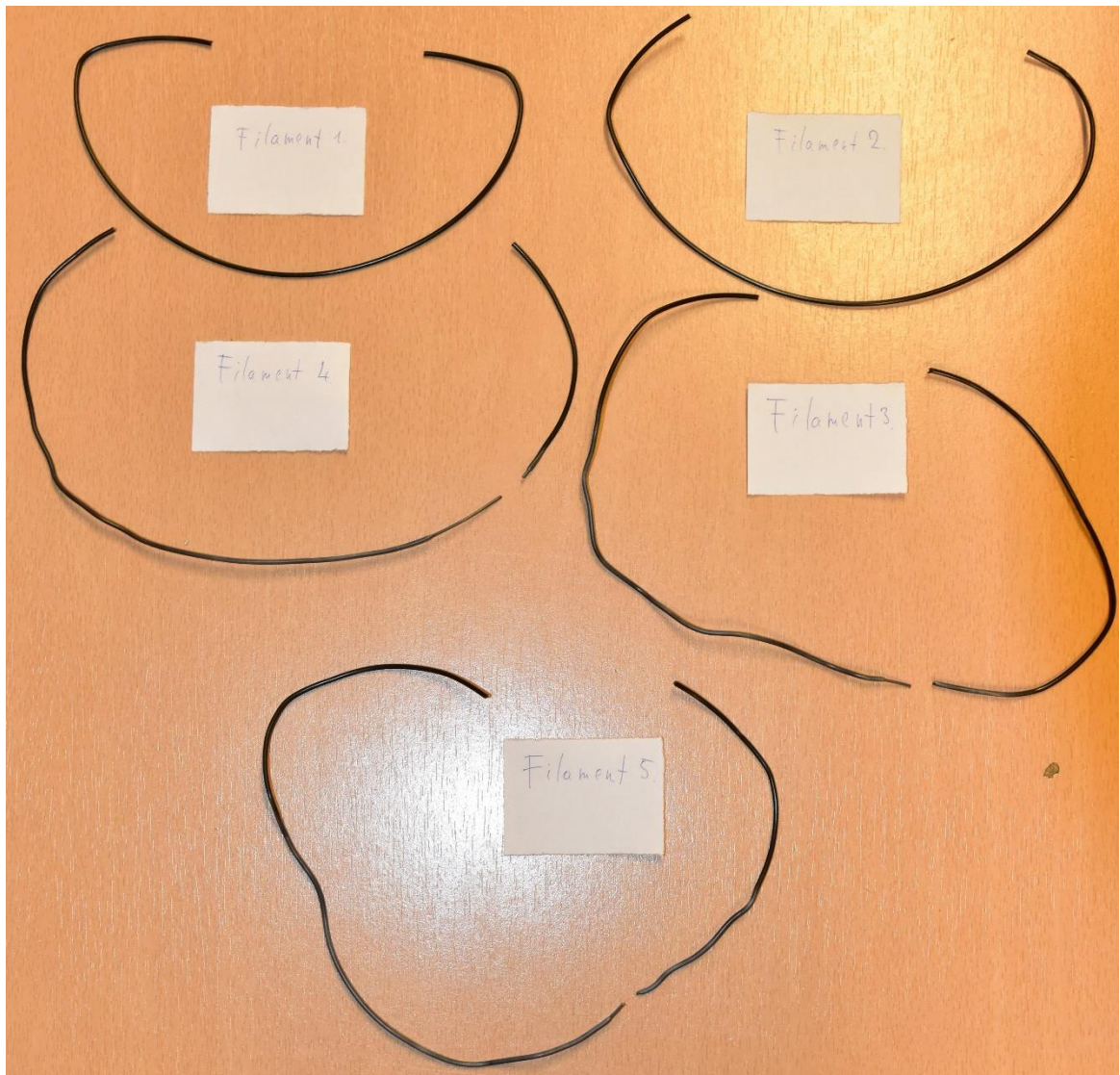
24. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	5 db próbatestre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	6,603
Nyúlás szórása: [%]	12,773
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	18,124
Nyúlás relatív szórása: [%]	34,23



14. ábra: Az 5 db filament szakítási diagramja
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.01]

4.3.3. A vizsgált filament szálak elszakított képei



41. ábra: A vizsgált filament szálak elszakított képei
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.10.25.]

4.4. Összehasonlítás és összegzés

4.4.1. Párhuzamos nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összehasonlítása

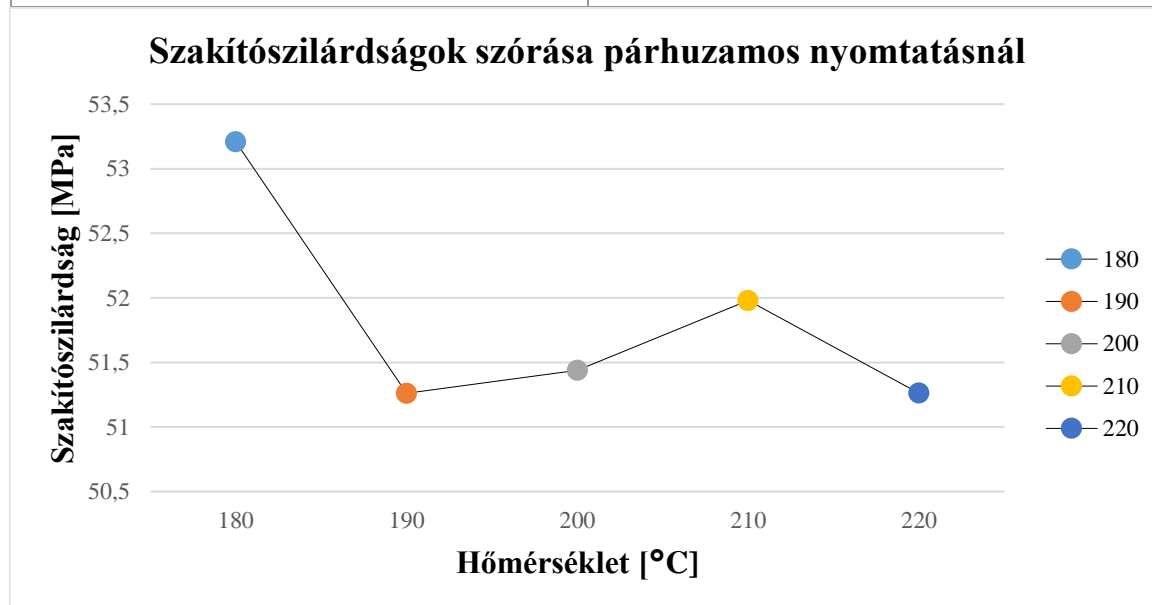
A következő táblázat a párhuzamos nyomtatás során az adott hőmérsékleten számolt átlagos húzófeszültségeket tartalmazza. A 15. ábra pedig a hőmérséklet növekedésével az átlagos szakítószilárdság változását.

25. táblázat: Az átlagos húzófeszültség adott hőmérsékleten párhuzamos nyomtatásnál

	180 °C	190 °C	200 °C	210 °C	220 °C
Szakítószilárdság: [MPa]	53,2078	51,2611	51,4393	51,98	51,2618

26. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	Mind az 5 db hőmérsékletre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	0,825
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	1,591



15. ábra: Átlagos szakítószilárdságok változása a hőmérséklet növekedésével
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.02]

180 °C-nál látható, hogy a szakítószilárdság, jóval nagyobb, mint az átlag, azaz, mint az összes többi, az azért van, mivel ebben az esetben a szakítószilárdság szórása a legnagyobb az általam mért értékek közül, 5MPa. Ez jól látható a 3. táblázatban, illetve a 2. diagramon.

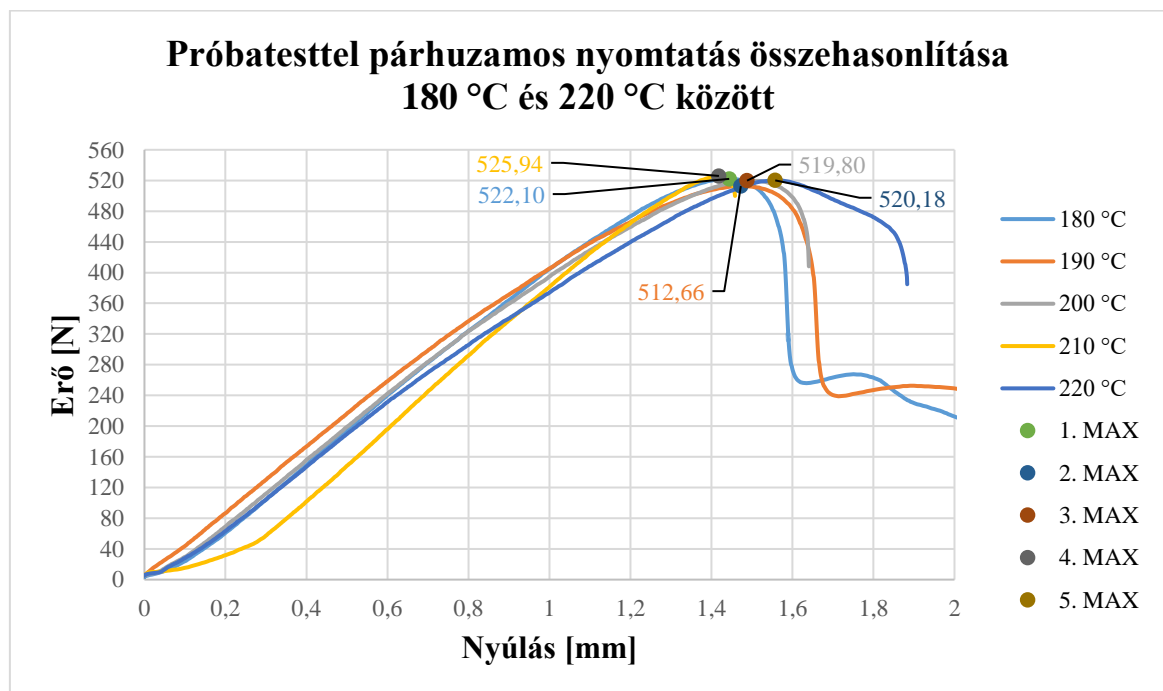
190 °C elérésénél a szakítószilárdság szórása lecsökken és a próbatetek közel azonos értékeket mutatnak. A szórás értéke is közel 1MPa-ra tehető. Az átlagos szilárdság itt a legkisebb, amely 51, 261 MPa.

200 °C-nál a szakítószilárdság szórása kicsivel nagyobb, mint az előző esetben, ennél a hőmérsékletnél kb. 2 MPa. Ahogy a 15. diagramból látható a szakítószilárdság értéke hajszállal nagyobb, mint a 190 °C esetében. De ez elhanyagolhatóan kicsi.

210 °C vizsgálatánál a szakítószilárdság szórása úgyszintén kb. 2 MPa-ra tehető. Azonban az átlagos legnagyobb szakítószilárdságok itt helyezkednek el. Közel 52 MPa az átlagos szilárdság, amely a legnagyobb a szórás és az átlag szempontjából.

220 °C-nál a szakítószilárdság szórás megnövekszik és kb. 2,8 MPa-ra tehető. Az átlagos szilárdság értéke lecsökken a 190 °C nyomtatás szilárdságára, ami a felnagyított diagramon nagy esésnek számít, azonban ezek az értékek elhanyagolhatóak.

Az alábbi diagram olyan görbéket tartalmaz, amely az adott hőmérséklet átlag közép értékével rendelkezik.



16. diagram: Próbatesttel párhuzamos nyomtatások összehasonlítása
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.02]

4.4.1.1. Párhuzamos nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összegzése

Következtetésként azt a megállapítást tudom levonni, hogy a 180 °C-os hőmérsékletű nyomtatásnál létrejöhet nagyon jó, illetve nagyon rossz adhéziós kapcsolat a rétegek között, amik nem biztosítják a stabil szilárdságot a szerkezetnek, illetve a modellnek. Ezt demonstrálja az általam nyomtatott 5 db próbatest, és azok szakítószilárdságuk. Némelyik eléri az 56-57 MPa-t, valamelyik pedig csak 45 MPa-lal rendelkezik. Ezt a nyomtatási hőmérsékletet nem ajánlom modellek nyomtatására, mivel a nyomtatási hőmérsékletet az ajánlott nyomtatási hőmérséklet alatt kezdtem el vizsgálni, valamint ezt a hőmérsékletet a gyártó sem ajánlja, mivel a kezdeti hőmérséklet az adatlapon a 190 °C.

Az ajánlott hőmérséklet alatti nyomtatást leszámítva az ajánlott kezdeti hőmérsékleten történő nyomtatásnál, valamint a hőmérséklet növelésével a szakítószilárdság értéke nem változik drasztikus mértékben, sőt egy kis emelkedés figyelhető meg. Ez az ajánlott nyomtatási hőmérséklet feletti hőmérsékletre már nem vonatkozik, a 220 °C-ra, mivel itt már egy kis visszaesés tapasztalható.

Összességében elmondható, hogy a próbatesttel párhuzamos orientációval nyomtatott próbatestek szakítószilárdsága az általam mért hőmérsékleteken is tudja a gyártó által biztosított szilárdsági értékeket, amely 35 MPa. A párhuzamos nyomtatásnál különböző hőmérsékleteken vizsgált próbatestek a 210 °C-nál érik el a legjobb szilárdságot. Tehát a PLA alapanyagot a korábban beállított paraméterek mellett ezen a hőmérsékleten érdemes nyomtatni. Azonban célszerű azt megjegyezni, hogy a szilárdsági értékek közötti eltérések csekély értékű, - a 190 °C kiugrása mellett is - amely összességében közel 1 MPa. Így tehát a gyártó által ajánlott hőmérsékletek intervallumát is használhatjuk a modellünk kinyomtatására mindenféle probléma nélkül.

4.4.2. Merőleges nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összehasonlítása

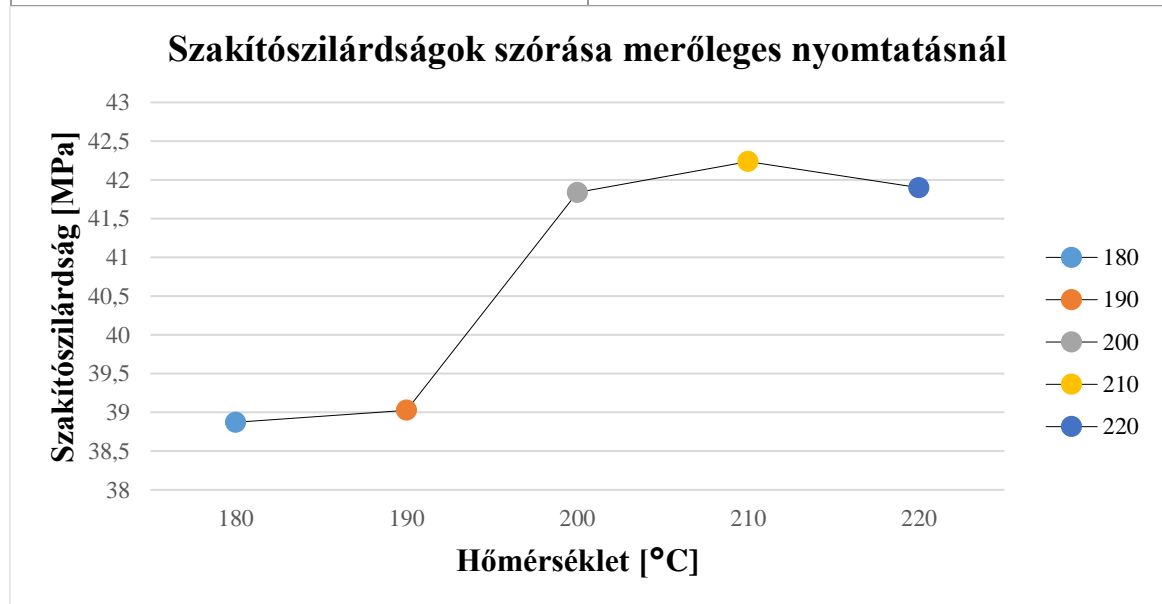
A következő táblázat a merőleges nyomtatás során az adott hőmérsékleten számolt átlagos húzófeszültségeket tartalmazza. A 17. ábra pedig a hőmérséklet növekedésével az átlagos szakítószilárdság változását.

27. táblázat: Az átlagos húzófeszültség adott hőmérsékleten merőleges nyomtatásnál

	180 °C	190 °C	200 °C	210 °C	220 °C
Szakítószilárdság: [MPa]	38,8722	39,026	41,8387	42,23615	41,90

28. táblázat: Szórásokat és relatív szórásokat tartalmazó táblázat

	Mind az 5 db hőmérsékletre vonatkoztatva
Szakítószilárdság szórása: [MPa]	1,674
Szakítószilárdság relatív szórása: [%]	4,106



17. ábra: Átlagos szakítószilárdságok változása a hőmérséklet növekedésével
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.02]

180 °C vizsgálatánál a szilárdság szórása körülbelül 0,8 MPa értéken van. Jelen esetben nincs akkor szórás, mint ugyanezen a hőmérsékleten a párhuzamos orientációnál. Tehát a szilárdság stabil értékekkel rendelkezik.

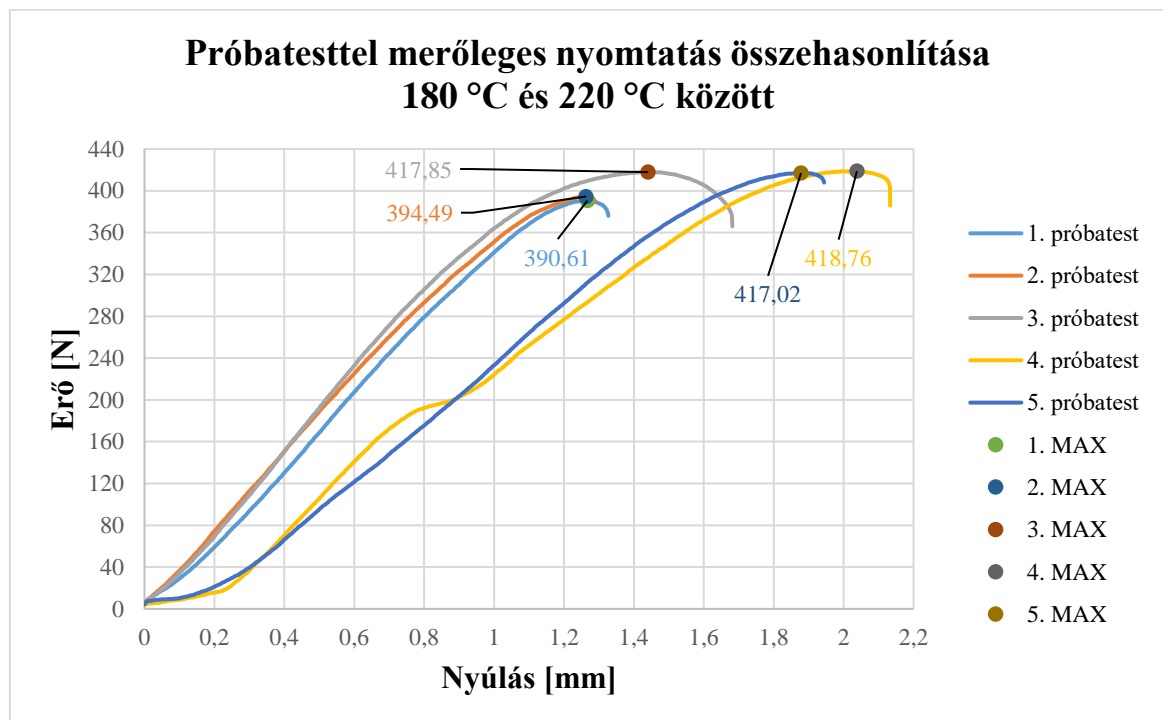
190 °C-nál látható, hogy az átlagos szilárdság az előző hőmérséklet felett hajszaál híján. helyezkedik el Ennél a hőmérsékletnél a szilárdság szórása 1,2 MPa értékű.

200 °C-nál a szilárdság átlaga nagyobb értékre emelkedik, amely a rétegek közötti erősebb kapcsolatot jelenti. Ebben az esetben a szilárdság szórása már 0,5 MP-ara csökken.

210 °C-nál hasonlóan, mint a párhuzamos orientációnál a szórás és az átlag szempontjából a legnagyobb szakítószilárdságok itt helyezkednek el, amely 42,24 MPa-ra tehető. A szilárdság szórása 0,8 MPa.

220 °C esetében, úgy, mint a párhuzamos orientációnál az átlagos szilárdság lecsökken a 200 °C nyomtatási hőmérsékletére. Ebben az esetben a szilárdság szórása 1,24 MPa.

Az alábbi diagram olyan görbéket tartalmaz, amely az adott hőmérséklet átlag közép értékével rendelkezik.



18. diagram: Próbatesttel merőleges nyomtatások összehasonlítása
[Forrás: A szerző saját készítése: 2023.11.02]

4.4.2.1. Merőleges nyomtatás átlagos húzószilárdságainak összegzése

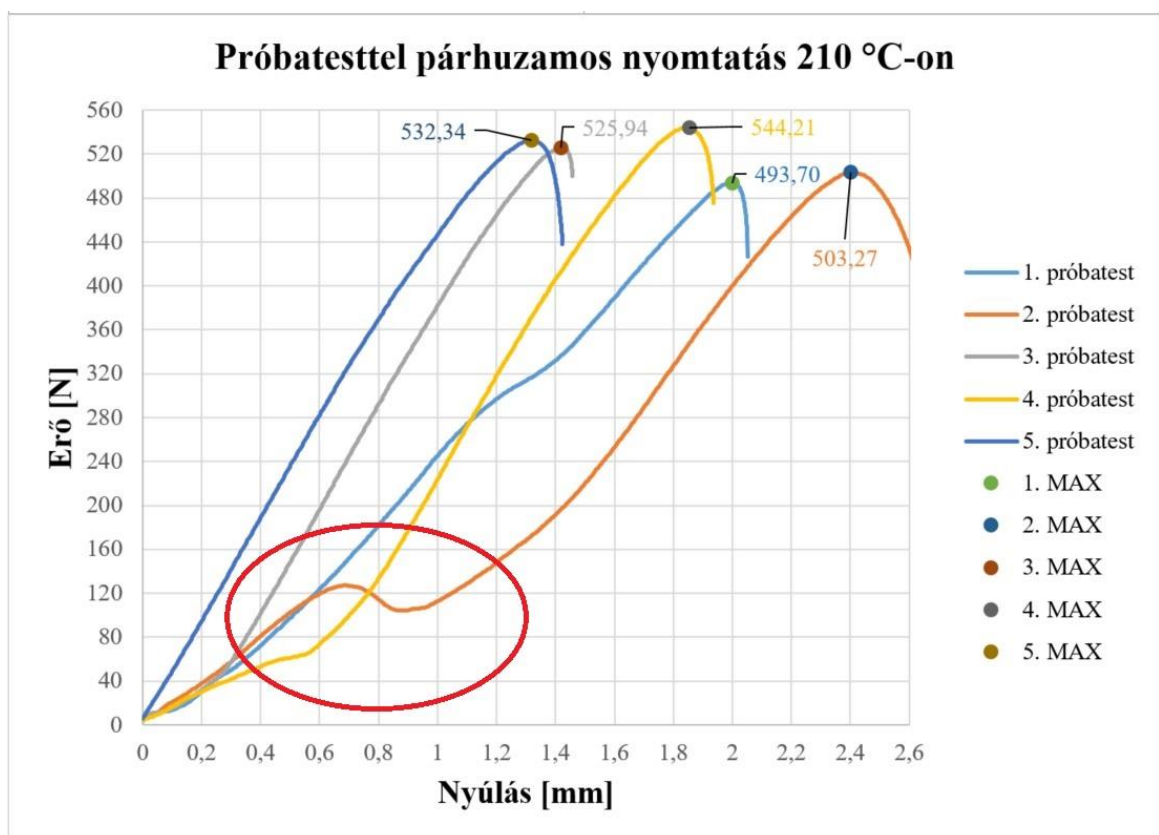
Következtetésként azt a megállapítást tudom levonni, hogy a vizsgálat előtt általam leírt feltételezés, hogy a merőleges nyomtatás gyengébb eredményekkel fog zárulni, ebben az esetben beigazolódott. A merőleges orientációnál a rétegek közötti kapcsolatok kisebbek, mint a párhuzamos orientációnál, ezáltal gyengébb kötés alakul ki a nyomtatott szálak között. Ezt eredményezi az a megállapítás is, hogy a merőleges és párhuzamos orientáció nyomtatási szilárdságai között közel 10 MPa különbség van a párhuzamos orientáció javára.

Különböző hőmérsékleteken a szilárdság szórása stabil értékeket mutat, valamint a hőmérséklet növekedésével, az ajánlott hőmérséklet alól, azaz 180 °C-tól növekszik is a szilárdság értéke 210 °C-ig. Az ajánlott nyomtatási hőmérséklet felett, 220 °C-nál már visszaesés figyelhető meg, úgy, mint a párhuzamos orientációnál.

Összességében elmondható, hogy a próbatesttel merőleges orientációval nyomtatott próbatestek szakítószilárdsága az általam mért hőmérsékleteken is tudja a gyártó által biztosított szilárdsági értékeket, amely 35 MPa. A merőleges nyomtatásnál különböző hőmérsékleteken vizsgált próbatestek a 210 °C-nál érik el a legjobb szilárdságot. Tehát a PLA alapanyagot a korábban beállított paraméterek mellett ezen a hőmérsékleten érdemes nyomtatni. Azonban célszerű azt megjegyezni, hogy a szilárdsági értékek közötti eltérés csekély értékű, amely összességében közel 1,7 MPa. Így tehát a gyártó által ajánlott hőmérsékletek intervallumát is használhatjuk a modellünk kinyomtatására mindenféle probléma nélkül.

4.5. Vizsgálat közbeni felmerülő problémák

A befogó pofák közé behelyezett próbatesteket jobban össze kellett nyomni pofákkal, amelyet kézi erővel oldottam meg, mivel azok a szakítási vizsgálat közben megcsúszhattak. A már jobban összenyomott próbatestek nem csúsztak meg és szabályos diagramot hoztak létre. A megcsúszott próbatesteknél a diagramban látható vonal alakváltozás jött létre, amely nem befolyásolta a vizsgálat menetét és eredményét. Ebben az esetben megállítottam a szakítógépet, jobban összenyomtam a befogó pofákat és újraindítottam a szakítási vizsgálatot. Ezután a mérés probléma nélkül folytatódott. A következő ábrán ilyen megcsúszások láthatóak.



42. ábra: A diagramon látható a próbatestek megcsúszása a befogó pofák között
[Forrás: A szerző saját készítése, fényképezve: 2023.11.02.]

A vizsgálatom során a próbatestek megfelelő helyen szakadtak el, így az összes szakítási eljárás szabályosnak tekinthető.

4.6. Következtetések levonása

A vizsgálati eredményekben látható, hogy az ISO 527-es szabványban szereplő 1BA próbatest, különböző hőmérsékleteken nyomtatva – igaz, csak kis eltéréssel – növekvő szakítószilárdságot mutatott. Az ajánlott nyomtatási hőmérséklet alatt kezdtem el a nyomtatást, 180 °C-on, amely bizonytalan szilárdságot prezentált a próbatesttel párhuzamos orientáció során. Próbatesttel merőleges esetben a többi hőmérséklethez képest a leggyengébb szilárdságot mutatta. A gyártó által ajánlott hőmérsékletekkel folytattam a vizsgálatot, amely 190 °C-tól 210 °C-ig tartott. Ebben a tartományban mind a két orientációban látható, hogy a hőmérséklet növekedésével a szakítási szilárdság is növekszik, igaz, csak kis mértékben. A maximális szakítószilárdságot mind a két esetben a 210 °C hőmérsékletnél éri el a próbatest. Túlhaladva ezen a hőmérsékleten a 220°C-nál már visszaesés tapasztalható.

Párhuzamos orientációnál a 210 °C-hoz kapcsolódó átlagos szakítószilárdság: 51,98 MPa. Merőleges orientációnál, ugyanennél a hőmérsékletnél ez az érték: 42,236 MPa. A két érték között közel 10 MPa különbség van, amely érthető mivel merőleges orientáció esetén kevesebb összekapcsolódási rétegek vannak, amely gyengébb adhéziós kapcsolatot biztosít a kinyomtatott szálak között. Párhuzamos orientációnál a réteg számok többek, amelyek nagyobb erőt képesek elviselni.

Mind a két orientáció analízise kibírta a gyártó által előírt értéket, amely 35 MPa. Mindemellett túl is teljesítette azt. Ez az érték a 3D nyomtatásra vonatkozik 100 %-os kitöltöttség mellett. Párhuzamos orientáció közelebb volt a gyártó által megadott másik értékhez, a 60 MPa-hoz, mely már a fröccsöntött műanyagokra vonatkozik.

A 3D nyomtató nem rendelkezett külső borítással, ami azért lehet gond, mivel a teremben létrejövő levegőáramlás befolyásolhatta volna a próbatest kinyomtatási paraméterét, azonban erre az eshetőségre figyeltem, és mindig zártam az ablakokat és ajtókat. Ha ez megtörtént volna, akkor a végeredmények valamilyen irányban egy kis százalékból eltértek volna. A 60 °C-os tárgyasztal csak az asztal síkja fölött pár centivel érvényesül, tehát magasabb tárgyak nyomtatásánál a tárgyasztal melegítő hatása már nem érvényesül, és a modell vetemedhet. Ilyen esetekben előnyös a zárt 3D nyomtató használata, mivel a nyomtató tér fix beállítható hőmérsékleten tartható.

5. Összefoglalás

Diplomadolgozatom célja, hogy hogyan változik a szakítószilárdság a nyomtatási hőmérséklet változásával, eredményesen zárult. A munkám során beigazolódott az a tény, hogy a nyomtatási hőmérséklet növekedésével egyre nagyobb szilárdság érhető el, amely 210 °C-nál csúcsosodik ki, mind a két orientáció esetén, mely a próbatesttel párhuzamos orientáció, illetve a próbatesttel merőleges orientáció.

Igazán valódi eredményeket nagyon nehéz meghatározni ennél a viszonylag újnak mondható technológiánál. A 3D FDM nyomtatás számos beállítási paraméterrel rendelkezik, amelyek kis eltérés esetén nagy változást produkálnak.

Az általam elvégzett vizsgálatok állandó 60 °C-os tárgyasztal mellett mentek végbe. A 100 %-os kitöltés mellett és 100 %-os tárgyhűtéssel. A teremben állandó 23 °C volt beállítva és 60 % páratartalom.

A munkám eredménye, miszerint a 210 °C hőmérsékletnél a szakítószilárdság a legnagyobb, valószínűleg más beállítási paraméterek mellett is elérhető.

Összességében elmondható, hogy az általunk kinyomtatni kívánt modelleket PLA alapanyagból 210 °C értékű hőmérséklettel célszerű nyomtatni 60 °C-os tárgyasztal mellett, hogy elérje a kívánt maximális szilárdságot. Azonban a paraméterek megváltoztatása, ezeknek a végeredményeknek is megváltoztatását is jelenti, de valószínűsíthető, hogy a kívánt szilárdságot biztosítani tudják, és nem fog tönkre menni.

5.1. Summary

The aim of my thesis, investigating how tensile strength changes with variations in printing temperature, has been successfully concluded. Throughout my work, it has been confirmed that an increase in printing temperature leads to higher strength, peaking at 210°C, for both orientations – parallel and perpendicular to the test specimen.

Obtaining truly definitive results is challenging in this relatively new technology. 3D FDM printing involves numerous configuration parameters, and even slight variations can produce significant changes.

The conducted tests were performed with a constant bed temperature of 60°C, 100% infill, and 100% object cooling. The room was maintained at a constant temperature of 23°C with a humidity level of 60%.

The result of my work indicates that the highest tensile strength occurs at a temperature of 210°C, and it is likely achievable with different parameter settings. In summary, for printing PLA material models, it is advisable to use a temperature of 210°C with a 60°C bed temperature to achieve the desired maximum strength. However, altering the parameters implies a potential modification of the final results, but it is probable that they can still ensure the desired strength without compromising the integrity of the prints.

6. Nyilatkozat nyilvános hozzáférésről és eredetiségről

NYILATKOZAT

Diplomadolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A Hallgató neve: Kénges Dániel László
A Hallgató Neptun kódja: GSVH42
A dolgozat címe: 3D nyomtatott alkatrészek vizsgálata
A megjelenés éve: 2023. ősz
A konzulens intézetének neve: Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdonkezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- ~ nem titkosított dolgozat a védést követően,
- ~ titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: 2023 év 10 hó 30 nap

Kénges Dániel László
Hallgató aláírása

7. Nyilatkozat konzulensi tájékoztatóról

NYILATKOZAT

Vérges Dániel László (név), (hallgató Neptun azonosítója: GSVH42)
konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védésre: javaslom / nem javaslom¹

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen / nem²

Kelt: Győr év 10 hó 30 nap


belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.

8. Irodalomjegyzék

- [1] Mózes András: *Gyors Prototípusgyártás* (2014.11.29). 4. o. letöltve: 2023.06.08.
- [2] 3D System: *Our Story*, olvasva: 2023.06.08.
Forrás: <https://www.3dsystems.com/our-story>
- [3] Dr Zsidai László, Varga Róbert: *Polyjet 3D nyomtatás polimer alapanyagai*
Letöltve: 2023.06.10
- [4] MG Studio: *FDM nyomtatás*, letöltve: 2023.05.31.
- [5] Zengo: *Az FDM/FFF nyomtatás folyamata*, (2023.05.03), letöltve: 2023.06.10.
Forrás: <https://zengo.eu/hu/blog/az-fdmfff-nyomtatas-folyamata>
- [6] RECREUS: *Filaflex vs 'All-metal' hotends* (2021.11.12.), olvasva: 2023.06.19.
Forrás: <https://recreus.com/gb/noticias/learn-with-recreus/filaflex-vs-all-metal-hotends>
- [7] Mózes András: *Gyors Prototípusgyártás* (2014.11.29.) 15. o. letöltve: 2023.06.08.
- [8] Toner Partner: *Hogyan válaszunk ki megfelelő filamenteket a 3D nyomtatóhoz?* (2020.08.27.), olvasva: 2023.06.08.
Forrás: <https://www.tonerpartners.hu/blog/hogyan-valasszuk-ki-a-megfelelo-nyomtatoszalakat-a-3d-nyomtatohoz-26766hu39018/>
- [9] Anycubic: *Top 5: Best 3D Printing Slicer For FDM Printers*, (2023.03.06.)
Forrás: <https://www.anycubic.com/blogs/3d-printing-guides/best-3d-printing-slicer-software/>; olvasva: 2023.06.27.
- [10] 43D Printers: *What Is Layer Height in 3D Printing?* (2023.06.18)
Forrás: <https://43dprint.org/layer-height-3d-printing/>; olvasva: 2023.06.27
- [11] 3D Prototypes And Models: *3D Printing Materials, Terminology and Specification*
Forrás: <https://3dprototypesandmodels.com.au/3d-printing-terminology-specifications/>; olvasva: 2023.06.28.
- [12] Easy 3D Home: *3D Printing Speed – what is it?* (2021.03.19)
Forrás: <https://www.easy3dhome.com/printing-speed/>; olvasva: 2023.06.26)
- [13] Dr. Szakál Zoltán: *Anyagismeret, Anyagvizsgálatok* (Gödöllő, 2015), olvasva 2023.06.30.

- [14] Zwick Roell: *Tensile Testing Machines and Testers*, olvasva: 2023.10.10.
Forrás: <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/universal-testing-machines-for-static-applications/tensile-tester/>
- [15] Dr. Hargitai Hajnalka: *Polimerek anyagvizsgálata 2.* Széchenyi István Egyetem
Letöltve: 2023.07.01
- [16] ISO 527-1:2019: *Plastics – Determination of tensile properties* (2019.07.)
Letöltve: 2023. 09.11.
- [17] M. Csizmadia Béla, Nándori Ernő (2003): *Mechanika Mérnököknek: Modellalkotás*
Budapest, Nemzeti Tankönyvkiadó. Olvasva: 2023.09.17.
- [18] Geeetechh A20M 3D printer: *User Manual* olvasva: 2023.10.24. 7. o.
- [19] Geeetech: *A20M 3D printer* olvasva: 2023.10.20.
Forrás: https://www.geeetech.com/wiki/index.php/Geeetech_A20M_3D_printer
- [20] Molnár Marcell Ferenc (2021): *Alkatrész előállítás lehetősége FDM 3D nyomtatással*, Miskolci egyetem, Diploma munka (olvasva: 2023.10.17.)

9. Mellékletek

1. melléklet:

Solid Edge 2020 3D tervezőprogram

2. melléklet:

UltiMaker CURA 5.3.1.

3. melléklet:

Mahmoud Sobhy Elagha: *Designing the 3D printing of a part*

4. melléklet:

Rawabe Fatima Faidalla; Muammel M. Haonon; Varun Vashist; Dr. Zoltán Szakál:
Effect of Different Standard Geometry Shapes on the Tensile Properties of 3D-Printed Polymer

5. melléklet:

Wuhu R3D Technology Co., Ltd.: Technical Data Sheet: *R3D PLA Filament*



Wuhu R3D Technology Co., Ltd.

Add: Fanchang Economic Development Zone, Wuhu, Anhui, China

Tel: 0086-057488037579

Web: www.r3dprinter.com

Email: sales@china3dprinter.cn

Technical Data Sheet

R3D PLA FILAMENT

Date: 10.11.2021

Dimensions	
Size	1,75 mm
Tolerance	± 0,02 mm
Thermal Features	
Printing Temperature	190-220°C
Platform Temperature	40-60°C
Thermal Deformation Temperature	61.5°C
Physical Features	
Length Per Roll	340M
Density	1.21g/CM ³
3D printing 100% Filling Tensile Strength	≥35Mpa
Injection Tensile Strength	≥60Mpa
Elongation At Break	4.3-5.8
Melt Flow Rate	6-8g/10min
Packing Features	
Packing Method	Vacuum Sealing + Desiccant
Color Box Size	21*21*6.5CM
Net Weight	1000g
Gross Weight	1350g
Storage	
Cool and dry (15-25°C) and away from direct sun light. This will enhances the shelf life.	

10. Köszönetnyilvánítás

A diplomadolgozatom végén szeretném megköszönni a belső konzulenseim kimagasló segítségét: Madarász István mestertatárnak, valamint Dr. Szakál Zoltán egyetemi docensnek. Az elmúlt két félévben sokat segítettek abban, hogy a Diplomadolgozatomat el tudjam kezdeni egy olyan szakterületen, ami érdekes számomra, és amit be is tudtam fejezni.

Köszönöm a segítséget a kollégáimnak az Eagle Industry Kft.-ben, akik a munka mellett segítettek a Diplomadolgozatom minőségi javításában és felépítésében.

Köszönöm szépen azon tanároknak a támogatását, akik a Műszaki Fejlesztő szakirányon végigkísértek engem, és kollégáimat a tanulmányaink során; valamint a Műszaki Intézet tanárainak és dolgozóinak a több éves munkáját.