



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Mechatronikai Mérnöki BSc Szak

**3D nyomtatott rétegek tapadásvizsgálata különböző
paraméterek alapján**

Belső konzulens: Dr. Pataki Tamás István
Egyetemi docens

Készítette: Kondrák Mihály
PP9CWI
nappali tagozat

Intézet/Tanszék: Műszaki Intézet

Gödöllő
2025

MŰSZAKI INTÉZET
SZAKMÉRNÖK / SZAKEMBER
Gépipari mechatronika specializáció (BSc)

SZAKDOLGOZAT (BSC)
feladatlap

Kondrák Mihály (PP9CWI)

részére

A szakdolgozat (bsc) címe:

3D nyomtatott rétegek tapadásvizsgálata különböző paraméterek alapján

Feladatkiírás:

Bevezetés, szakirodalom feldolgozás, Probléma bemutatása, vizsgált paraméterek alapján próbatestek 3D nyomtatása, próbatesteken mechanikai vizsgálatokat elvégzése, eredmények ismertetése, összefoglalás és javaslattevél.

Közreműködő tanszék: Anyagtudományi- és Gépipari Folyamatok

Külső konzulens:

Belső konzulens: *Dr. Pataki Tamás István, egyetemi docens, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézet*

Beadási határidő: 2025. november 04

Gödöllő, 2025. szeptember 08

Jóváhagyom



(tanszékvezető)



(szakfelelős)

Átvettem



(hallgató)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2025.

(külső konzulens)

Tartalom

1.	Bevezetés.....	5
1.1.	A téma jelentősége	5
1.2.	Célkitűzés	5
2.	Szakirodalmi áttekintés	6
2.1.	3D nyomtatási technológiák	6
2.1.1.	Szálhúzásos 3D nyomtatás (FDM - Fused Deposition Modeling).....	6
2.1.2.	Vat fotopolimerizációs nyomtatás.....	7
2.1.3.	Poralapú nyomtatás	11
2.1.4.	Digitális viasz nyomtatás és precíziós öntés.....	13
2.2.	Anyagok a 3D nyomtatási technológiához.....	14
2.2.1.	Polimerek és azok kompozitjai	14
2.2.2.	Fémek és kerámiák.....	15
2.3.	A rétegtapadás szerepe a 3D nyomtatásban.....	15
2.3.1.	A nyomtatást befolyásoló paraméterek	16
2.4.	Mechanikai tulajdonságok vizsgálata.....	19
2.4.1.	Szakítóvizsgálat (Tensile Testing).....	20
2.4.2.	Hajlítóvizsgálat (Flexural Testing).....	20
2.4.3.	Törésvizsgálat (Fracture Toughness)	20
2.4.4.	Peel teszt	21
2.4.5.	Nyíróvizsgálat (Shear Testing)	21
3.	Anyag és módszer.....	22
3.1.	A vizsgált anyag.....	22
3.2.	Nyomtatási paraméterek.....	24
3.2.1.	A vizsgált paraméterek	24
3.2.2.	A nyomtató és a nyomtatási környezet ismertetése	24
3.3.	Próbatestek kialakítása és modellezése	26
3.4.	Nyomtatási folyamatok	28

3.4.1.	Próbatestek jelölése	31
3.5.	Nyomatott testek rétegfelületeinek vizsgálata	32
3.6.	Mechanikai tesztek elvégzése	35
3.6.1.	Az elvégzett szakítóvizsgálat folyamatának ismertetése	35
3.6.2.	Az elvégzett hajlítóvizsgálat folyamatának ismertetése	37
4.	Eredmények kiértékelése.....	39
5.	Gazdasági számítás	44
6.	Összefoglalás	45
6.1.	Javaslattétel	45
7.	Summary	46
8.	Nyilatkozat	47
8.	Irodalomjegyzék	51
9.	Melléletek	56
	57

1. Bevezetés

1.1. A téma jelentősége

A 3D nyomtatás, az elmúlt évtizedekben a modern ipari termelésben és a kutatási területeken egyaránt jelentős fejlődésen ment keresztül. Az eljárás lényege, hogy digitális modellek alapján, rétegről rétegre építünk fel fizikai objektumokat, így lehetővé téve olyan bonyolult geometriájú szerkezetek előállítását, amelyeket hagyományos gyártási módszerekkel csak nehezen vagy egyáltalán nem lehetne megvalósítani. A technológia előnyei közé tartozik a rövid gyártási átfutási idő, az anyagveszteség minimalizálása, a költség- és energiahatékonyság, valamint a gyors prototípusgyártás lehetősége. Ezeknek és további nem említett kiemelkedő előnyöknek betudható a technológia széles körű alkalmazása, mivel manapság a 3D nyomtatás megtalálható az autóiparban, vegyiparban, egészségügyben vagy akár a repüléstechnikában is.

Azonban a legnagyobb kihívás a 3D nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságainak és megbízhatóságának biztosítása. Mivel egy nyomtatott tárgy rétegekből épül fel, ezért kulcsfontosságú tényező a rétegek közötti tapadás minősége és annak vizsgálata. A nem megfelelő rétegtapadás a szerkezet gyengüléséhez, repedések kialakulásához vagy akár töréshez vezethet. Ezen problémák elkerülésének érdekében, azoknak a nyomtatási paramétereknek az optimális beállításai szükségesek, amelyek hatással vannak tapadás minőségére. Ilyen paraméter lehet például a nyomtatási hőmérséklet, a nyomtatási sebesség, a rétegvastagság vagy akár a hűtés. Ezekon felül még számos tényező van, amelyek mind hatással vannak a rétegek közti adhézió minőségére, emiatt fontos ezek hatásának részletes vizsgálata a rétegek közötti tapadásra és az ebből következő mechanikai tulajdonságokra.

1.2. Célkitűzés

A dolgozat célja, hogy vizsgálja a 3D nyomtatott rétegek közötti tapadást befolyásoló paramétereket, részletesebben a rétegvastagságot és a kitöltési sebességet. A kiértékelésből meghatározza, mely beállítási formátum járul hozzá leginkább a nyomtatott szerkezetek mechanikai szilárdságának növeléséhez. Ennek érdekében különböző nyomtatási beállítások mellett készült mintadarabok rétegtapadását vizsgálom különböző mechanikai tesztekkel, és az eredményeket összehasonlítom. A kutatás célja, hogy következtetéseket tudjunk levonni a paraméterek optimalizálásával kapcsolatban, amelyek hozzájárulhatnak a 3D nyomtatott szerkezetek minőségének javításához.

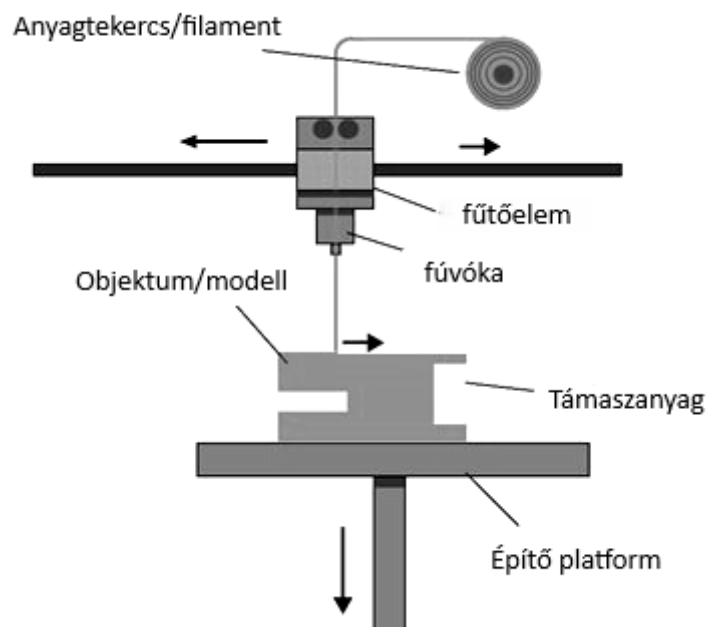
2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. 3D nyomtatási technológiák

3D nyomtatási eljárások során többféle technológiát különböztethetünk meg, amelyek eltérő elven működnek és akár különböző anyagokat is használhatnak a nyomtatás során. Több alapvető formázási típusra lehet őket csoportosítani, például anyagextrudálási, Vat (kádas) fotopolimerizációs, irányított energiadepozíciós, anyagsugaras nyomtatás, valamint por alapú technológiára. Minden típus több, különböző nyomtatási technikát foglal magában, amelyeknek mindegyike egyéni jellemzőkkel rendelkezik. [Song, Wenqi et al., 2025] Ezek közül a leggyakrabban alkalmazott nyomtatási típusoknak a működései, felépítései és azok sajátos jellemzői kerülnek bemutatásra az alábbiakban.

2.1.1. Szálhúzásos 3D nyomtatás (FDM - Fused Deposition Modeling)

A 3D nyomtatás egyik legismertebb és legtöbbet alkalmazott formája az extrudálásos nyomtatás. Ebbe a nyomtatási típusba tartozik bele az úgy nevezett Fused Deposition Modeling (FDM), más néven Fused Filament Fabrication (FFF). Ez az eljárás egy rétegelt gyártási folyamat, mivel egy digitálisan le modellezett tárgyat rétegről rétegre képes felépíteni. A 2.1 ábra szemlélteti működési elvét és felépítését, amiktől egyszerű additív technológiának tekinthető, mégis rendkívül hatékonynak.



2.1. ábra FDM nyomtatás elvi felépítése és működése [Forrás: Haghsefat, Kianoush, and Liu Tingting., 2020]

Az FDM típusú nyomtatás során hőre lágyuló műanyag filamentek kerülnek felhasználásra. Ilyen fajtájú műanyagok lehetnek a következők, például az akrilnitril-butadién-sztirol (ABS), politejsav (PLA) polietilén-tereftalát (PET) vagy akár a poliamid (PA). [Song, Wenqi et al., 2025]. Ezek polimerek alacsony olvadásponttal rendelkeznek, viszont vannak olyanok, amelyek magas olvadásponttal rendelkeznek, mint például a PEEK. Az FDM nyomtatás során ezeket a polimereket szál formájában, egy úgy nevezett extrúderen keresztül megolvasztanak, majd a nyomtatófej mozgásának szabályozásával egy adott platformra rétegenként lehelyezik. Amint a nyomtatófejből a megolvasztott anyag kijut, az igen gyorsan lehül és megszilárdul. [Kothandaraman et al., 2024]

Két réteg közötti kapcsolódás, tapadás elsősorban a hőhatásra történő részleges újra megolvadás és diffúzió révén alakul ki, azaz műanyagok esetében, a polimerláncok hőmozgásuk és flexibilitásuk révén lassan összekapcsolódnak egymásba a rétegek között, ezáltal létrehozva stabil kötést. Ha a rétegek között nincs megfelelő erősségű kötés, a nyomtatott rész mechanikai szilárdsága, különösen a rétegek közötti irányban, jelentősen csökken, és szétcsúszás léphet fel a kötésben, ami repedéshez, töréshez vezet. [Yang, Xiaoyu, et al., 2024] Ennek elkerülése, tehát egy megfelelő kötés létrehozása, a nyomtatási paraméterek precíz beállításával történhet meg.

Népszerűségüket az FDM technikán alapuló nyomtatók, annak köszönhetik, hogy könnyen kezelhetők, költséghatékonyak, széles az anyagválaszték és tökéletes minőséget biztosít professzionális felhasználóknak és hobbi felhasználóknak is egyaránt, ha a beállítások megfelelőek. Ebből adódóan származnak a hátrányai is, hiszen ez az additív technológia erősen paraméterfüggő, így tervezést és hozzáértést igényel.

2.1.2. Vat fotopolimerizációs nyomtatás

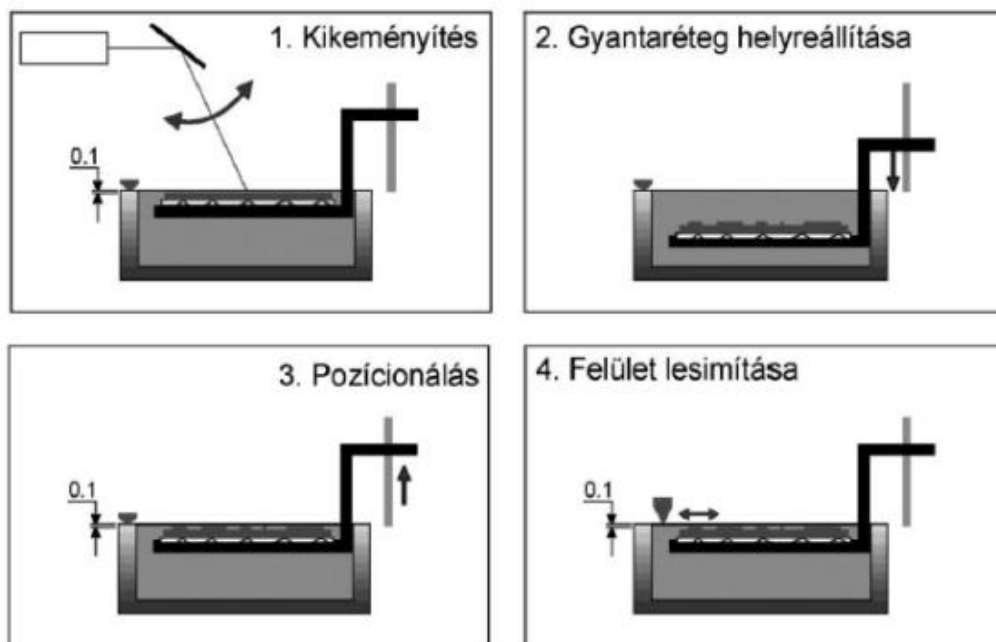
Elve a fotopolimerizáción alapszik, azaz egy olyan folyamaton, amely során gyantát használnak, ami képes a fény hatására megszilárdulni. Ezeknek a fényérzékeny gyantáknak polimerizációja kizárólag az UV-sugárzás hatására következik be. Egy szerkezet felépítése az FDM nyomtatáshoz hasonlóan rétegről rétegre történik, azonban a fotopolimerizációs technológiáknak mégis hatalmas előnye van a rétegek közti tapadásban, mivel mikor az egyik gyanta réteg rákerül a másikra, majd megtörténik a polimerizáció, a UV nem csak a friss gyantát szilárdítja meg, hanem behatol a már megszilárdult rétegbe, így a rétegek között egy kémia keresztkötés tud végbe menni, azaz kovalensen tudnak összekapcsolódni egymással, ezzel biztosítva az izotróp szerkezetet, miközben makroszkopikus üregek vagy szemcseszerkezetek

nem alakulnak ki. [Barbosa, Isabel SO, et al. 2025] Ez a kötés erősebb tapadást biztosít, mint a szálhúzásnál található diffúzió, ebből adódik, hogy a vat fotopolimerizációs technikával nyomtatott szerkezetek mechanikai szilárdsága nagyobb, mint az FDM-mel nyomtatottaké, persze itt is vannak tényezők melyek hatással vannak erre, viszont ezek a paraméterek típusonként változnak.

SLA - Stereolithography

Az additív gyártási folyamat legrégebbi fajtája a stereolithography, rövidítve SLA. Kezdeté az 1980-as évekhez vezethető vissza, mikor is ez volt az első, a kereskedelmi forgalomban is megtalálható 3D nyomtatási technológia. [Song, Wenqi et al., 2025] Tulajdonságainak köszönhetően manapság a repülőgépiparban és az orvostudományban is egyaránt alkalmazzák. [Sharba, M. M. H., 2022]

Működését az 2.2 ábra mutatja. Az SLA nyomtatás során, a már említett UV-fény játszik nagy szerepet, hiszen ez vált ki láncreakciót a gyanta- vagy monomeroldat egy rétegében. A folyamat következtében az UV-lézer meghatározott irányban kezdi el polimerizálni a fényérzékeny anyagot, melynek hatására egy két dimenzióban mintázott megszilárdult réteg jön létre.



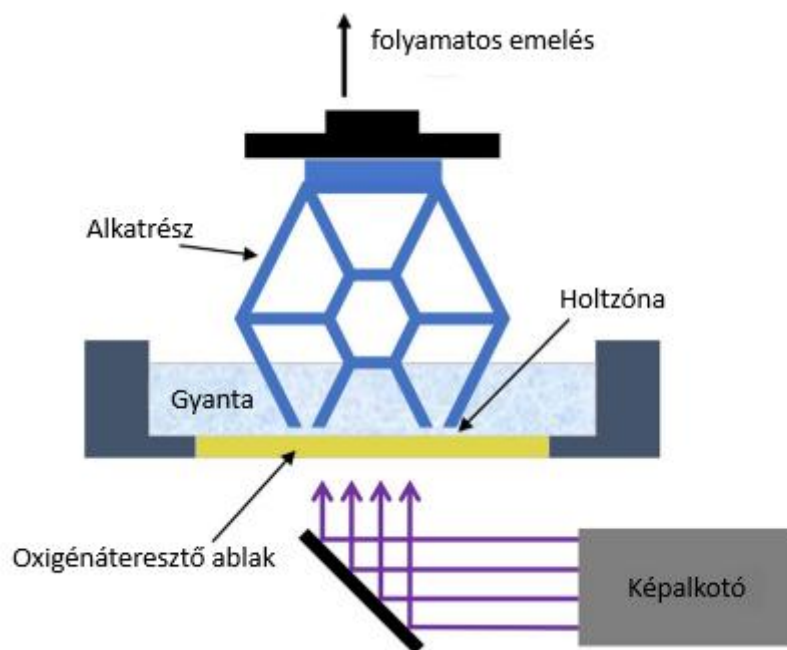
2.2. ábra SLA típusú nyomtatás (Forrás: Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata 4., 2017)

A meg nem sugárzott területek folyékonyak maradnak. Az eljárás során a fotopolimer gyanta egyenletesen kerül felhordásra a platformra, ami egy réteg megszilárdítása után egy kicsit megsüllyed, ezzel újabb területet adva a következő gyanta réteg felhordásához. A folyamat addig fog ismétlődni, amíg a teljes modell el nem készül. [Song, Wenqi et al., 2025]

Az SLA nyomtatásnál a tapadás erőssége függ tehát a gyanta minőségétől, a lépésmagasságtól, a kikeményedési mélységtől és a sugárzás mértékétől, hiszen, ha a besugárzás túl gyenge, akkor kevés keresztkötés alakul ki, ami gyenge tapadást eredményez, viszont a túl nagy a besugárzás torzulást okozhat. [Gojzewski, Hubert, et al., 2020 és Zhao, Zeang, et al., 2016]

DLP - Digital Light Processing

A Vat (kádás) polimerizáció egy másik típusa a DLP (Digital Light Processing) nyomtató. A 2.3 ábra mutatja be, hogy a működési elve és felépítése hasonló a SLA technológiához, azonban egyetlen nagy különbségről még is beszélhetünk a két technika között. A nyomtatáshoz használt fényforrásról, hiszen a DLP 3D nyomtatásnál, a megvilágítás egy speciálisan kifejlesztett, a munkaterület alá helyezett digitális fényvetítővel, „projektorral” történik. Ennek a digitális fényvetítő rendszernek köszönhető a rétegről rétegre történő megszilárdulás. A projektor által a teljes gyantaréteget képes megkötni egyszerre, míg az SLA csak pontonként képes elvégezni



2.3. ábra A DLP nyomtatás elvi felépítése és működése

(Forrás: Miramini, Saeed, et al., 2020)

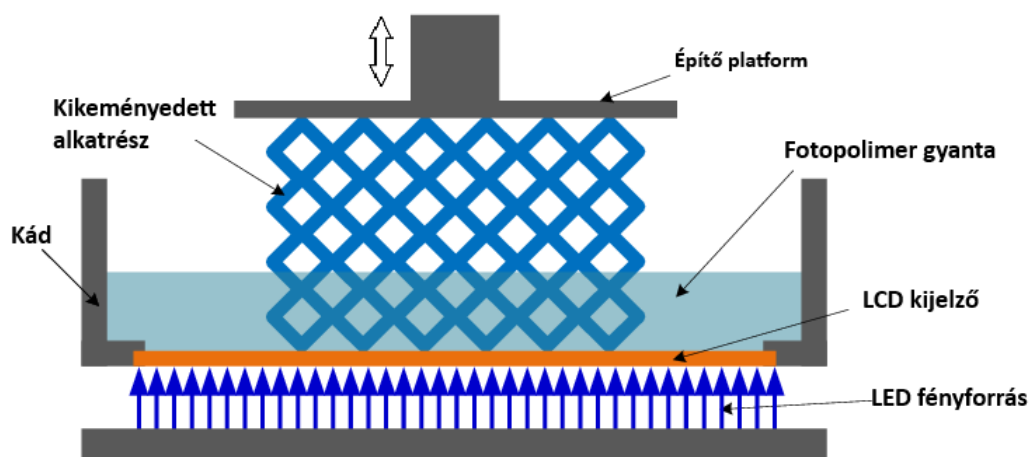
a polimerizációt. [Song, Wenqi et al., 2025] Ahhoz, hogy a teljes réteg kikeményíthető lehessen egyidejűleg, be van építve egy digitális mikrotükör eszköz (DMD), aminek feladata a fény irányítása. Ebből adódóan a DPL az egyidőbeli teljes réteg megsugárzása miatt jelentősen gyorsabb nyomtatást tesz lehetővé, mint a SLA. [Kadry, Hossam, et al., 2019]

A DPL típusú 3D nyomtató nyomtatási minősége, függ az SLS nyomtatóknál megfogalmazott paraméterektől, továbbá nagyban függ a projektor vetítési felbontásától. Ha egy olcsóbb

gyengébb projektorra dolgozunk, akkor annyival gyengébb nyomtatást is kapunk. Ezzel ellentétben egy gyengébb alkatrészekkel rendelkező SLA nyomtató is jobb felbontásra képes, hiszen keskenyebb lézersugarakkal dolgozik. Felhasználását tekintve a DLP nyomtatókat, az SLA nyomtatókhoz hasonlóan orvosi eszközök gyártására és implantátumok megalkotására alkalmazzák, továbbá használják precíziós ipari alkatrészekhez, például elektronikai és mechanikai komponensek gyártásához. [Kadry, Hossam, et al., 2019]

LCD - Liquid Crystal Display

A műgyanta nyomtatás egy további formája az LCD technológia, más nevén MSLA (Masked Stereolithography Apparatus). Ez a technika LCD-képernyőt használ a maszk elkészítéséhez, ahelyett, hogy olyan eszközöket kelljen beépíteni, amelyek a fény irányításáért felelősek, mint például a DLP nyomtatásnál használatos DMD chippek. Ebből adódóan az LCD költséghatékonyabb megoldást kínál, mint társai, nagy felbontással és rövid gyártási idővel. [Tang, Jui-Fu, et al., 2025] A 2.4 ábra bemutatja, hogy a rendszer felépítését tekintve a kijelző, a gyantatartály és a LED fényforrás között helyezkedik el.



2.4. ábra LCD nyomtatási technológia felépítése

[Forrás: Zhu, Zhengbo., 2023]

A kijelző a nyomtatási folyamat során egy adott mintát vetít ki, lehetővé téve, hogy a fény az alsó fényforrásból behatoljon. A gyantatartályban lévő folyékony fényérzékeny polimer kikeményítésére közel-ultraibolya fényforrást használnak, amelynek hullámhossza körülbelül 405 nm. [Gao, Hongwei, et al., 2023]

Ennél az eljárásnál viszont találkozunk rétegtapadási problémákkal, amelyek kihatnak értelemszerűen a mechanikai tulajdonságokra. Az LCD-panelek pixelekből álló mátrixból állnak. A pixelek állapota határozza meg, hogy a fény hol halad át és hol nem. [Gao, Hongwei, et al., 2023] A mátrixok viszont rendelkeznek úgynevezett holt zónákkal. Ezek a zónák minden

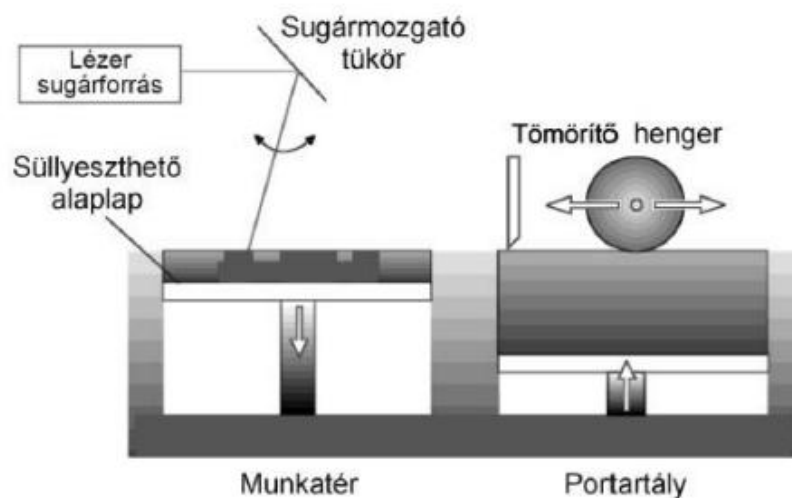
esetben akadályként működnek az UV-fény számára, emiatt hiányos tapadás alakul ki a rétegek között, amik a fényérzékeny gyanta elégtelen megszilárdulását eredményezik, ez viszont durva felülethez és gyenge mechanikai tulajdonságokhoz vezet. [Tang, Jui-Fu, et al., 2025]

2.1.3. Poralapú nyomtatás

A porágyas nyomtatás egy olyan additív gyártási (AM) módszer, amely rendkívül finom porok vékony rétegeit használja, amelyeket szorosan kell elosztani és tömöríteni egy platformon. Ebbe a típusba tartozik bele az Electron Beam Machining (EBM), a Selective Laser Melting (SLM) a Selective Laser Sintering (SLS) és a Binder Jetting is. [Sharba, M. M. H., 2022], Az eljárás lényege azon alapszik, hogy a vékony porréteget egyetlen szilárd réteggé alkossák. A teljes szilárdság elérése minden esetben szinterézissel történik, azonban a különböző porágyas technikák más folyamatot követnek, így a rétegek közötti adhézió is különböző úton jön létre. [Ahmed, Naveed., 2019]

SLS - a Selective Laser Sintering

Az 2.5 ábra ábrázolja a SLS nyomtatók működését, ami, mint a nevében is olvasható, lézer technikán alapszik. Ennek a gyártási folyamatának során a vékony porréteget előmelegítik az olvadáspontja alatti hőmérsékletre, ami megkönnyíti, hogy a lézer a porágy meghatározott



2.5. ábra Az SLS nyomtatók elvi felépítése (Forrás: Magyar Mérnöki Kamara Kiadványsorozata 4., 2017)

területein a hőmérsékletet olyan szintre emelje, amely szilárd részek kialakulását teszi lehetővé. Összegezve, egy szén-dioxid (CO₂) alapú lézerrel elvégzik a szinterézist, így a hőenergia hatására a porszemcsék összeolvadnak és réteget képeznek. Miután a szinterézése sikeresen megtörtént és kialakult az első réteg, akkor a panel egy szinttel lentebb mozdul és egy újabb

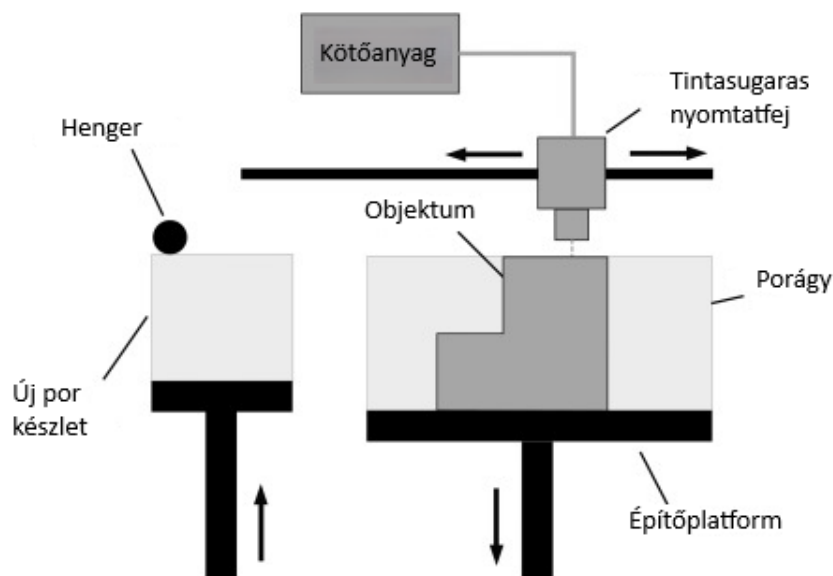
porréteg kerül szétterítésre és olvasztásra. Ez a folyamatsor ismétlődik, mindaddig, amíg a teljes modell el nem készül. [Song, Wenqi et al., 2025]

Két réteg tapadása az alábbiak szerint történik. Amikor a lézer átmegegy a friss rétegen, az energia egy része az alatta lévő réteget is újra felmelegíti, így a két réteg között diffúziós zónák és részleges összeolvadás jön létre. Ezeknek a rétegeknek a vastagsága jellemzően közel 0,02-0,1 mm között van. A tapadás minősége és rétegvastagság függhet a nyomtató lézérének teljesítményétől, a nyomtatási hőmérséklettől, a felhasznált por típusától, szemcseméretétől vagy akár a pásztázási sebességtől. [Ahmed, Naveed., 2019]

BJ - Binder Jetting

A Binder Jetting technológia egyike az elmúlt években legtöbbet fejlődő additív gyártási folyamatoknak. Az eljárás során egy olyan technikai folyamat megy végbe, miszerint a nyomtatófej szelektíven juttat folyékony kötőanyagot egy porágyra, hogy egy kétdimenziós mintát képezzen egy rétegen. [Choi, Jong-Han, et al., 2025] A kötőanyag cseppek formájában átnedvesíti a port és hidat képez a szemcsék között. A rétegek így kialakítanak egy úgy nevezett „zöld testet” (green body), amely még nem végső szilárdságú, de megtartja az alakot.

A teljes folyamatot a 2.6 ábra szemlélteti. Első lépésként egy porágy-rendszer vékony porréteget visz fel a nyomtatási platformra. Miután megtörtént a por felvitele, egy tintasugaras



2.6. ábra Binder Jetting nyomtatás elvi felépítése és működése
(Forrás: Pontes, A. J., 2021)

nyomtatófej folyékony kötőanyagot juttat a por előre meghatározott területeire. Minden újabb réteg, hozzá tapad az előzőhöz, mert a friss kötőanyag részben átszivárog az alatta lévő réteg pórusaiba, létrehozva a vertikális összekapcsolódást. Általánosságban a részecskék közötti

kötési módokat két csoportba sorolják, az In-Liquid és az In-Bed kötés. Az első esetben a kötőanyag teljes egészében a kilövelt folyadékban található. A második esetben egy reológiaiailag egyszerű folyadékot nyomtatnak, amely kölcsönhatásba lép a porágyban elhelyezett száraz ragasztórészecskékkal. A részecskék közötti kötések hidratáció hatására jönnek létre. Az In-Liquid módszer, szerves keresztkötő anyagot tartalmaz, amely hő hatására le bomlik az utófeldolgozás során, és kevés maradékot hagy hátra. Az In-Bed kötési mechanizmus ragasztóanyagait általában feloldódnak, és üregeket hagyhatnak a szerkezetben. Ezért ez a kötési megoldás nem kedvező nagy szilárdságú tárgyak előállításához. [Ziaee, Mohsen, and Nathan B. Crane., 2019]

Mint már kiderült elengedhetetlen az utófeldolgozás, hiszen kezdetben csak összekötött porszemcsékről beszélhetünk. Ennél lépésnél távolítják el a felesleges port, illetve ekkor szinterezik vagy impregnálják a tárgyat. Ilyenkor fognak a részecskék diffúzióval összeolvadni, ezzel létrehozva a végső rétegtapadást. [Ziaee, Mohsen, and Nathan B. Crane., 2019]

2.1.4. Digitális viasz nyomtatás és precíziós öntés

A viasz az egyik legrégebben használt termoplasztikus anyag, amit az alakítható és megmunkálható tulajdonságai miatt előszeretettel alkalmaznak öntődékben. A precíziós öntésnél leggyakrabban használt viaszok: kőolaj alapú viaszok, természetes és szintetikus viaszok, valamint ezek keverékei. A bonyolultabb és nagyobb tárgyak iránti igény, a viaszminták és mintakészítési folyamat fejlesztéseihez vezetettek, például a viasz polimerekkel való keveréséhez vagy a 3D nyomtatás behozatalához. [Szabó, László, et al., 2022]

Amikor a 3D nyomtatást öntészeti minták előállítására használják, akkor azt a gyártási folyamatot már gyorsított öntészeti eljárásnak nevezik. Ez egy komplex gyártási eljárás, ami ötvözi a digitális viasznyomtatást és a precíziós öntést. [Mukhtarkhanov, et al., 2022]

A gyártási folyamat során, a hagyományos minta készítést felváltotta a 3D nyomtatás és az általa megalkotott öntőformák. Azonban a viasz használata számos problémát vet, hiszen a nem elég rugalmas ahhoz, hogy 3D-nyomtatási filamentként használhatók legyenek. A rugalmassági modulus (Young-modulus), folyáshatár és húzószilárdság túl alacsony ahhoz, hogy a 3D-nyomtatóban törés nélkül feldolgozhatók legyenek. Az keverés nélküli viaszok reológiai tulajdonságai nem alkalmasak a 3D-nyomtatásra. Ezért a nyomtatáshoz megfelelő precíziós öntésnél használatos viaszok előállításához a mechanikai és reológiai tulajdonságokat úgy kell módosítani, hogy a fenti hátrányok kiküszöbölhetőek legyenek. [Szabó, László, et al., 2022] A megfelelő tulajdonsággal rendelkező viasz alapú keverékeket akár filament formában FDM

technológiával vagy polimerizációs technikával is lehet nyomtatni, amik alacsonyabb költségeket és egyszerűbb gyártási folyamatokat biztosítanak. [Mukhtarkhanov, et al., 2022]

A viasz nyomtatást követően a megszilárdult formát, ami a kész fém termék kissé nagyított mása, kerámiával bevonják, hogy a nyomtatott forma köré egy kerámiahéj alakuljon ki, amit a későbbiekben mérsékelt hőmérsékleten felhevítsenek, hogy a viaszt eltávolítsák. [Mukhtarkhanov, Muslim, et al., 2024] Ezután a megolvasztott fémet a viasz eltávolítása után keletkezett kerámia formába öntik, majd a megszilárdulást követően abból eltávolítják, ezzel létrehozva a fém alkatrészt.

2.2. Anyagok a 3D nyomtatási technológiához

Az additív gyártási eljárások fejlődésének egyik legfontosabb indokaként az anyagválaszték bővítése szolgált. Napjainkban a 3D nyomtatással készült termékek anyagpalettája rendkívül széles. A polimerektől és azok kompozitjaitól kezdve a kerámiákon és fémeken át egészen a különleges, nem hagyományos alapanyagokig, mint például cukor vagy csokoládé. [Sharba, M. M. H., 2022] Már lehetőség van fémekből és kerámiákból is funkcionális alkatrészek gyártása, azonban a legnagyobb szerepet továbbra is a polimerek és azok kompozitjai töltik be, hiszen kedvező feldolgozhatóságuk, sokoldalúságuk és viszonylag alacsony költségük miatt a legtöbb additív gyártási technológia elsődlegesen ezekre épül. [Shahrubudin, N. et al., 2019]

2.2.1. Polimerek és azok kompozitjai

A polimerek előfordulása több különböző formában történik, mint ahogy az már a fentiekben is említésre került. Lehetnek filamentek, azaz termoplasztikus szálak, lehetnek gyanták vagy akár porok. Az FDM eljárás során részletezésre került, hogy filamentel történik a nyomtatás, és hogy rengeteg típusa van, például PLA, ABS, vagy PEEK. Ezeket tekintve az ABS az egyik legnépszerűbb, ugyanis tulajdonságait figyelve kiemelkedő szilárdsággal, merevséggel rendelkezik, illetve kiváló szigetelő tulajdonsággal is egyaránt. Az ABS sűrűsége $1,07 \text{ g/cm}^3$, míg az olvadáspontja $221\text{--}240 \text{ }^\circ\text{C}$ között található. [Manola et al., 2023] A PLA környezetbarát, ugyanis természetes alapanyagokból állítják elő, viszont a mechanikai jellemzői kevésbé megbízhatóak. Ennek ellenére mégis a szélesebb körben használt biológiai alapú polimerek közé tartozik. Könnyen megmunkálható, továbbá tiszta felületet biztosít. Olvadáspontja $190\text{--}220\text{ }^\circ\text{C}$ között van. [Memiş et al., 2025] Az utóbbi időben elterjedtté váltak azok a filamentek, melyek magasabb olvadásponttal rendelkeznek, mint például a PEEK vagy a PMMA. A PEEK egy félig kristályos hőre lágyuló polimer, amely kiváló mechanikai és kémiai ellenálló képességgel rendelkezik, és ezeket a tulajdonságokat magas hőmérsékleten is megőrzi. Young-

modulusa 3,6 GPa, szakítószilárdsága pedig 90–100 MPa tartományba esik. Üvegesedési hőmérséklete körülbelül 143 °C. [Gunatillake, P. A., & Adhikari, R., 2016]

Kompozit filamentekről akkor beszélünk, amikor egy alap termoplasztikus anyagot, például ABS, kombinálunk egy másik anyaggal. Erre azért van szükség, hogy egy általános ABS filamentnek a mechanikai korlátjait leküzdjük és azokat erősítsük. Ezeket a kompozit filamenteket a töltőanyagok jellege alapján három fő kategóriába lehet sorolni: szénelapú anyagok, fémrészecskés és kerámiaporos. [Hosseinzadeh, M. H. et al., 2025] Szénszálas kompozitok esetén nagyobb szilárdsággal, merevséggel fog rendelkezni a nyomtatott objektum, miközben súlya minimálisan fog változni. Ilyen kompozitokat alkalmaznak autó- és repülőgépiparban is egyaránt. [Gregor-Svetec, D., 2022] Ezekre néhány példa: Carbon Fiber PLA (CF-PLA), Carbon Fiber Nylon (CF-Nylon), Carbon Fiber PEEK (CF-PEEK). Fémmel töltött kompozitok esetében magasabb sűrűség nyerhető, viszont nehezebb tárgyakat eredményez. Kerámiaporos kompozitoknál elsősorban a hőálló képesség javul, így ezeket magas hőmérsékletű környezetben alkalmazandó alkatrészek esetében használnak. [Hosseinzadeh, M. H. et al., 2025]

2.2.2. Fémek és kerámiák

A fémek lehetővé teszik komplex struktúrájú alkatrészek gyártását nagy szilárdság mellett, úgy, hogy csökkentik a gyártási költségeket a hagyományos eljárásokkal szemben. [Wang, Lipeng, et al., 2025] A leggyakrabban használt módszer fémek 3D nyomtatásához a porágyas nyomtatás. Népszerű típusa a SLM nyomtatás, aminél lézerrel olvasztják meg a fémporokat. Ezzel a technikával számos fémes anyag, például titán és ötvözetei, rozsdamentes acélok, szerszámacélok, nikkelalapú ötvözetek, valamint néhány alumíniumötvözet is nyomtatható. [Sharba, M. M. H., 2022]

A kerámiák kiváló mechanikai, kémiai és hőálló tulajdonságokkal rendelkeznek, mint például nagy szilárdság, jó hőállóság, korrózió és kopásállóság. Egyes típusoknál biokompatibilitásról is beszélhetünk. A kerámiák ezen tulajdonságai végett vonzóak a különböző gyártástechnológiák és gyógyászat számára, emiatt kutatásuk is jelentős figyelmet kap. [Zhang, Feng, et al., 2025]

2.3. A rétegtapadás szerepe a 3D nyomtatásban

Rétegről rétegre történő nyomtatási technikák során, például Fused Deposition Modeling (FDM), a rétegek közötti tapadás az, ami a legnagyobb behatással van a nyomtatott szerkezetek mechanikai szilárdságára, tartósságára és minőségére. A rétegek közötti megfelelő, erős tapadás

elengedhetetlen ahhoz, hogy a nyomtatott tárgy a kívánt minőségű mechanikai tulajdonságokkal tudjon rendelkezni. Ha nem megfelelő a tapadás, akkor a nyomtatott szerkezet olyan pontokkal fog rendelkezni, amelyek gyengíteni fogják a tárgy szilárdságát. Ezeknél a pontoknál a nagyobb terhelések esetén törések, repedések vagy deformációk jöhetnek létre, amelyek olyan iparágaknál, mint repülőgépipar, autópár vagy egészségügy komplikációt okozhatnak.

Az előbbieken már említésre került, hogy a gyenge tapadás rossz mechanikai tulajdonságokat eredményez, de e mellett rossz minőségű végtermékekhez is vezet. Nem lesz egyenletes a felület és nem lesz elég részletgazdag az objektum. Ezek a hibák piaci szinten veszteségeket okoznak, melyek elkerülése elsődleges kereskedelmi szempontból. Ezen hibák elkerülésének érdekében a sikeres nyomtatáshoz a megfelelő paraméterek kiválasztása és a megfelelő anyaghasználat szükséges. Az alábbiakban ezeknek a befolyásoló paramétereknek hatása és a tapadás javításának módszerei kerülnek bemutatásra.

2.3.1. A nyomtatást befolyásoló paraméterek

Mint már részletezésre került, a 3D nyomtatás számos alapanyagot használ, (például PLA, ABS, PETG), melynek mindegyike eltérő anyag tulajdonsággal rendelkezik. Ebből következik, hogy az első és talán legfontosabb paraméter, ami befolyásolja a nyomtatást és magát a nyomtatott objektumot, az az anyagtípus. A PLA jó nyomtathatósági tulajdonságokkal rendelkezik, azaz alacsony olvadáspont, jó rétegtapadás. Kiváló rétegekötést mutat, különösen alacsonyabb nyomtatási sebességek mellett. [Saleh, A. M. et al., 2025] Azonban rideg anyag, ami csökkenti az ütésállóságot. Továbbá az alacsony hőtágulási együtthatója miatt kevésbé érzékeny a hőmérsékleti ingadozásokra. Ezekkel szemben az ABS, magasabb olvadásponttal rendelkezik, ami erősebb kötési erőket képes eredményezni, tehát jobb az ütésállósága és hajlékonysága, mint a PLA-nak. [Manola et al., 2023] Az ABS kiemelkedően érzékeny a hőmérsékletváltozásokra, emiatt nyomtatása zárt kamrában és meleg platformon javasolt. Összességében az anyagtípusa és minősége alapvető hatással van a rétegtapadásra, az anyag saját mechanikai tulajdonságaiból adódóan.

Az anyagtípus mellett még számos tényező van, ami befolyással van a rétegtapadásra, nyomtatási minőségre. Egyik ilyen tényező a hőmérséklet, ami szintén jelentős hatással van a nyomtatott alkatrészek tulajdonságaira. [Giri, Jayant, et al., 2021] A hőmérsékletet a 3D nyomtatásnál két szemszögből vizsgálhatjuk meg. Vizsgálhatjuk a nyomtatási hőmérséklet

felől, tehát az extruder hőmérséklet szempontjából és vizsgálhatjuk a külső környezeti hőmérséklet szempontjából.

Egy kutatás során, ahol a nyomtatási hőmérséklet mellett két másik befolyásoló paramétert is vizsgáltak, a rétegvastagságot és a hűtési sebességet PLA filamentnél, kiderült, hogy magasabb nyomtatási hőmérsékleten nagyobb húzószilárdság érhető el. Azonban magas nyomtatási hőmérséklet és alacsony rétegvastagság esetén a magas hűtési sebesség jelentősen csökkenti ezt a húzószilárdságot, vagyis növeli az anyag törékenységet, mivel a nyomtatott rétegek nem képesek megfelelően összekapcsolódni. A húzószilárdság akkor is romolhat, ha alacsony a nyomtatási hőmérséklet, de nagy a rétegvastagság. Ebben az esetben akár a felére is csökkenhet. A kísérlet során továbbá megállapították azt is, hogy a hűtési sebesség hatása viszont kisebb mikor a hőmérséklet alacsonyabb. [Baier, A., et al., 2018] Magasabb hőmérséklet esetében azonban a hűtési sebesség jelentős befolyással bír a nyomtatott objektumra. A nyomtatási minőséget és a húzószilárdságot egyaránt képes szabályozni. A magasabb hűtési sebesség simább felületet, de alacsonyabb mechanikai tulajdonságokat eredményez, és fordítva. [Lee, Chun-Ying, and Chung-Yin Liu., 2019]

Egy másik tanulmány során a környezet (zárt térbeli) hőmérsékletét figyelték meg, hogy milyen hatással bír a PLA nyomtatott tárgyakra. A kísérletek azt mutatták, hogy a zárt tér hőmérséklete, a falak száma, valamint a nyomtatási sebesség egyaránt befolyásolják a nyomtatott minták szilárdságát és minőségét. A szakítószilárdság jelentős javulást mutatott az optimális 40°C és szobahőmérséklet között. Azonban 40°C fölötti hőmérséklet már kedvezőtlen volt a rétegek közötti tapadásra, mivel PLA filament megpuhult és hozzáragadt a fúvóka falához, így csökkent az átáramlás. [Saleh, A. M. et al., 2025]

Hőmérséklet esetén fontos megemlíteni az építő platform hőmérsékletét is. Megfelelő hőmérséklet beállítással elkerülhető a warping jelenség, azaz, hogy a nyomtatott alkatrész szélei vagy sarkai felpúposodjanak, elválasztódnak a tárgyasztaltól, és deformálódnak. Ez általában ABS és Nylon anyagoknál következhet be, hiszen ezek érzékenyebbek a hőmérséklet ingadozásra. ABS esetében 90-110°C, PLA esetében 50-60°C a tárgyasztal szükséges hőmérséklete. [Hausman, K. K., & Horne, R., 2014] Az asztal hőmérsékletének növelésével a húzószilárdság és hajlítószilárdság értéke először nő, majd egy adott pont után elkezd csökkeni. [Chadha, Abhinav, et al., 2019]

Egy tanulmány során, ahol nagy teljesítményű hőre lágyuló PEEK műanyagból nyomtatott objektumok mechanikai tulajdonságait vizsgálták különböző nyomtatási paraméterek alapján,

annak céljából, hogy az optimális nyomtatási beállításokat meghatározzák, kiderült, hogy a magasabb fűvóka- és platformhőmérséklet, valamint a nagyobb kitöltési arány erősíti a rétegek közötti tapadást, így javítva a szakító- és nyomószilárdságot. A 400 °C-os fűvókahőmérséklet, a 130 °C-os platformhőmérséklet és 60%-os kitöltési arány bizonyult legoptimálisabbnak, hiszen ekkor volt a legnagyobb a szakítószilárdság és a nyomószilárdság értéke is. (71,4MPa és 167MPa) [Adarsh, S. H., & Nagamadhu, M., 2025]

A bemutatott tanulmányokból kiderült, hogy a hőmérséklet mellett befolyásoló paraméter lehet még a nyomtatási sebesség, a rétegvastagság, a falvastagság, a kitöltési arány és a hűtési sebesség is. Több kutatás kimutatta, miszerint a legnagyobb húzószilárdságot főként a falvastagság és a rétegvastagság optimális beállításával lehet elérni. A legkisebb húzószilárdságot az alacsony falvastagság (0,4 mm), a nagyobb rétegvastagság (0,4 mm) és a magas nyomtatási sebesség (90 mm/s) kombinációja eredményezi. [Giri, Jayant, et al., 2021] Ezen paraméterek közül a nyomtatási sebesség van a legkevesebb hatással a mechanikai tulajdonságokra. [Murariu, Alin Constantin, et al., 2022] PLA filament tapadás vizsgálata során egy kutatás kimutatta, hogy a szakítószilárdság 7%-kal javult, amikor a nyomtatási sebességet 60mm/s-ról 40mm/s-ra csökkentette. Továbbá ugyan ezen a tanulmány azt is kimondta, hogy ha a rétegvastagság is csökken 0,4mm-ről 0,2mm-re, az 12%-os javulást fog eredményezni. [Gajjar, Tusharbai, et al., 2025] Hasonló tanulmányok, amelyek szintén a PLA nyomtatott tárgyak mechanikai tulajdonságait vizsgálták, egyaránt megállapították megerősítve az említett eredményeket, hogy a rétegvastagság csökkentése a szakítószilárdság növekedését fogja eredményezni. Amikor a rétegvastagságot 0,24 mm-ről 0,06 mm-re csökkentették a szakítószilárdság 30%-kal nőtt, ugyanakkor a rétegvastagság 0,12 mm-ről 0,24 mm-re történő növelése 71%-os szakítószilárdság-csökkenést és 16%-os rugalmassági modulus csökkenést eredményezett. [Chacón, Jesus Miguel, et al., 2017] [Szust, Agnieszka, and Grzegorz Adamski., 2022]

További befolyásoló paraméterekkel találkozhatunk a nyomtató kalibrálása során. A nyomtatás beállítása során meg kell határozni a raszterezési szöget, ami meghatározza, hogy a kitöltési mintázat milyen szögben kerül ráépítésre az előző rétegre és meg kell határozni a nyomtatási orientációt, hogy a modell milyen tájolással kerüljön elhelyezésre a tárgyasztalon. Mindkettő szerepet játszik a felületi érdességben, a mechanikai tulajdonságokban, továbbá hatással vannak a gyártási költségekre is egyaránt. A raszterezési szög általában 0° és 90° között változtatható. Kis rasztersizögek növelik a szilárdságot, de a kis szög miatt csak egy irányba, a saját tengelyük mentén képesek nagyobb szakítószilárdság elérni. Ezért a leggyakoribb a 45°-

os átlós elrendezés, hiszen ez javítja a nyírási szilárdságot és többirányú terhelés elleni elleállást. [Durgun, Ismail, and Rukiye Ertan., 2014] Egy kutatás ki mutatta, hogy PLA anyag nyomtatása során a szakítószilárdság értéke 40%-kal nőtt mikor a raszterszög 90°-ról 0°-ra csökkent. [Gajjar, Tusharbhair, et al., 2025] Nyomtatási orientációknál beszélhetünk élírányról, függőleges és lapos írányról. Az élírányú orientáció alacsonyabb rétegvastagságok esetén nagyobb tapadási erőt mutat, míg a lapos orientáció nagyobb rétegvastagságok esetén jobb tapadást eredményez. [Giri, Jayant, et al., 2021] Egy tanulmány szerint, ahol PLA anyagú nyomtatott objektumok mechanikai tulajdonságai voltak vizsgálva, a lapos írányban nyomtatott darabok jobb mechanikai tulajdonságokat mutattak, mint az élre vagy függőleges írányban készűltek. [Patadiya, Naushil H., et al., 2019]

Összefoglalva egy jó minőségű és normál mechanikai tulajdonságokkal rendelkező 3D nyomtatott tárgyhoz számottevő paraméterrel kell foglalkozni, amelyeknek optimális beállítása elengedhetetlen, hogy számunkra kedvező felépítésű eszközt tudjunk kapni. Az említett kutatások egyértelműen rámutatnak arra, hogy a fent említett FDM nyomtatási paraméterek jelentős hatással vannak az anyagtulajdonságokra. Ugyanakkor csak korlátozott kutatás foglalkozott a különböző paraméterek kölcsönhatásával, valamint azok hatásával a nyomtatott minták mechanikai tulajdonságaira.

2.4. Mechanikai tulajdonságok vizsgálata

A rétegről rétegre történő nyomtatási módok, hatással vannak a nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságaikra, ami azt eredményezi, hogy ugyanabból az anyagból készűlt FDM alkatrészek eltérően viselkednek, mint a hagyományos technológiával készűltek. [Djokikj, Jelena, et al., 2022] Továbbá, már az előbbiekből részletesebben bemutatásra került, hogy a végtermék mechanikai jellemzői, a folyamatparaméterektől is jelentősen függenek. Éppen ezekért van szükség a mechanikai tulajdonságok vizsgálatára, hogy számszerűsíteni lehessen a nyomtatott eszközök viselkedését különböző terhelések között. Céljuk, a gyártási folyamat finomhangolása és az elkészűlt termék megbízhatóságának elemzése. Képesek megmutatni, hogy a nyomtatott eszközök milyen erőknek állnak ellen, lehetővé teszik az optimális nyomtatási paraméterek beállítást, illetve fényt derítenek esetleges gyártási hibákra is. Ilyen mechanikai tulajdonságok vizsgálatára alkalmas tesztek, például a húzóvizsgálatok, a hajlítóvizsgálatok, a Peel-tesztek, a törésvizsgálatok vagy akár a nyíróvizsgálatok.

2.4.1. Szakítóvizsgálat (*Tensile Testing*)

A szakító vizsgálat a mechanikai tesztek közül az egyik legalapvetőbb, hiszen a mérés során adatokat kaphatunk a vizsgált tárgy rugalmassági modulusáról (Young-modulus), szakítószilárdságáról, folyáshatáráról és szakadási nyúlásáról is egyaránt. Ezen vizsgálatok során a próbatestet egytengelyű húzóterhelésnek teszik ki, egészen a törésig. [Djokikj, Jelena, et al., 2022] A próbatest folyamatos terhelése során a húzóvizsgálati gép folyamatosan rögzíti a testre ható erőt és az anyag megnyúlását. A teszt során vannak olyan univerzális húzóvizsgálati gépek, melyek képesek a mért adatokat azonnal kiértékelni, de ez nem igaz minden gépre, ennek okán a kiértékeléshez ismerni szükséges a képleteket is, melyekkel meghatározható a kívánt jellemző.

2.4.2. Hajlítóvizsgálat (*Flexural Testing*)

A hajlító terhelés csak úgy, mint a húzóvizsgálat, gyakran előfordul a mérnöki alkalmazásokban. A vizsgálat, a húzó tesztekhez hasonlóan törésig történik, amelyből közvetlen eredmények állapíthatók meg úgy, mint a hajlítószilárdság, a hajlító modulus vagy a törési viselkedés. [Tóth, Csenge, et al., 2024] A hajlítószilárdság a törés előtti maximális feszültséget adja meg, a hajlító modulus pedig az anyag merevségét a hajlítás alatt. Ennek a mechanikai tesztelésnek két alcsoportját különböztethetjük meg, a hárompontos hajlítást, ahol a próbatestet három ponton terheljük, és a négyponthas hajlítást, ahol a testet négy különböző helyen terheljük meg. Mindkét esetben a tesztelés ugyan azon az elven működik, azonban négyponthas hajlítást használnak a nagy merevségű anyagok tesztelésében, a nagyobb hibák elkerülése érdekében. [Srinivas, Kartik.]

2.4.3. Törésvizsgálat (*Fracture Toughness*)

A törésvizsgálatok célja, hogy meghatározzák az anyagok törésállóságát, különösen a rétegek közötti kötés szempontjából és képes közvetlen eredményeket szolgálni azok minőségéről. A vizsgálat során a próbatestet kontrollált terhelésnek vetik alá, amely a törés kialakulását és terjedését idézi elő, lehetővé téve a réteghatárok gyengeségének azonosítását. Az interlayer törés (rétegek közötti törés) három különböző terhelési módban fordul elő: nyitási mód (mode I), síkbeli nyírás mód (mode II) és síkon kívüli nyírás mód (mode III). [Khan, Tayyab, et al., 2024] A leggyakrabban alkalmazott módszerek közé tartozik a Double Cantilever Beam (DCB) teszt, amely a Mode I törési szívósság mérésére szolgál. A gyártás során mintatestben egy vékony tapadásmentes fóliát helyeznek el, amelynek feladata egy előrepedés létrehozása, hogy

ezen a vonalon induljon el a törés, a terhelés hatására. A teszt során mért törési energia közvetlenül tükrözi a rétegtapadás erősségét. [Laffan, M. J., 2012]

2.4.4. Peel teszt

A Peel teszt, más nevén T-peel test egy mechanikai vizsgálat, amely közvetlenül képes mérni a 3D nyomtatott rétegek közötti tapadást, különösen rugalmas alkatrészeknél. A teszt során két egymásra nyomtatott vagy ragasztott réteget egy meghatározott szögben húznak szét, általában ez 180° vagy 90° és a folyamatosan fellépő erőt rögzítik, ami a rétegtapadást jellemzi. A törési felület vizsgálata segít eldönteni, hogy maga a törés adhéziós vagy kohéziós jellegű. [Qayyum, Junaid Ahmad, et al., 2025]

2.4.5. Nyíróvizsgálat (Shear Testing)

A 3D nyomtatott alkatrészek egyre több helyen kapnak szerepet az ipar számos területén a mechanikai tulajdonságaik miatt. Ebből kifolyólag, olyan szerkezetekben is megtalálhatóak már, ahol teherhordóként kapnak szerepet, ami miatt kulcsfontosságú a nyírási tesztelésük. [Wang, Qinglin, et al., 2023]

Egy nyíróvizsgálat során a próbatestet két irányból ellentétes erőkkel terhelik, melynek célja, hogy meghatározzák, hogy mekkora erő szükséges a rétegek elcsúszásához vagy elszakadásához. A vizsgálat során a következő jellemzőket lehet meghatározni: nyírási alakváltozás, nyírófeszültség, nyírási modulus és a törési mód. [Saba, N., M. Jawaid, and M. T. H. Sultan., 2019]

Összességben több különböző mechanikai teszt jöhet szóba, mikor nyomtatott szerkezetek rétegtapadását és abból adódó mechanikai tulajdonságokat szeretnénk jellemzeni. Vannak, amik közvetlen értékekkel szolgálnak és vannak, amik számolás útján adnak információt. A dolgozat következő részeiben részletesebben kerülnek bemutatásra, azok a vizsgálati módszerek, amelyeket a mérések során alkalmaztam.

3. Anyag és módszer

A kutatás során PLA anyagból 3D nyomtatott próbatestek rétegtapadását vizsgáltam, különös tekintettel a rétegvastagság és a kitöltési sebesség különböző beállításai alapján. A vizsgálat célja e két paraméter együttes hatásának kiértékelése volt, hiszen ezen paraméterek közvetlenül befolyásolják a rétegek közötti kohézió mértékét, és ezáltal befolyásolják a nyomtatott szerkezetek mechanikai tulajdonságait is. A rétegek közötti tapadás erősségére a szakító- és hajlítóvizsgálatok során mért mechanikai jellemzők értékeiből lehetett következtetni, így a kapott eredmények közvetlenül tükrözik a rétegtapadás minőségét.

A rétegvastagság meghatározza a testekben kialakuló réteprofil geometriáját, azaz a lerakott szál keresztmetszeti alakját és annak illeszkedését az előző rétegre. Minél kisebb rétegvastagságot használunk a nyomtatás során, a szál annál laposabbá válik, ezáltal nagyobb felületen képes érintkezni az alatta lévő réteggel. Korábbi kutatások alátámasztották ezt, mivel a vizsgálatok során kiderült, hogy ha csökkentjük a rétegvastagságot, a rétegek közötti tapadás erősödni fog. [Khan, Tayyab, et al., 2024] Azonban a rétegvastagság csökkentésével a gyártási idő jelentősen megnövekedhet, hiszen több réteg szükséges egy adott geometriájú próbatest felépítéséhez. Ez a tényező a technológia termelékenységének szempontjából kedvezőtlen. A kitöltési sebesség változtatásával, viszont képesek vagyunk a nyomtatási idő közvetlen befolyásolására azáltal, hogy gyorsabban épülnek fel az egyes rétegek. A két paraméter hatása tehát részben ellentétes, ennek következtében különösen indokolt a két tényező együttes vizsgálata, mivel optimális kombinációjuk egyszerre biztosíthat megfelelő rétegtapadást és elfogadható gyártási hatékonyságot.

3.1. A vizsgált anyag

A kutatás során PLA anyagból nyomtatott tárgyak rétegtapadását vizsgáltam. A PLA, más néven politejsav, egy biológiailag lebomló termoplasztikus műanyag, melyet általában kukorica- vagy burgonyakeményítőből állítanak elő. Hőre lágyuló és kedvező mechanikai tulajdonságai miatt előszeretettel használják FDM nyomtatások során, emiatt tartottam fontosnak ennek az anyagnak a rétegtapadás vizsgálatát. [Kothandaraman et al., 2024]

A PLA egyik legnagyobb előnye a kiváló méretpontosság és alacsony zsugorodási hajlam, ami stabil nyomtatási folyamatot tesz lehetővé. Ugyanakkor a rétegek közötti diffúzió korlátozott, mivel a viszonylag alacsony üvegesedési hőmérséklet miatt az egyes rétegek gyorsan megszilárdulnak, mielőtt tökéletesen összeolvadnának. Ennek a tulajdonságnak

köszönhetően a PLA érzékeny a nyomtatási paraméterek, például a hőmérséklet, a sebesség vagy a rétegvastagság változásaira.

A 3.1 ábra, a vizsgálat során felhasznált alapanyagot, a Bambu Lab PLA Basic típusú nyomtatószálat mutatja, amely a gyártó általános célú, jó nyomtathatóságú, biológiailag lebomló filamentje. A Bambu Lab PLA Basic filament szálak átmérője $1,75\text{mm} \pm 0,03\text{mm}$ nagyságú, amely biztosítja az egyenletes extrudálást és a stabil folyamatparamétereket. A gyártó ajánlása szerint az anyag ideális feldolgozási hőmérséklete $190\text{--}220\text{ }^\circ\text{C}$, a nyomtatóasztal hőmérséklete $45\text{--}65\text{ }^\circ\text{C}$ között van. [BambuLab] Az anyag sűrűsége körülbelül $1,24\text{ g/cm}^3$. Mechanikai tulajdonságait figyelembe véve a PLA szakítószilárdsága 50 és 70 MPa közé esik, a hajlítószilárdsága $70\text{--}100\text{ MPa}$ között van, szakadási nyúlása $3\text{--}8\%$ között található. További tulajdonságai közé tartozik, hogy nem igényel zárt nyomtatóteret vagy utólagos hőkezelést. [Kothandaraman et al., 2024]



3.1. ábra Bambu Lab PLA Basic filament tekercs

3.2. Nyomtatási paraméterek

3.2.1. A vizsgált paraméterek

Mint már említésre került a vizsgálat során arra törekedtem, hogy réteg és a nyomtatási sebesség együttes hatását értékeljem, mivel mindkettő közvetlenül befolyásolja a rétegek közötti kötés kialakulását. A nyomtatási sebesség egy összetett paraméter, hiszen több részsebességből áll. Ilyen például a kezdőréteg nyomtatási sebessége, a külső és belső fal nyomtatási sebessége, kitöltési sebesség vagy akár a fej mozgatási sebessége. A vizsgálat során ezek közül kizárólag a kitöltési sebességet változtattam, míg a többi sebességparaméter minden esetben azonos maradt. Ennek célja az volt, hogy a változások hatása kizárólag a kitöltési területhez kapcsolódjon, ezáltal pontosabban lehessen értékelni a sebesség és a rétegtapadás közötti kapcsolatot.

A kísérlet során a rétegvastagságot, illetve a kitöltési sebességet 3-3 értéken vizsgáltam. A rétegvastagság esetében 0,1mm; 0,2mm; 0,28mm; míg a kitöltési sebességnél 30mm/s; 60mm/s; 90mm/s. Minden értékhez, amely a rétegvastagságot adja meg, hozzárendeltem a kitöltési sebesség három értékét, amit a 3.1 táblázatban szemléltettem. Így ezen az elven történő paraméterek kombinálásával összesen kilenc különböző nyomtatási konfiguráció jött létre. A különböző nyomtatási beállítások mindegyike eltérő rétegeképződési körülményeket biztosított, lehetővé téve a rétegtapadás és mechanikai tulajdonságok összehasonlítását.

A típus		B típus		C típus	
Rétegvastagság [mm]	Kitöltési sebesség [mm/s]	Rétegvastagság [mm]	Kitöltési sebesség [mm/s]	Rétegvastagság [mm]	Kitöltési sebesség [mm/s]
0,1	30	0,2	30	0,28	30
0,1	60	0,2	60	0,28	60
0,1	90	0,2	90	0,28	90

3.1. táblázat Nyomtatási konfigurációk

3.2.2. A nyomtató és a nyomtatási környezet ismertetése

A próbatestek előállítása Bambu Lab A1 Mini típusú asztali FDM (Fused Deposition Modeling) technológiájú 3D nyomtatóval történt, amit a 3.2 ábra mutat. A nyomtató a Bambu Lab gyártó egyik otthoni és kutatási célokra is alkalmas modellje, amelyet elsősorban polimer alapú nyomtatásokhoz fejlesztettek. A készülék 180 × 180 × 180 mm-es építési térfogattal rendelkezik, és 0,4 mm átmérőjű cserélhető fűvókával működik. A nyomtatás automatikus

szintezéssel és aktív rezgéskompenzációval történik, amely javítja a méretpontosságot és a rétegek egyenletességét, különösen nagyobb nyomtatási sebesség esetén. [BambuLab]



3.2. ábra Bambu Lab A1 mini nyomtató

A Bambu Lab A1 Mini közvetlen meghajtású extruderrel szerelt, amely pontos száladagolást tesz lehetővé. A fűtött asztal 100 °C-ig melegíthető, ami elősegíti a tapadást és csökkenti a deformáció kockázatát.

A szeletelés és a nyomtatás előkészítése a Bambu Studio szoftverben történt, ami a Bambu Lab saját, gyári szeletelőszoftvere. A nyomtatás paramétereinek alapbeállításaként a 0.20 mm Standard @BBL A1 M elnevezésű gyári profil szolgált. A kísérleti paraméterek, tehát a rétegvastagság és a kitöltési sebesség mellett a kitöltési sűrűség, irány és mintázat volt az, ami a PLA anyagból nyomtatott testek esetében az alapbeállításoktól eltérő értéket kapott, minden egyéb paraméter, mint például hőmérséklet, falak száma, falak nyomtatási sebessége, asztalhőmérséklet stb., az alapbeállítás értékein maradt, hogy a mérések összehasonlíthatóak maradjanak. Ezeket a paramétereket a 3.2 táblázat szemlélteti.

Paraméter	Érték / beállítás
Nyomtató	Bambu Lab A1 Mini
Szeletelő szoftver	Bambu Studio (gyári profil alap)
Anyag	PLA, 1.75 mm
Fúvóka átmérő	0,4 mm
Nyomtatási hőmérséklet	220 °C
Asztal hőmérséklet	60 °C
Kitöltési sűrűség	100%
Kitöltési minta	Vonalas
Falak száma	2
Felső / alsó rétegek	5 és 3 réteg
Anyagáramlás	normál
vonalszélesség	0,42 mm
Perem típusa	auto
Támasz	nincs
Nyomtatási orientáció	Állítva

3.2. táblázat A nyomtatás során alkalmazott állandó értékű/beállítású paraméterek

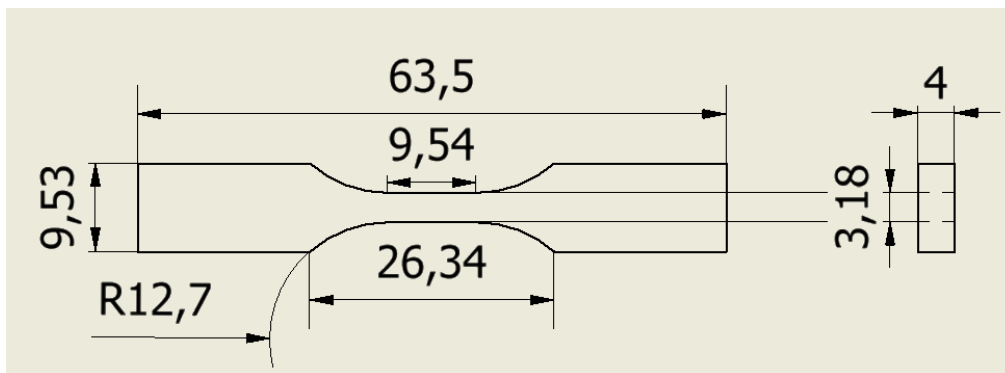
A kitöltési sűrűség minden esetben 100%-ra került beállításra, annak érdekében, hogy a vizsgálat során kizárólag a rétegtapadás változásainak hatása érvényesüljön. A 100%-os kitöltés mellett a vonalas mintázat került beállításra, mivel geometriai okokból adódóan más mintázatok használata nem lehetséges. A 100%-os kitöltés során nincs üres tér a szomszédos extrudált szálak között, azaz egy homogén belső szerkezetről van szó. Azonban más mintázatok ismétlődő geometriákat vesznek fel, például háromszögeket, amelyek között mindig üregek maradnak. A rétegtapadás pontosabb vizsgálata érdekében a kitöltési irány értéke 90°-ra került beállításra, mivel ekkor a szakítóvizsgálat során fellépő erő nagyobb mértékben a réteghatárokon keresztül hat, ezáltal a törési mód jobban tükrözi a rétegek közti tapadás erősségét.

3.3. Próbatetek kialakítása és modellezése

A vizsgálat során alkalmazott próbatetek nemzetközi szabványok alapján kerültek kialakításra, annak érdekében, hogy az elvégzett mérések összehasonlíthatók és reprodukálhatók legyenek. A húzóvizsgálatokhoz az ASTM D638-14 szabvány szerinti testet alkalmaztam, míg a hajlítóvizsgálatokhoz az ASTM D790-15 szabvány szerint készültek a

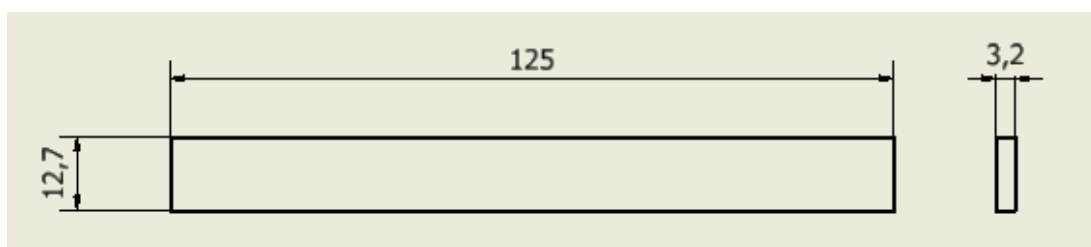
próbatestek. Mindkét szabvány esetében kulcsfontosságúak a geometriai méretek és arányok, és azok betartása a mérési eredmények hitelességének érdekében.

Az ASTM D638 szabvány leírja a vizsgálati módszert a megerősített és nem megerősített műanyagok húzószilárdsági tulajdonságainak meghatározására. Segít meghatározni a legfontosabb mechanikai tulajdonságokat, úgy, mint a húzófeszültséget, a megnyúlást, a húzási modult, a húzószilárdságot, a folyáshoz tartozó húzószilárdságot és a töréshez tartozó húzószilárdságot. [ASTM D638-14] A szabvány több próbatest típust ír elő, melyek különböző körülmények között alkalmazandóak. A kutatásom során a Type V típust alkalmaztam, a pontos eredmények és az anyag felhasználás érdekében. A 3.3 ábra ennek a típusú próbatestnek a felépítését és méreteit mutatja be.



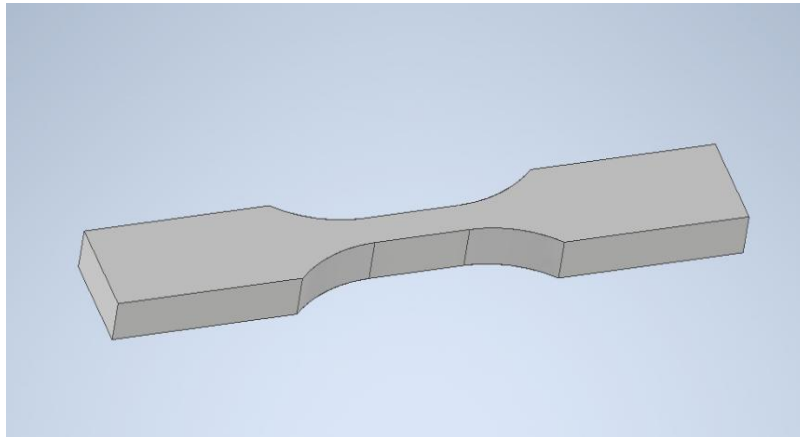
3.3. ábra A húzóvizsgálatnál alkalmazott próbatest felépítése és méretei

Az ASTM D790 szabvány leírja a vizsgálati módszert az erősített és nem erősített műanyagok, valamint az elektromos szigetelőanyagok hajlítószilárdsági tulajdonságainak meghatározására. Az ASTM D790 szerinti tipikus vizsgálati eredmények közé tartozik a hajlítómodulus, a folyáspontnál fellépő feszültségek és nyúlások, a hajlítószilárdság, valamint a törési hajlítási nyúlás. [ASTM D790-15] A 3.4 ábra szemlélteti a próbatest felépítését és méreteit, melyeket a vizsgálat során alkalmaztam.

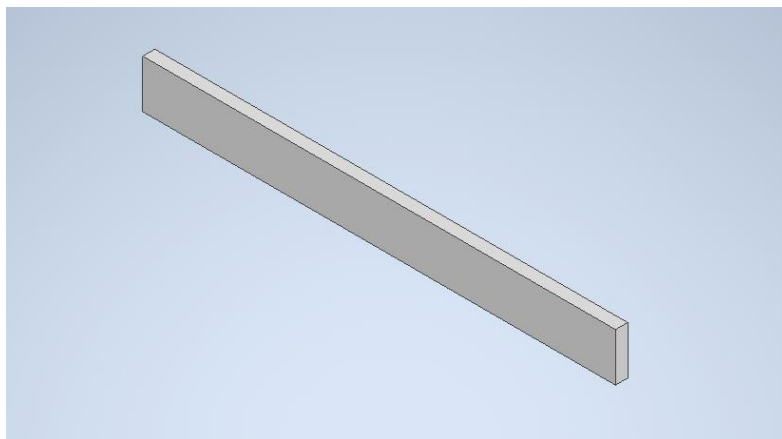


3.4. ábra Hajlítóvizsgálatnál használt próbatest felépítése és méretei

A próbatestek digitális modelljeit az Autodesk Inventor programban készítettem el. A modellezés során a geometriai méretek és arányok pontos betartására törekedtem. A 3.5 és 3.6 ábrák az elkészült 3D modelleket mutatják be, amelyeket a későbbi nyomtatási előkészítés érdekében STEP formátumban exportáltam, majd a Bambu Studio szeletelő szoftverbe importáltam, ahol a nyomtatási beállításokat és a rétegstruktúrát határoztam meg.



3.6. ábra A húzóvizsgálati próbatest 3D modellje

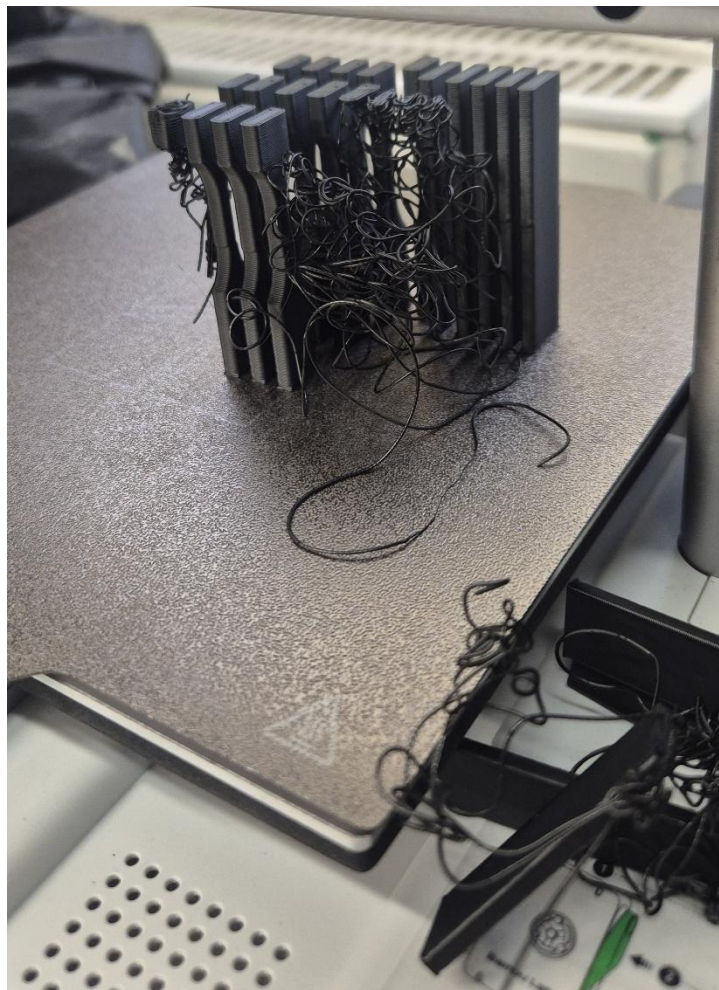


3.5. ábra A hajlítóvizsgálati próbatest 3D modellje

3.4. Nyomtatási folyamatok

Maga a nyomtatás az előre meghatározott paraméterek alapján történt. Mind a kilenc konfiguráció esetében 5 darab próbatest elkészítése céloztam meg annak érdekében, hogy a mérési hibák hatását csökkentsem, és biztosítsam az eredmények statisztikai megbízhatóságát. A nyomtatás megkezdése előtt megtervezésre került a nyomtatási asztalra történő elrendezés, mennyiség, illetve orientáció. A kezdeti beállítások során a próbatestek 3D modelljeit a Bambu Studio szeletelőprogramban helyeztem el a nyomtatóasztalon, egységes távolságok megtartásával.

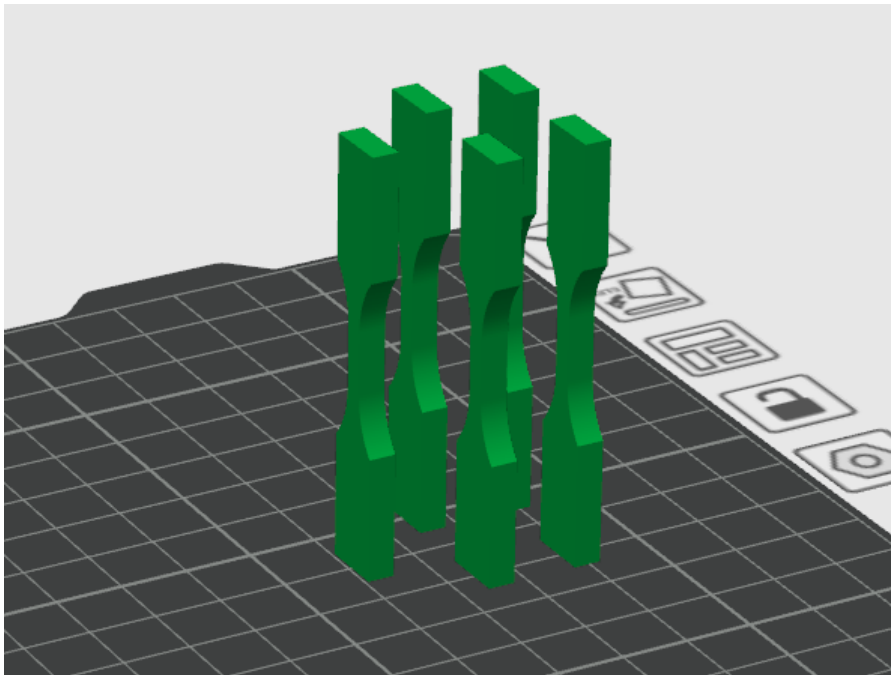
Első nyomtatás során 30 darab próbatest került elhelyezésre egyetlen nyomtatóasztalra, annak érdekében, hogy a nyomtatási időt csökkentsem. Az asztal megtervezése során figyelembe vettem a beállítási paramétereket. Egy asztalra csak az azonos rétegvastagsággal rendelkező próbatestek kerültek fel, ezen belül további beállításra került a különböző kitöltési sebességek szeparálása is. A nagy mennyiségű, állított helyzetben elhelyezett próbatest együttes nyomtatása során mechanikai instabilitás és rezgés okozta rétegeltolódás lépett fel, ennek következményeként néhány test felborulása és az olvadt filament levegőbe nyomása is bekövetkezett, amit a 3.7 ábra szemléltet.



3.7. ábra Első tervezésnél fellépő nyomtatási hiba

A tapasztaltak alapján a nyomtatási folyamat újra tervezésre került. A második tervezés során a próbatestek számát egy nyomtatáson belül öt darabra csökkentettem, a minták közötti minimális távolságot 10 mm-re növeltem, továbbá a 0.20 mm Standard @BBL A1 M nyomtatási alapbeállításain is változtattam, annak érdekében, hogy csökkentsem a nyomtatás során keletkező rezgéseket. A változások a nyomtató fej mozgásának sebességére terjedtek ki.

Ezeket az értékeket a felére csökkentettem, ezzel biztosítva a stabilabb nyomtatási folyamatot. Az 3.8 ábra mutatja a Bambu Studioban előre elkészített nyomtatási tervet.



3.8. ábra Második nyomtatási terv felépítése

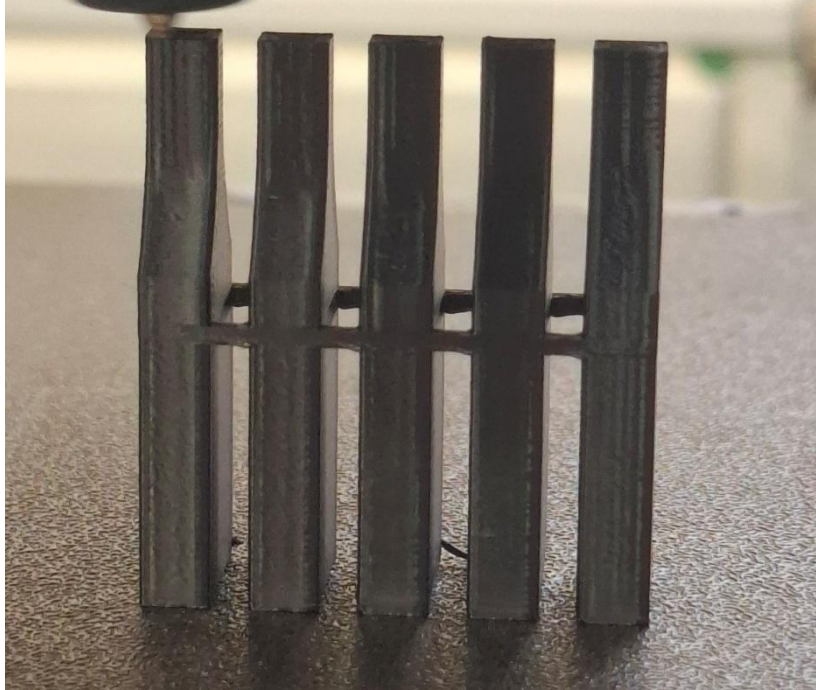
Az újra tervezésnek köszönhetően, néhány nyomtatás fennakadás nélkül zajlott le, amelyeknél megállapítható, hogy a rétegek tapadása egyenletes maradt, és a minták torzulás nélkül



3.9. ábra Egy elkészült nyomtatás

készültek el, mint azt a 3.9 ábra is szemlélteti. Azonban a legtöbb próbálkozás során a testek felborulásának problémája továbbra is fennállt, így sok esetben a nyomtatás a próbatestek

körülbelül háromnegyedéig tartott. Ennek és az anyag felhasználásnak érdekében az egyik konfigurációból 4db próbatest készült. Összesen tehát 44 db tesztelésre kész próbatest készült ez és a következő nyomtatási terv alapján. A probléma megoldásának érdekében, azaz a stabilitás megőrzéséhez, a próbatesteket hidakkal kötöttem össze, amit a 3.10 ábra is bemutat.



3.10. ábra Próbatesszt stabilizálása hidakkal

A hidak elhelyezésének elve, hogy azok a mechanikai tulajdonságokat ne befolyásolják, annak érdekében, hogy a rétegtapadásról kapott eredmények igazak maradjanak. Elhelyezésük a testek befogásáért felelős nyelvek közé történt, ezzel biztosíthatóvá vált, hogy a minták vizsgált keresztmetszetei azonos feltételek mellett készüljenek el, és az összehasonlításukból levont következtetések megbízhatóak legyenek. Emellett befolyásoló tényezőként szolgált továbbá a mechanikai tesztek elvégzésének lehetősége, hogy a hidak ne akadályozzák a tesztek lefutását. A végleges elrendezéssel a maradék konfigurációkhoz sikeres, külön nyomtatási futtatás készült 5 darab próbatessztel.

3.4.1. Próbatesszt jelölése

A próbatessztet közvetlenül nyomtatások után azonosító jelöléssel láttam el a megkülönböztetőségük érdekében a későbbi mechanikai vizsgálatoknál és eredmények

csoportosításánál, kiértékelésénél. A 3.3 táblázat szemlélteti, hogy melyik azonosító melyik nyomtatási konfigurációt jelöli.

Azonosító	Rétegvastagság [mm]	Kitöltési sebesség [mm/s]
A1	0,1	30
A2	0,1	60
A3	0,1	90
B1	0,2	30
B2	0,2	60
B3	0,2	90
C1	0,28	30
C2	0,28	60
C3	0,28	90

3.3. táblázat A próbatestek azonosításának összefoglalása

3.5. Nyomtatott testek rétegfelületeinek vizsgálata

A rétegfelület az az érintkezési felület, ahol két egymásra nyomtatott réteg találkozik, és közöttük adhéziós és diffúziós kötések alakulnak ki. A mechanikai vizsgálatok során a törések általában a rétegek határfelületein következnek be, így a rétegtapadás mértéke függ a rétegek közötti érintkezési felülettől.

Más kutatás eredményeiből kiderült, hogy a 3D nyomtatott testek belső szerkezete minden esetben, valamilyen szinten üreges, még akkor is, ha a kitöltési arány 100%-os. Ezen vizsgálatok során az extrudált filamenteket kezdetben ellipszis formájú elemekkel írják le, mert ez jól közelíti a fúvóka által lerakott domború profilt. Később megvizsgálták, hogy a valós lerakott szál azonban lapul, azaz a keresztmetszet nem tökéletes ellipszis, hanem enyhén lapított. A laposodás bekövetkezése a következő rétegek nyomásának hatására történik. [Li, Longmei, et al., 2002] A megállapításokat mikroszkópos vizsgálatokkal igazolták, amit mellékletben csatolva a 9.1 ábra mutat. A vizsgálatokat oldal nézeti képből végezték, és bemutatták, hogy 90°-os kitöltési irány esetében a rétegek között valós mikroszkopikus üregek vannak jelen, amik mind befolyásolják a tényleges tapadási felület értékét.

A fent említett megfigyeléseket saját vizsgálataim során is megerősítettem, továbbá értékbecslést végeztem a tényleges tapadásra alkalmas felületre. A mikroszkopikus vizsgálatokat felülnézetből végeztem el, annak érdekében hogy látszódjanak azon rétegek ahová a következő réteg tapadni tud és látszódjanak azok a részek is, ahol nincs lehelyezett

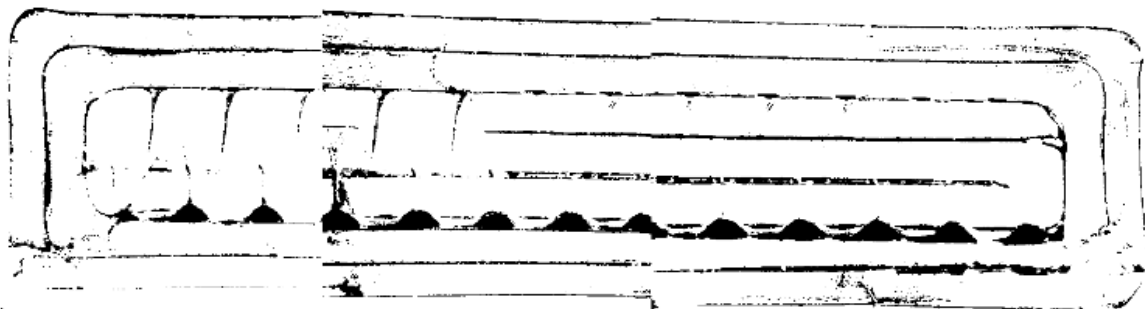
filament réteg. A 3.11 ábra szemlélteti felülnézetből egy réteg felépítését, amin szintén jól láthatóak a mikroszkopikus üregek, amelyek a rétegek közötti érintkezési felületet csökkentik.



3.11. ábra Mikroszkopikus vizsgálat alapján kapott felülnézeti kép egy réteg felépüléséről

Az üregek kialakulása több okra vezethetőek vissza. Egyik a már említett, extrudált szálak keresztmetszete. A kutatásokból bebizonyított közel ellipszis alakú szál geometriából adódhatnak üreges részek szomszédos szálak között. Másik megközelítésből kiderült, hogy a nyomtatási paraméterekből is adódhatnak geometriai problémák, hiszen a nyomtatás során beállításra kerülhetnek a nyomtatott vonalakvastagsága. Külön a fal és külön a kitöltési vonal vastagsága. A próbatestek nyomtatása során a fentiekben említett 0,20mm Standard @BBL A1M gyári paramétereket használtam a vonalakszélességeire. Ezen beállítás alapján a külső fal 0,42 mm, a belső fal 0,45 mm és a kitöltés 0,45 mm széles. Egy ASTM D790 típusú próbatest esetében a teljes vastagság 3,2 mm. Egy külső és egy belső fal használatakor, a megadott értékek alapján, a nyomtató maximális pontossággal is maximum 3,09 mm képes lefektetni, hiszen nincs elég hely még egy vonal számára. Ebből adódóan minimim 0,11 mm széles hézag keletkezik minden réteg lefektetésekor.

A mikroszkopikus vizsgálat során készült képek alapján a tényleges tapadási felület meghatározásához fekete-fehér képelemzést alkalmaztam, amit a 3.12 ábra bemutat. A képelemzés lényege, hogy összehasonlítjuk a fehér és a fekete képpontok arányát, amiből következtetni tudunk a tapadó és nem tapadó felületek százalékos értékére. Az elemzés során a



3.12. ábra Fekete-fehér képelemzés a mikroszkopikus vizsgálatról

fehér képpontok a rétegek tapadó felületét, míg a fekete képpontok az üreges területeket jelölték.

A feldolgozott képen összesen 514300 képpont volt. Ezek közül 465 471 képpont fehér és 48829 képpont pedig fekete volt. Százalékos értékre átszámolva a tapadó felületek, azaz a fehér képpontok aránya 90,5%-os, míg a fekete képpontok, tehát az üreges részek aránya 9,5%. Az elemzésből kiderült, hogy egy teljes réteg keresztmetszetének tényleges tapadási felülete 100%-os kitöltés esetében is csak körülbelül 90,5%. Megemlítendő, hogy a kapott eredmény becsült értéknek tekinthető, mivel a számos tényező befolyásolja egy réteg felépítését, hiszen az extrudált szálak alakja és elhelyezkedése minden esetben kissé eltérhet, így nem minden esetben keletkeznek ugyan olyan rétegek.

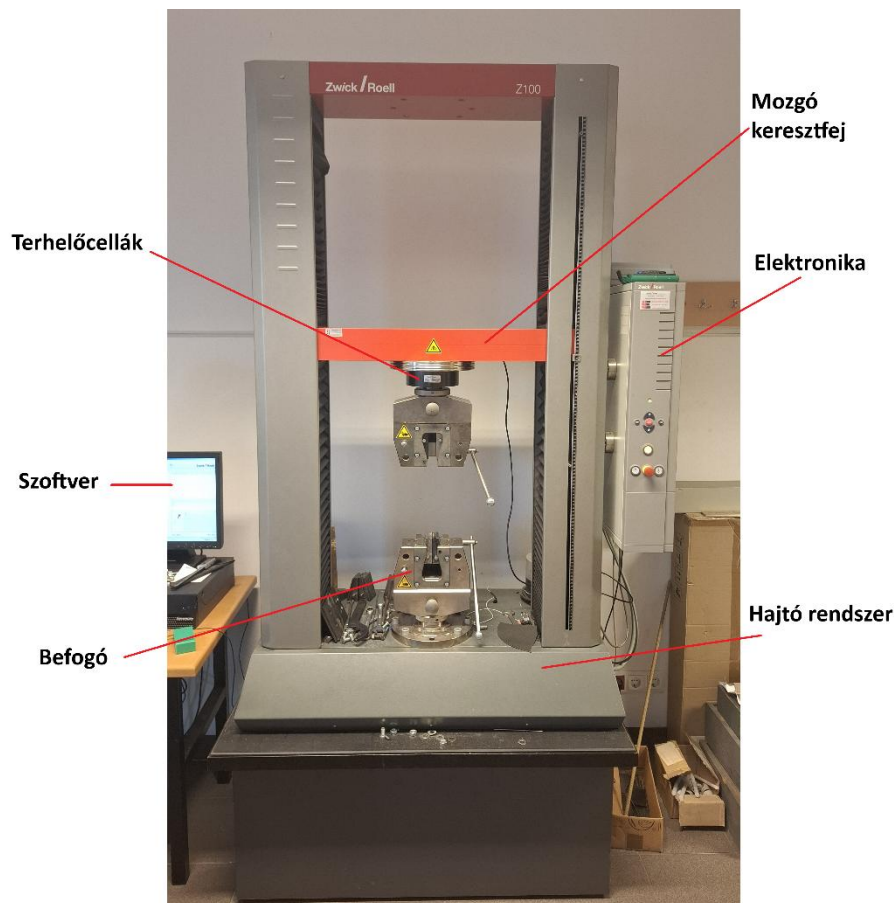
A dolgozatban tehát a rétegtapadást közvetetten, a húzóvizsgálatok során mért mechanikai tulajdonságokból értékeltem, azonban figyelembe vettem, hogy a kapott vizsgálati értékeket nem 100%-os felületre mutatnak, hanem nagyjából egy 90,5%-os valós rétegre.

3.6. Mechanikai tesztek elvégzése

3.6.1. Az elvégzett szakítóvizsgálat folyamatának ismertetése

A rétegek közötti tapadás vizsgálatához szakítóvizsgálatot végeztem. A mérés során kapott eredmények a testek mechanikai tulajdonságairól adnak közvetlen információt, azonban azokból következtetni tudunk a különböző nyomtatási paraméterek hatásaira a rétegtapadásra.

A vizsgálatokat egy Zwick/Roell Z100 típusú univerzális szakítógépen végeztem, amely képes húzó-, nyomó- és hajlítóvizsgálatok elvégzésére is egyaránt. Az 3.12 ábra a tesztlések során alkalmazott berendezést és annak felépítését szemlélteti. A gép rendelkezik beépített erő- és nyúlásmérő rendszerrel. Ezeknek és a gép saját szoftverének köszönhetően a rendszer a mért adatokat automatikusan rögzítette, kiértékelte, valamint erő-nyúlás diagram formájába megjelenítette.



3.13. ábra Zwick/Roell Z100

A berendezés befogó pofái a vizsgálatok előtt új befogóelemekre lettek cserélve, melynek következtében néhány mérés során csúszás volt tapasztalható a próbatest és a befogó közötti

érintkezésnél. Az eredmények megjelenítésében ez megfigyelhető, azonban a mechanikai tulajdonságok értékeit nem befolyásolta.

A fentiekben már részletesen bemutatott információkból adódóan összesen 44 darab próbatestet szakítottam el. Mind a kilenc paraméter konfigurációból 5 darabot kivéve egyet, ahol 4 darab test állt rendelkezésre nyomtatási problémák miatt. A xy ábra szemlélteti a nyomtatás előtti próbatestek állapotát azonosító jel alapján történő csoportosításban.



3.14. ábra Próbatestek azonosító jelöléssel a szakítóvizsgálat előtt

A befogás minden esetben a próbatest nyelvénél történt, biztosítva a középső, csökkentett keresztmetszetű zónában való törést. A vizsgálat során a húzási sebesség minden esetben 1 mm/s volt, mivel alacsony sebességnél a törések, nyúlások jobban megfigyelhetőbbek.

A vizsgálatok során minden próbatest a csökkentett keresztmetszetű, szakadási zónában szakadt el, a várakozásoknak megfelelően, amit a 3.15 ábra is szemléltet. Az említett csúszás

miatt az egyik A3-as jelölésű próbatest a vizsgálat során deformálódást szenvedett, így mérését nem lehetett elvégezni, ami az eredmények számát csökkentette.



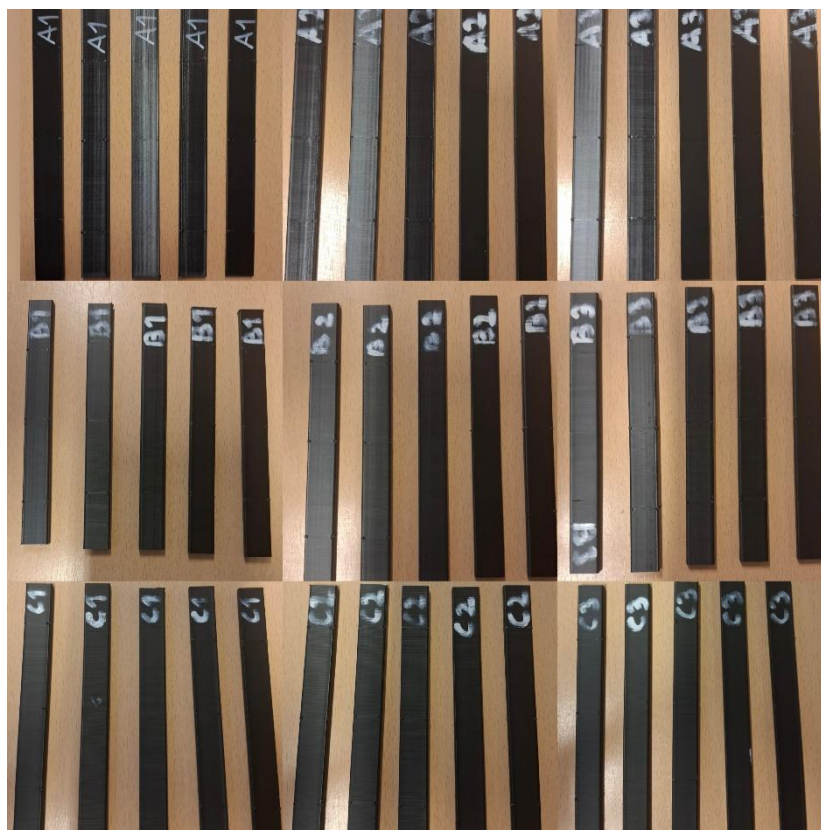
3.15. ábra Próbatestek a szakadási vizsgálatot követően

A törési felületek vizsgálata azt mutatta, hogy a törés a rétegek határfelületein következett be, ami egyértelműen a rétegtapadás minőségét tükrözi. A szakítóvizsgálati folyamatokról több fotódokumentáció is készült, amit a mellékletben a 9.1 és 9.2 ábrák mutatnak.

3.6.2. Az elvégzett hajlítóvizsgálat folyamatának ismertetése

A méréseket a Zwick/Roell Z100 típusú univerzális anyagvizsgáló gépen végeztem el, amelyet korábban a szakítóvizsgálatok során is használtam. A vizsgálat egy hárompontos hajlítás volt, azaz a próbatestet három ponton terheltem. A próbatestek vízszintes helyzetben kerültek elhelyezésre, úgy, hogy a kompressziós feszültség a keresztmetszet felső részében, míg a húzófeszültség az alsó részében keletkezett. Ennek eléréséhez alátámasztásokra volt szükség, melyeknek felülete íves, hogy azok egyvonalban érintkezzenek a próbatesttel. Ehhez külön készülékeket szereltem fel a gépre, amit a mellékletben a 9.4 ábra szemléltet.

A vizsgálat és gép beállításai az ASTM D790 szabvány előírásai alapján történtek, így az alátámasztások közötti távolság 51,2 mm volt. A szakítóvizsgálathoz hasonlóan itt is 45 db próbatestet mértem, tehát minden nyomtatási konfigurációhoz 5 db testet vizsgáltam. Ezeket a próbatesteket a törések előtti állapotukban az 3.16 ábra mutatja be.



3.16. ábra Hajlítóvizsgálati próbatestek azonosító jelöléssel ellátva

A vizsgálatok során bekövetkezett törések hasonlóan, mint a szakítóvizsgálatoknál a rétegek határfelületein következtek be, amik jól mutatják a 3D nyomtatott testek réteges szerkezetéből adódó negatív tulajdonságot, illetve ennek köszönhetően a mérési eredményekből következtetni tudtam a rétegtapadás mértékére. Megállapítható volt továbbá a testek rideg viselkedése is. A testek kis alakváltozást szenvedtek, amit a mellékletben a 9.5 ábra szemléltet. Az alakváltozást követően a próbatestek hirtelen törtek, ami a PLA anyagra jellemző rideg viselkedést támasztja alá. A 3.17 ábra a testek törés utáni állapotát mutatja be, ahol egyértelműen megfigyelhető a törési sík a réteghatárok mentén.



3.1. ábra A próbatestek a hajlítóvizsgálat után

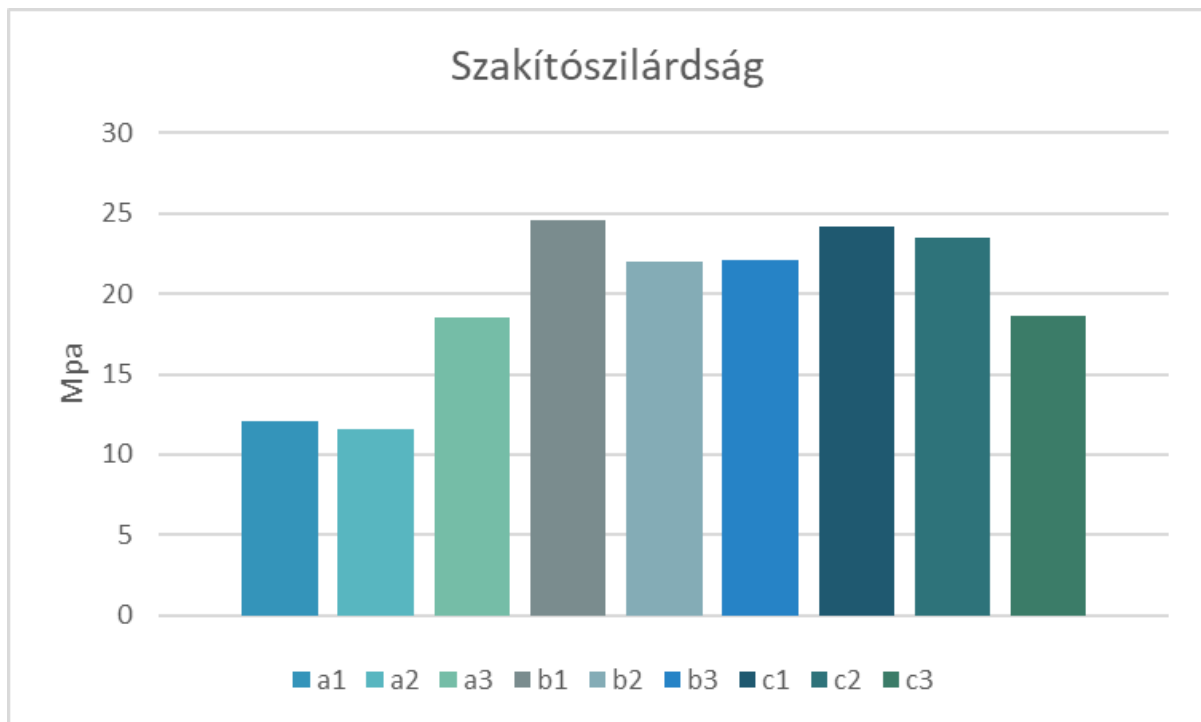
4. Eredmények kiértékelése

Az elvégzett kísérletek célja az volt, hogy a mechanikai vizsgálatok eredményei alapján következtetni lehessen a különböző nyomtatási paraméterek hatására a rétegek közötti tapadás erősségét illetően. A mérésekből kapott erő–nyúlás és erő–elhajlás görbéket elemeztem, majd ezek alapján meghatároztam azokat a maximális erőket, amiknél a próbatestek eltörtek, továbbá diagrammon szemléltettem a szakítószilárdságok és hajlítószilárdságok alakulását.

A kiértékelés során először a szakítóvizsgálatok, majd a hajlítóvizsgálat eredményeit ismertetem. Az alábbiakban csak néhány, jellegzetes görbe kerül bemutatásra, amelyek jól szemléltetik a terhelés alatti eltérő viselkedést, illetve azokat a különleges jelenséget, amelyek a vizsgálatok megfigyelhetőek voltak, például csúszást vagy részleges rétegleválást. A további mérési eredményeket a mellékletben 9.6-9.12 ábrák mutatják be.

Az 3.18 ábra a szakítóvizsgálatból kapott szakítószilárdságok értékeit hasonlítja össze és oszlopdiagrammban ábrázolja. A diagrammból egyértelműen látszódik, hogy a legnagyobb szakítószilárdsággal a C1 és B1 jelölésű konfigurációk rendelkeznek, a legkisebb szakítószilárdsági értékkel pedig az A2. Az eredmények alakulása során továbbá megfigyelhető, hogy a 0,2 mm és 0,28 mm rétegvastagságú nyomtatások szakítószilárdságai

nagyobb értéket vesznek fel, mint a 0,1 mm rétegvastagságú konfigurációk bármelyike. Az eredmények arra utalnak, hogy erősebb tapadások keletkeztek a rétegek között a nagyobb rétegvastagságú nyomtatások során, mint a kisebb 0,1 mm rétegvastagságnál.

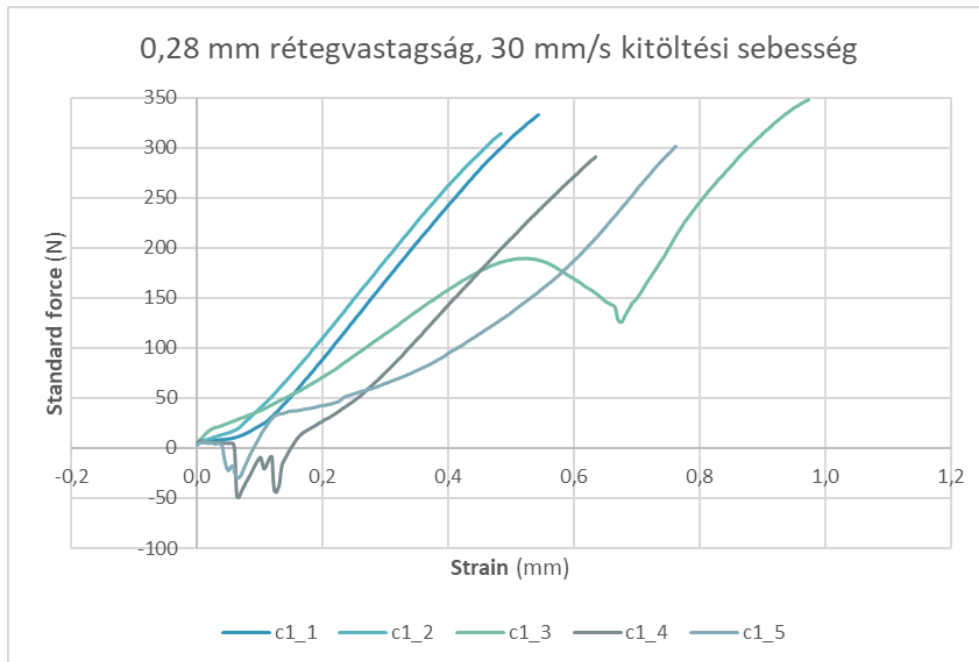


4.2. ábra Szakítószilárdsági értékek összehasonlítása oszlopdiagramban

A 3.19 ábra a 0,28 mm rétegvastagság és 30 mm/s kitöltési sebesség mellett készült próbatetek szakítóvizsgálati görbéit szemlélteti. A kapott eredmények alapján átlagosan a megnyúlás értéke 0,679 mm, míg a maximális erő 317,325 N. Azonban megfigyelhető, hogy a görbék jelentős szórást mutatnak az alakváltozás tekintetében, továbbá hirtelen erőesések is fellépnek, amikből adódóan a kapott mérési eredmények nem a teljes valóságot mutatják. Több görbén is megfigyelhető ez a hirtelen erőesés 0 mm és 0,2 mm közötti éréken. Ezek a gép befogói és a próbatetek között fellépő csúszás következményei. Fontos megjegyezni, hogy ezek nem voltak hatással a szakítószilárdsági értékekre.

Az ábrán látható ezeken kívül további egy erőesés C1_3 próbatest görbéjének felfutása közben 0,5 mm és 0,7 mm között. Ez egy töréspontot jelöl 189 N terhelésnél, azonban a test csak részleges törést szenvedett és más rétegek képesek voltak a terhelés újbóli felvételére. Ennek köszönhető, hogy a kapott átlagos nyúlás és maximális erő értékek nem teljesen mutatják a valóságot. A C1_3 mérést hibás mérésnek tekintettem, így nem számoltam a kapott értékeivel. Ebből adódóan a C1 jelölésű próbatetek mechanikai tulajdonságaira kapott átlagok a következőképpen változtak. A megnyúlás értéke átlagosan 0,606 mm, a maximális terhelő erő

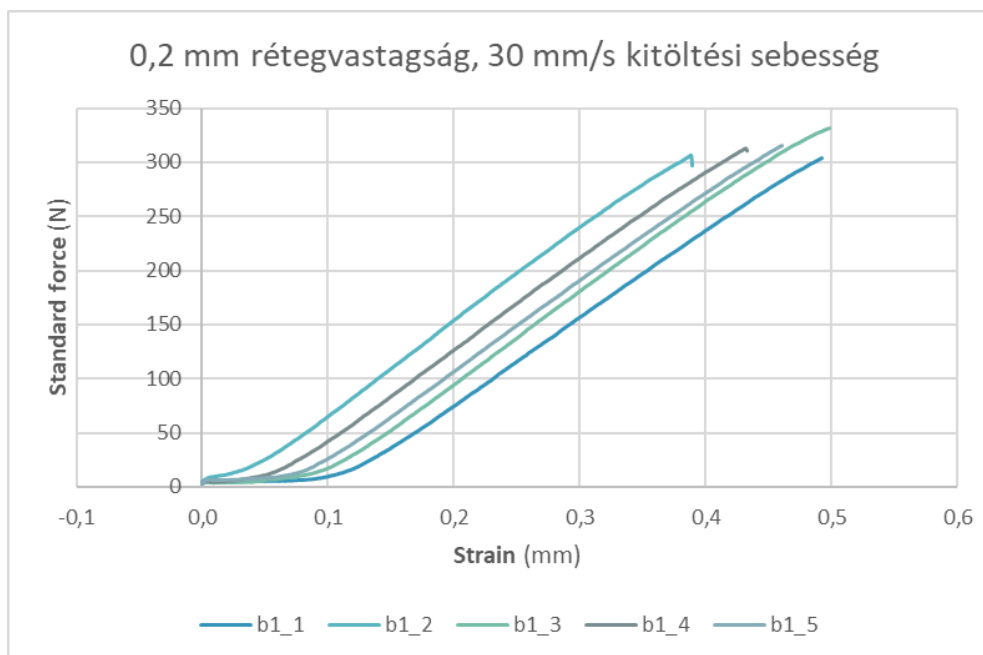
pedig 309,758 N lett, így a szakítószilárdságának értéke is megváltozott 24,791 MPa-ról 24,199 MPa-ra.



4.3. ábra CI jelölésű próbatetek szakítóvizsgálati erő-nyúlás görbéi

A szakítóvizsgálatok végső eredményekből megállapítható, hogy a legerősebb rétegtapadást a 0,2 mm rétegvastagságú és 30 mm/s kitöltési sebességű konfigurációval lehet elérni. A 3.20 ábra ennek a beállítású nyomtatásnak a szakítási görbéit mutatja.

A görbék között kismértékű eltérés, illetve összességében egyenletesebb felfutás tapasztalható. A maximális terhelő erő 300–340 N között alakult, ami átlagosan a legnagyobb

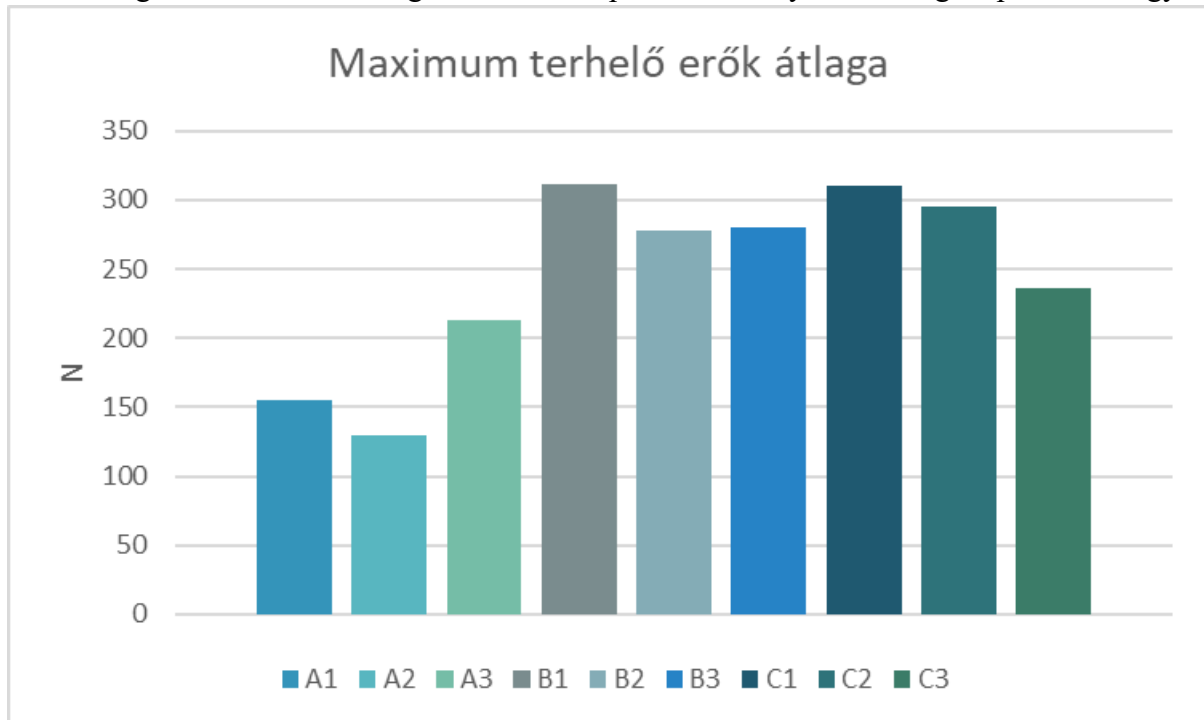


értéknek felelt meg, mint ahogy az a 3.21 ábrán is látható. A vizsgálatok során nem jelentkeztek

4.4. ábra BI jelölésű próbatetek erő-nyúlás görbéi

erősések, ami arra utal, hogy a törési keresztmetszetben létrejövő összes rétegek közötti tapadások hasonló erősségűek voltak.

Összességében a szakítóvizsgálat során kapott eredményekből megállapítható, hogy a



4.5. ábra A maximális terhelő erők összehasonlítása

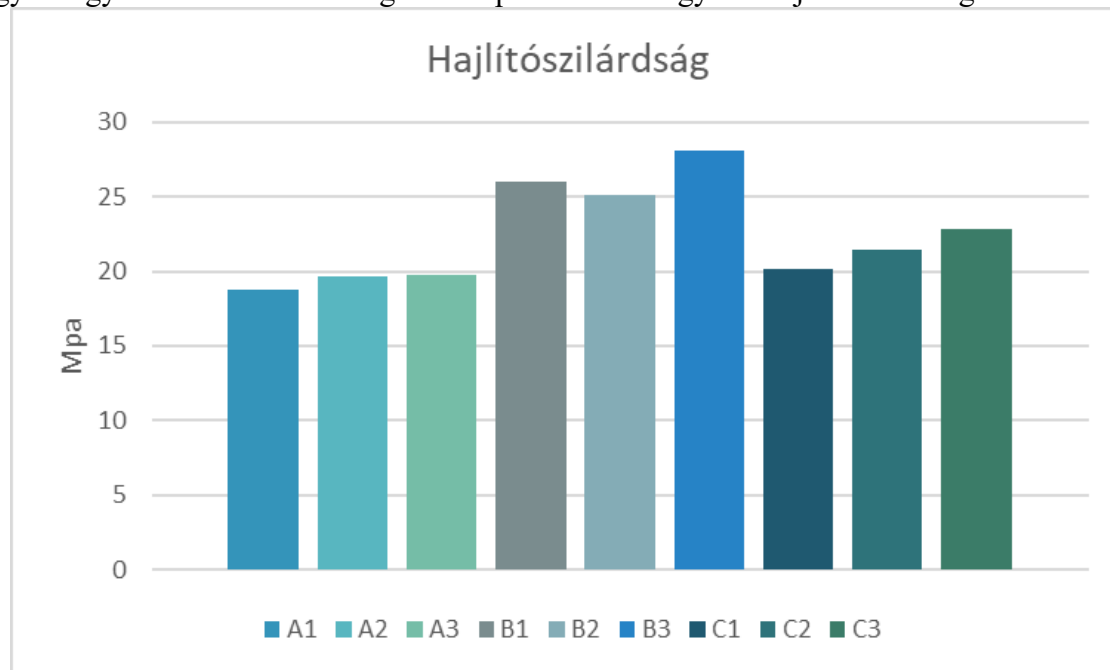
rétegtapadás erősségének szempontjából a legkedvezőbb értékeket a nagyobb rétegvastagság és kisebb kitöltési sebesség konfigurációjából kapjuk meg. A legrosszabb eredmények a kis rétegvastagság és lassú kitöltési sebesség keresztezéséből kapjuk.

A hajlítóvizsgálat során a különböző beállítással nyomtatott próbatestek hajlítószilárdságát mértem és átlagukat hasonlítottam össze oszlopdiagramban, amit a 3.22 ábra mutat be. A diagramról egyértelműen kiderül, hogy a különböző konfigurációk eltérő hajlítószilárdsági értékkel rendelkeznek, továbbá az is, hogy a szakítóvizsgálatokhoz hasonlóan a legjobb tulajdonságai a 0,2 mm rétegvastagságú próbatesteknek van. Ezek eredményei 25-27 MPa, között alakulnak, amiből egyértelműen megállapítható, ezek a minták nagyobb ellenállást mutattak a hajlító igénybevétellel szemben, mint a többi beállítás.

A 0,1 mm rétegvastagsággal rendelkező próbatestek csak úgy, mint a szakítóvizsgálatnál itt is a legalacsonyabb értékeket mutatták. A hajlítószilárdsági értékei 18-20 MPa között alakultak. Az eredményekből megállapítható, hogy a leggyengébb rétegtapadása ezeknek a konfigurációknak van. Valószínűsíthető, hogy ennek oka vagy vékony rétegek gyorsabb lehülésére vagy a kisebb rétegvastagságból adódó rétegek darab számára vezethető vissza, hiszen minél több réteg kerül egymásra, annál nagyobb esélye van két réteg közötti gyengébb

diffúzióknak, ami adódhat apró eltolódásokból vagy esetleges nagyobb számú mikroszkopikus hézagból. Ezek mind hozzájárulnak a rétegek közötti kohézió gyengüléséhez.

A nyomtatási paraméterek sebességének hatását figyelembe véve, az eredmények kimutatták, hogy a nagyobb kitöltési sebességeknél tapasztalható nagyobb hajlítószilárdság. Mind a három



4.6. ábra Kapott hajlítószilárdsági értékek összehasonlítása

rétegvastagság esetében a 90 mm/s -os beállításnak van a legnagyobb rétegtapadása a hajlítóvizsgálati eredményekből következtetve. Ebben az esetben is elmondható, ez a növekedési tendencia, ami megfigyelhető a sebesség változásával, a hűlésre vezethető vissza. Nagyobb nyomtatási sebesség mellett egy rétegnek kevesebb ideje van a lehűlésre, amíg nem kerül lefektetésre a következő réteg.

A részletes erő-elhajlás diagrammokat a mellékletben a 9.13-9.21 ábrák szemléltetik, amiknél bemutatásra kerülnek a különböző paraméterekkel rendelkező minták görbéinek alakulása.

Összefoglalva a két értékelésből megállapítható, hogy a vizsgált paraméter konfigurációkból a 0,2 mm rétegvastagsággal rendelkezők mutatták a legjobb eredmények, így ebből következtetve elmondható, hogy ezeknél található a legerősebb tapadás a rétegek között.

5. Gazdasági számítás

A kutatásom során a próbatestek elkészítéséhez a Bambu Lab PLA Basic típusú filament került felhasználásra. A teljes nyomtatás során felhasznált anyag mennyiséget a Bambu Studio szeletelőprogram segítségével becsültem meg. 5 db szakítóvizsgálati próbatest nyomtatásához átlagosan körülbelül 12g filamentre van szükség. 45 db próbatest esetében ez:

$$9 \times 12g = 108g$$

5 db Hajlítóvizsgálathoz használt próbatesthez átlagosan 31,7g filament került felhasználásra. Ebből adódóan mind a 45 db testhez körülbelül

$$9 \times 31,7 = 285,3g$$

van szükség. A nyomtatáshoz felhasznált anyagmennyiség becsült értéke 393,3g. Ezek mellé számításba veszem a próbanyomtatások és a sikertelen nyomtatások anyagmennyiségét is. Ennek értéke körülbelül 100g, így a teljes anyag felhasználás becsült értéke 493,3g. A 3D nyomtatás során felhasznált anyag költségbecslését a 4.1 táblázat mutatja. A számolás során alkalmazott egységár értékét a jelenlegi piaci ár becsült átlagával adtam meg.

Megnevezés	Anyagmennyiség	Egységár	Összesen
Próbatestekhez felhasznált PLA	0,3933 kg	10 000 Ft	3 933 Ft
Egyéb felhasznált PLA (próbanyomtatás, sikertelen nyomtatások)	0,100 kg	10 000 Ft	1 000 Ft
Teljes anyag költség	0,485 kg	20 000 Ft	4 850 Ft

5.1. táblázat Felhasznált anyag költségbecslése

6. Összefoglalás

A dolgozatom célja az volt, hogy meghatározzam, miként befolyásolja a rétegvastagság és a kitöltési sebesség a PLA anyagból 3D nyomtatott szerkezetek rétegek közötti tapadását és az abból adódó mechanikai tulajdonságokat. Ennek érdekében kilenc különböző nyomtatási konfiguráció került nyomtatásra, majd vizsgálatra, amelyeknél változtattam a rétegvastagságot és a kitöltési sebességet. A próbatesteken elvégzett szakító- és hajlítóvizsgálatok során értékeket kaptam a testek szakító- és hajlítószilárdságáról, továbbá részletes kimutatásokat, hogy adott erő mellett mekkora volt a test megnyúlása, meghajlása.

A vizsgálatokból megállapítható, hogy a rétegvastagság jelentős hatással van a rétegek közötti tapadásra, hiszen nagy eltéréseket tapasztaltam a kisebb 0,1 mm és a nagyobb 0,2 és 0,28 mm rétegvastagságok között. A leggyengébb tapadást a 0,1 mm-es konfigurációk mutatták, valószínűsíthetően a vékony rétegek gyorsabb lehülésének következtében. A legjobb értékeket mind a szakítóvizsgálatnál, mind a hajlítóvizsgálatnál a 0,2 mm-es rétegvastagsággal rendelkező próbatestek mutatták, amikből következtetni lehet, hogy ezeknél alakultak ki a legerősebb tapadások a rétegek között. A kitöltési sebesség szintén befolyásolta a tapadás értékét. Túl alacsony sebességnél kedvezőtlenebb hajlítószilárdsági értékeket kaptunk minden rétegvastagság esetében, mint a nagyobb sebességek esetében.

Összességében a vizsgálatok igazolták, hogy a nyomtatási paraméterek változtatása alapvetően meghatározza a 3D nyomtatott szerkezetek rétegtapadási minőségét. Az eredmények alapján PLA anyagok nyomtatása során a 0,2 mm rétegvastagság és a 30 mm/s kitöltési sebesség kombinációjának megválasztásával jelentősen javítható a rétegek közötti tapadás, ezáltal a 3D nyomtatott testek mechanikai teljesítménye. A kutatás során kapott eredmények és abból levont következtetések alapot adhatnak a gyakorlatban alkalmazott PLA filamentből történő nyomtatásnak az optimalizálásához, valamint a 3D nyomtatás további fejlesztéseihez.

6.1. Javaslatétel

A további kutatások során érdemes lenne más nyomtatási beállításokat is vizsgálni, mint például a hőmérsékletet vagy a hűtés mértékét. Továbbá hasznos lenne más anyagokat is bevonni a vizsgálatba. Ezzel pontosabban meghatározható lenne, mely tényezők befolyásolják leginkább a rétegek közötti tapadást, és hogyan javítható tovább a 3D nyomtatott szerkezetek minősége.

7. Summary

The main goal of my thesis was to find out how layer thickness and printing speed, especially the infill speed, affect the interlayer adhesion and the resulting mechanical properties of 3D-printed structures. For this purpose, nine different printing configurations were produced and tested where I changed the layer thickness and the infill speed. During the tensile and bending tests I measured the tensile and flexural strength of the specimens, and also got detailed graphs showing how much they stretched or bent under a certain load.

The results of the investigations showed that layer thickness has a significant effect on interlayer adhesion, as large differences were observed between the thinner 0.1 mm and the thicker 0.2 and 0.28 mm layers. The weakest adhesion was found in the 0.1 mm configurations, most likely due to the faster cooling of the thin layers. The best results in both the tensile and bending tests were achieved by the specimens printed with a 0.2 mm layer thickness, which suggests that these samples developed the strongest interlayer bonding.

The infill speed also had an effect on the adhesion. At lower printing speeds, the flexural strength values were generally lower for all layer thicknesses compared to higher speeds.

Overall, the investigations confirmed that variations in printing parameters strongly influences the quality of interlayer adhesion in 3D-printed structures. Based on the results, it can be concluded that the proper combination for PLA, is the 0,2 mm layer thickness and 30 mm/s infill speed. That combination can significantly improve the interlayer adhesion and mechanical performance of 3D-printed parts. The results and conclusions of this study can serve as a help to optimize the printing process when using PLA filament, and also support the further development of 3D printing in general.

5.1. Recommendation

For future research, it would be worthwhile to test other printing parameters as well, such as the printing temperature or the cooling rate. It would also be useful to include different types of materials in the experiments. This would make it possible to find out which factors have the biggest influence on the interlayer adhesion and how the quality of 3D printed structures can be further improved.

8. Nyilatkozat

NYILATKOZAT

Kondrák Mihály (név) (hallgató Neptun azonosítója: PP9CW) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót¹ áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő védelemre javaslom / nem javaslom².

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*3}

Kelt: 2025 év október hó 28. nap



belső konzulens

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

² A megfelelő aláhúzendő.

³ A megfelelő aláhúzendő.

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

6.13. sz. függelék: A MATE egységes szakdolgozat / diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója

4.2. sz. melléklete: Nyilatkozat a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről (módosítva: 2025. október 16.)

NYILATKOZAT

a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió¹ nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Kondrák Mihály
A Hallgató Neptun kódja: PP9CWI
A dolgozat címe: 3D nyomtatott rétegek tapadásvizsgálata különböző paraméterek alapján
A megjelenés éve: 2025
A konzulens intézetének neve: Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Anyagtudományi- és Gépipari Folyamatok

Kijelentem, hogy az általam benyújtott záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió² egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem. Továbbá kijelentem, hogy a dolgozat elkészítése során alkalmazott mesterséges intelligencia-eszközök (pl. szöveggenerálás, nyelvi javítás, fordítás, adatelemzés) használata nem helyettesítette a saját kutatási és alkotói munkámat, azok alkalmazását a források között vagy a módszertani részben feltüntettem, és a szakmai-etikai elvárásoknak megfelelően jártam el.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlanul 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 tulajdon-kezelési 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: Gödöllő, 2025.10.26.



Hallgató aláírása

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törölnendő.

² A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törölnendő.

Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Kondrák Mihály
Neptun-kódja:	PP9CWI
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	<input checked="" type="checkbox"/> BSc/BA <input type="checkbox"/> MSc/MA <input type="checkbox"/> Doktori (PhD) <input type="checkbox"/> Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	Szakedolgozat
A munka címe:	3D nyomtatott rétegek tapadásvizsgálata különböző paraméterek alapján

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztens vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrektúra, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)
fordítás, nyelvi korrektúra	ChatGPT, GPT-5 mini	Szakirodalom feldolgozás

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka mellékletében való csatolása szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott eszköz	MI-neve,	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet
----------------------	--------------------	----------	---	--------------------------------------

	verziója, elérhetősége		bejegyzésének sorszama

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

A MATE-K/13-12/2025 iktatószámú 11/2025 (VIII. 29.) számú rektori utasítás: a MESTERSÉGES INTELLIGENCIA HASZNÁLATÁRÓL SZÓLÓ SZABÁLYZAT hatályba lépése előtt 2025. szeptember 1. előtt az MI használata engedélyezett.

4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: Gödöllő, 2025.10.26.



Hallgató aláírása



Konzulens/Témavezető aláírása

8. Irodalomjegyzék

1. Adarsh, Sorekunte Huchappa, and Mahadevappa Nagamadhhu. "Effect of Printing Parameters on Mechanical Properties and Warpage of 3D-Printed PEEK/CF-PEEK Composites Using Multi-Objective Optimization Technique." *Journal of Composites Science* 9.5 (2025): 208.
2. Ahmed, Naveed. "Direct metal fabrication in rapid prototyping: A review." *Journal of Manufacturing Processes* 42 (2019): 167-191.
3. ASTM D638-14 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics <https://store.astm.org/d0638-14.html>
4. ASTM D790-15 - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials <https://store.astm.org/d0790-15.html>
5. Baier, A., et al. "Studies on optimization of 3D-printed elements applied in Silesian Greenpower vehicle." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 400. No. 2. IOP Publishing, 2018.
6. BambuLab hivatalos weboldala: Bambu Lab A1 mini Overview and Tech Details <https://bambulab.com/en/a1-mini>
7. Barbosa, Isabel SO, et al. "Efficient photocatalytic reactors via 3D printing: SLA fabrication and TiO₂ hybrid materials." *RSC advances* 15.4 (2025): 2275-2286.
8. BORBÁS Lajos Dr.: Felépítés elvű (additív) gyártástechnológiák a gépészetben „Magyar Mérnöki Kamara (2017.október) 15/2017-GT
9. Chacón, Jesus Miguel, et al. "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection." *Materials & Design* 124 (2017): 143-157
10. Chadha, Abhinav, et al. "Effect of fused deposition modelling process parameters on mechanical properties of 3D printed parts." *World Journal of Engineering* 16.4 (2019): 550-559.
11. Choi, Jong-Han, et al. "Mechanical reinforcement of complex shaped ceramic filter fabricated using binder jetting process with photocurable composite ink." *Journal of Materials Research and Technology* (2025).

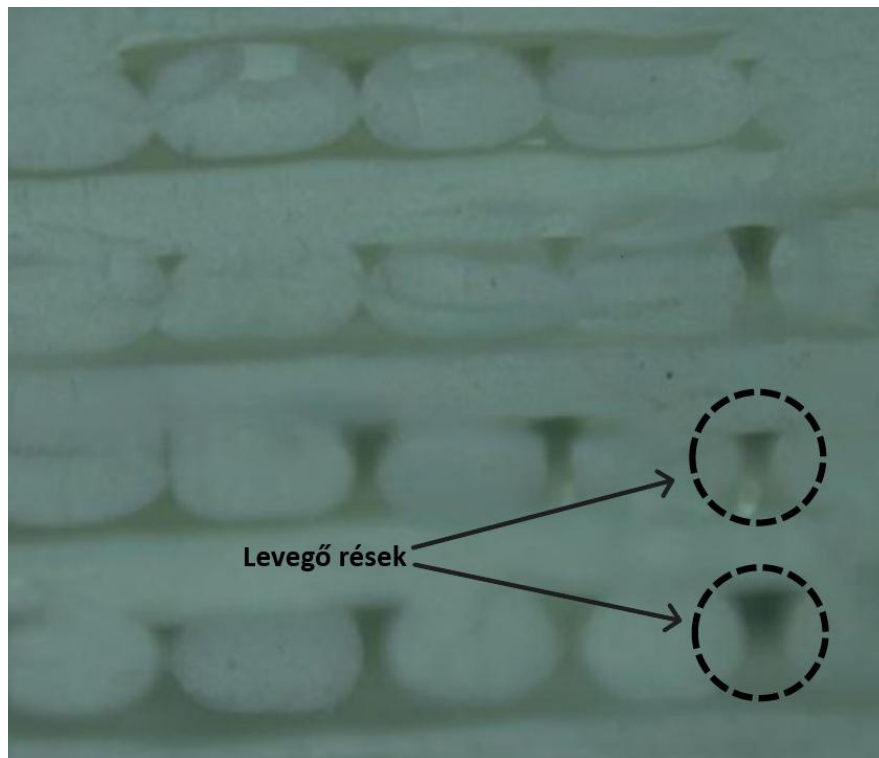
-
12. Djokikj, Jelena, et al. "Experimental investigation on mechanical properties of FFF parts using different materials." *Procedia Structural Integrity* 41 (2022): 670-679.
 13. Durgun, Ismail, and Rukiye Ertan. "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost." *Rapid Prototyping Journal* 20.3 (2014): 228-235.
 14. Gajjar, Tusharbai, et al. "Effects of key process parameters on tensile properties and interlayer bonding behavior of 3D printed PLA using fused filament fabrication." *Progress in Additive Manufacturing* 10.2 (2025): 1261-1280.
 15. Gao, Hongwei, et al. "3D printed optics and photonics: processes, materials and applications." *Materials today* 69 (2023): 107-132.
 16. Garg, Ashu, and Anirban Bhattacharya. "An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study." *International Journal of Mechanical Sciences* 120 (2017): 225-236.
 17. Giri, Jayant, et al. "Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process." *Materials Today: Proceedings* 47 (2021): 5856-5861.
 18. Gojzewski, Hubert, et al. "Layer-by-layer printing of photopolymers in 3D: How weak is the interface?." *ACS applied materials & interfaces* 12.7 (2020): 8908-8914.
 19. Gregor-Svetec, Diana. "Polymers in printing filaments." *Polymers for 3D printing*. William Andrew Publishing, 2022. 155-269.
 20. Gunatillake, P. A., and R. Adhikari. "Nondegradable synthetic polymers for medical devices and implants." *Biosynthetic polymers for medical applications*. Woodhead Publishing, 2016. 33-62.
 21. Haghsefat, Kianoush, and Liu Tingting. "FDM 3D printing technology and its fundamental properties." *Proceedings of the International Conference on Innovation and Research in Engineering Sciences, Tbilisi, Georgia*. Vol. 30. 2020.
 22. Hausman, Kalani Kirk, and Richard Horne. *3D printing for dummies*. John Wiley & Sons, 2014.
 23. Hosseinzadeh, Mohammad Hadi, et al. "Beyond standard ABS: Recent advances in modified and composite filaments prepared for fused deposition modeling." *Heliyon* 11.8 (2025): e43051.

-
24. Kadry, Hossam, et al. "Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets." *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 135 (2019): 60-67.
 25. Khan, Tayyab, et al. "Recent developments in improving the fracture toughness of 3D-printed fiber-reinforced polymer composites." *Composites Part B: Engineering* 283 (2024): 111622.
 26. Kothandaraman, Logesh, and Navin Kumar Balasubramanian. "Optimization of FDM printing parameters for square lattice structures: Improving mechanical characteristics." *Materials Today: Proceedings* (2024).
 27. Laffan, M. J. "Testing the toughness of polymer matrix composites." *Failure mechanisms in polymer matrix composites*. Woodhead Publishing, 2012. 110-128.
 28. Lee, Chun-Ying, and Chung-Yin Liu. "The influence of forced-air cooling on a 3D printed PLA part manufactured by fused filament fabrication." *Additive Manufacturing* 25 (2019): 196-203.
 29. Li, Longmei, et al. "Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties." *Journal of manufacturing processes* 4.2 (2002): 129-141.
 30. Manola, Mukesh Singh, et al. "Investigation of melt flow index of dual metal reinforced ABS polymer for FDM filament fabrication." *Materials Today: Proceedings* (2023).
 31. Memiş, Melisa, and Dilşad Akgümüş Gök. "Development of Fe-reinforced PLA-based composite filament for 3D printing: Process parameters, mechanical and microstructural characterization." *Ain Shams Engineering Journal* 16.2 (2025): 103279.
 32. Miramini, Saeed, et al. "The status and challenges of replicating the mechanical properties of connective tissues using additive manufacturing." *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials* 103 (2020): 103544.
 33. Mukhtarkhanov, Muslim, Essam Shehab, and Md Hazrat Ali. "Process parameter optimization for 3D printed investment casting wax pattern and its post-processing technique." *Applied Sciences* 12.14 (2022): 6847.
 34. Mukhtarkhanov, Muslim, et al. "A novel method for evaluating thermal expansion forces during dewaxing of investment casting and 3D-printing waxes." *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* (2024).

-
35. Murariu, Alin Constantin, et al. "Influence of 3D printing parameters on mechanical properties of the PLA parts made by FDM additive manufacturing process." *Engineering Innovations* 2 (2022): 7-20.
 36. Patadiya, Naushil H., Harshit K. Dave, and Shilpesh R. Rajpurohit. "Effect of build orientation on mechanical strength of FDM Printed PLA." *Advances in Additive Manufacturing and Joining: Proceedings of AIMTDR 2018*. Singapore: Springer Singapore, 2019. 301-307.
 37. Pontes, A. J. "Designing for additive manufacturing." (2021).
 38. Qayyum, Junaid Ahmad, et al. "On the printability and inter-layer adhesion in 3D printing of continuous carbon fibre reinforced PEEK composite using tape and filament." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 190 (2025): 108654.
 39. Saba, N., M. Jawaid, and M. T. H. Sultan. "An overview of mechanical and physical testing of composite materials." *Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites* (2019): 1-12.
 40. Saleh, Ammar Mahdi, Adil Shbeeb Jaber, and Mohammed Sattar Jabbar. "Layer adhesion investigation of three dimension printed parts by controlling the environment temperature." *Advances in Science and Technology Research Journal* 19.3 (2025): 74-83.
 41. Shahrubudin, Nurhalida, Te Chuan Lee, and R. J. P. M. Ramlan. "An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications." *Procedia manufacturing* 35 (2019): 1286-1296.
 42. Sharba, Muammel M. Hanon. *The effect of 3D printing structures and surfaces on the tribological behaviour of polymer and polymer composites*. Diss. Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem, 2022.
 43. Song, Wenqi, Hailong Li, and Fengxiang Li. "The integration of environmental governance and 3D printing technology: Current situation and prospects." *Chemical Engineering Journal* (2025): 159498.
 44. Srinivas, Kartik. "Mechanical Testing of 3D Printed Parts and Materials."
 45. Szabó, László, et al. "Flexible Investment Casting Wax Patterns for 3D-Printing: Their Rheological and Mechanical Characterizations." *Polymers* 14.21 (2022): 4744.

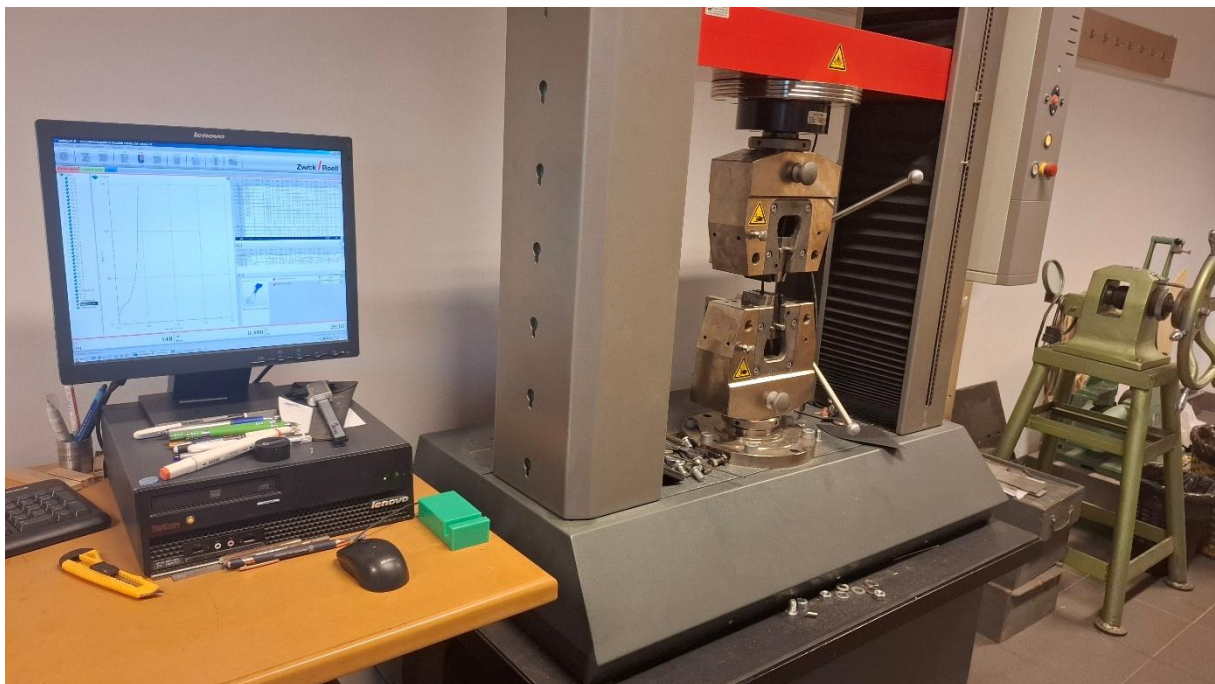
-
46. Szust, Agnieszka, and Grzegorz Adamski. "Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints." *Engineering Failure Analysis* 132 (2022): 105932.
 47. Tang, Jui-Fu, et al. "Pioneering techniques for achieving high-resolution, ultrasmooth surfaces via LCD 3D printing technology." *Additive Manufacturing* 103 (2025): 104764.
 48. Tóth, Csenge, et al. "Prediction and analysis of flexural stiffness for 3D-printed continuous fiber-reinforced composites with different matrix fill ratios and layer orders." *Polymer Testing* 135 (2024): 108459.
 49. Wang, Lipeng, et al. "Assessment of mechanical-loss property of 3D printing metal and its application to ultrasonic transducers as vibrating bodies." *Ultrasonics Sonochemistry* (2025): 107356.
 50. Wang, Qinglin, et al. "Efficient characterization on the interlayer shear strengths of 3D printing polymers." *Journal of Materials Research and Technology* 22 (2023): 2768-2780.
 51. Yang, Xiaoyu, et al. "Enhanced Interlayer Adhesion of 3D Printed Poly (lactide acid) with Ultralow Hyperbranched Poly (ester imide) s." *Composites Communications* 48 (2024): 101927.
 52. Zhang, Feng, et al. "3D printing of ceramic matrix composites: Strengthening and toughening strategies." *Composites Part B: Engineering* (2025): 112335.
 53. Zhao, Zeang, et al. "Effects of oxygen on interfacial strength of incremental forming of materials by photopolymerization." *Extreme Mechanics Letters* 9 (2016): 108-118.
 54. Zhu, Zhengbo. "Freeform Optics for Achieving Collimated and Uniform Light Distribution in LCD-Type UV-Curable 3D Printing." *IEEE Photonics Journal* 15.4 (2023): 1-7.
 55. Ziaee, Mohsen, and Nathan B. Crane. "Binder jetting: A review of process, materials, and methods." *Additive Manufacturing* 28 (2019): 781-801.
 56. ZwickRoell. "Materials Testing Solutions." ZwickRoell Official Website, <https://www.zwickroell.com>.

9. Mellékletek



9.1. ábra Rétegek közötti levegő rések és az ellapított extrudált vonalak tapadási felületei

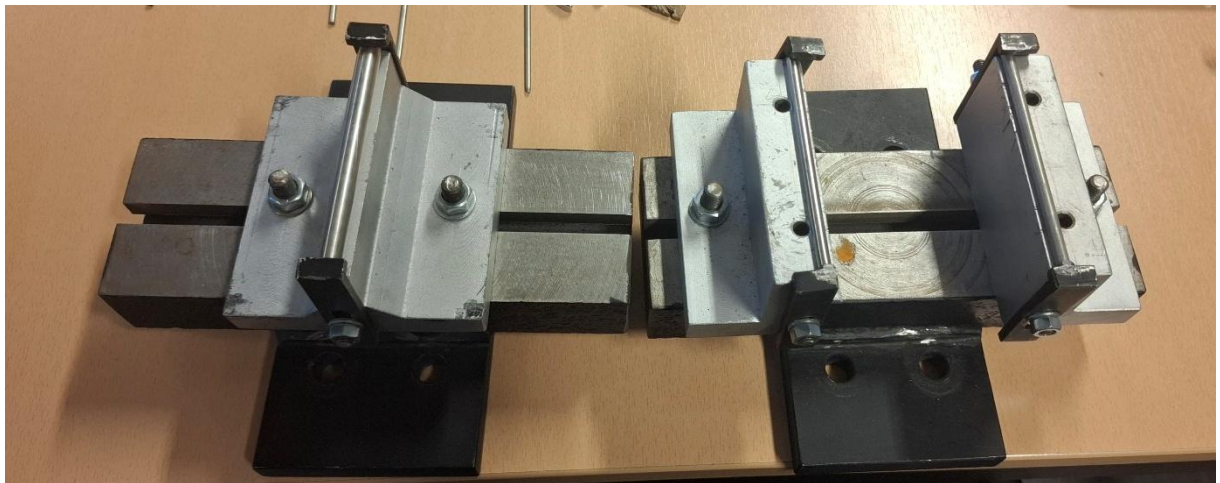
(Forrás: Garg, Ashu, and Anirban Bhattacharya, 2017)



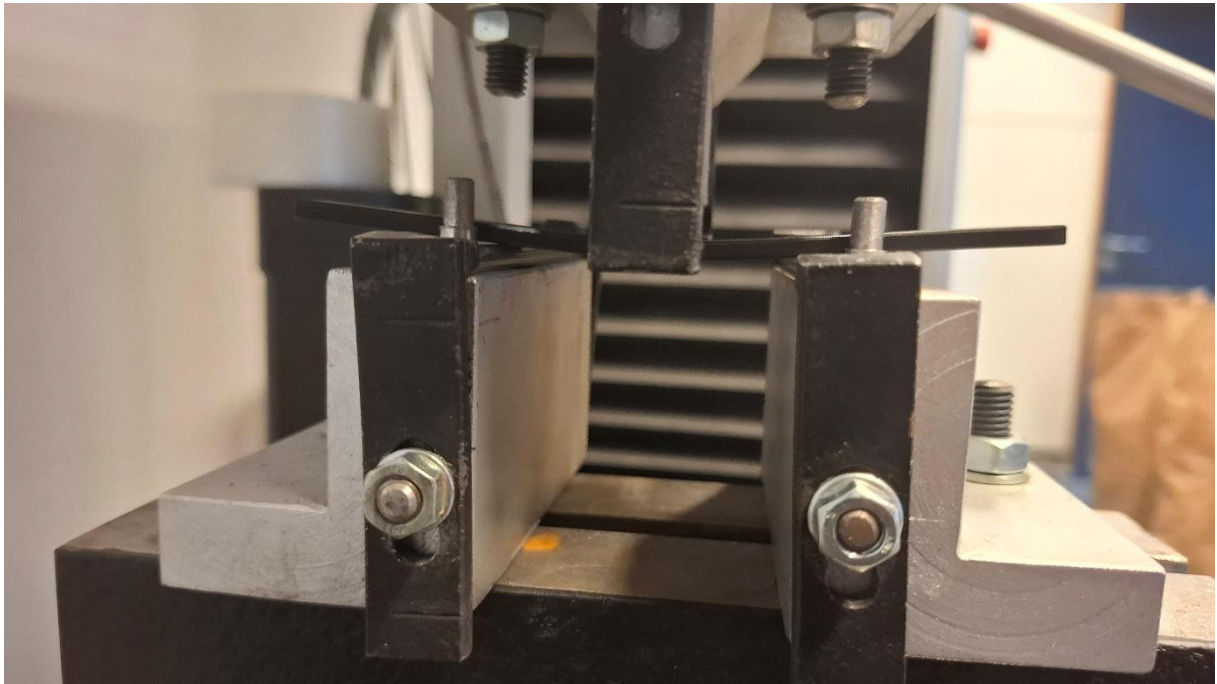
9.2. ábra Szakítóvizsgálat közbeni folyamat és eredmény megjelenítés



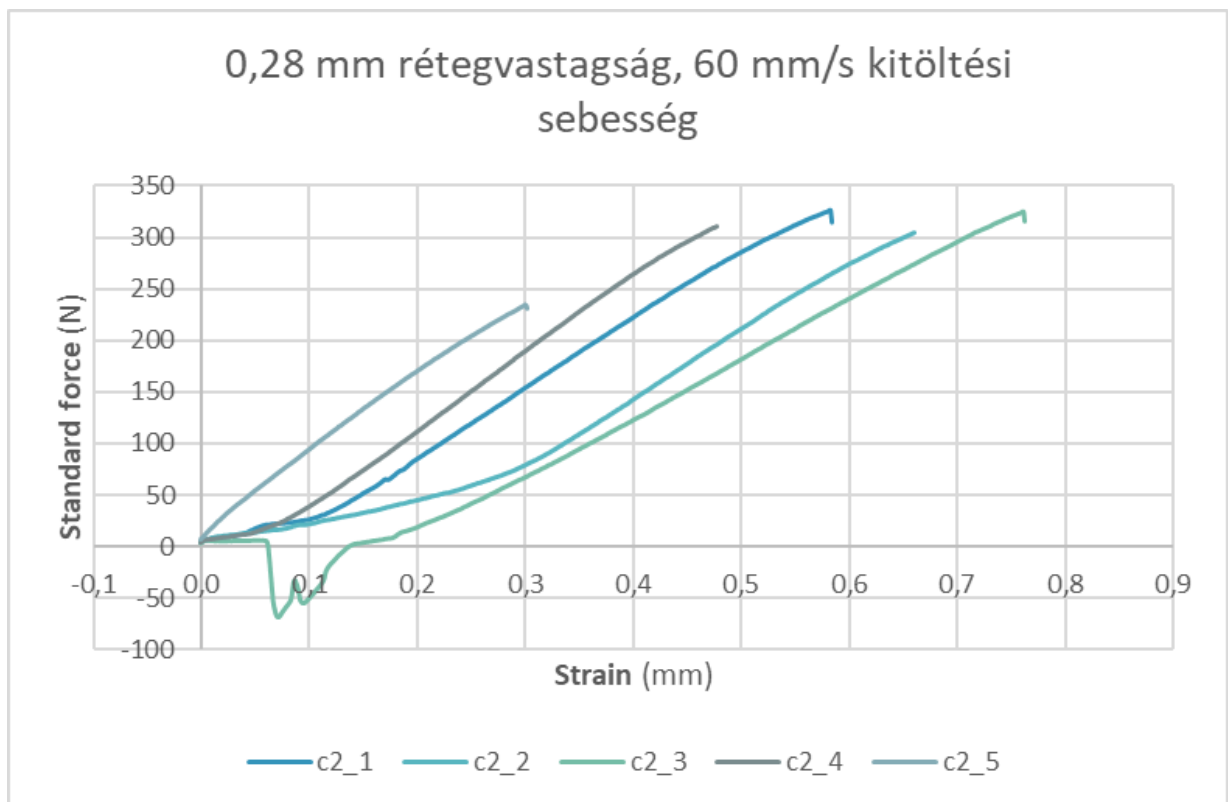
9.3. ábra Próbatétel befogása



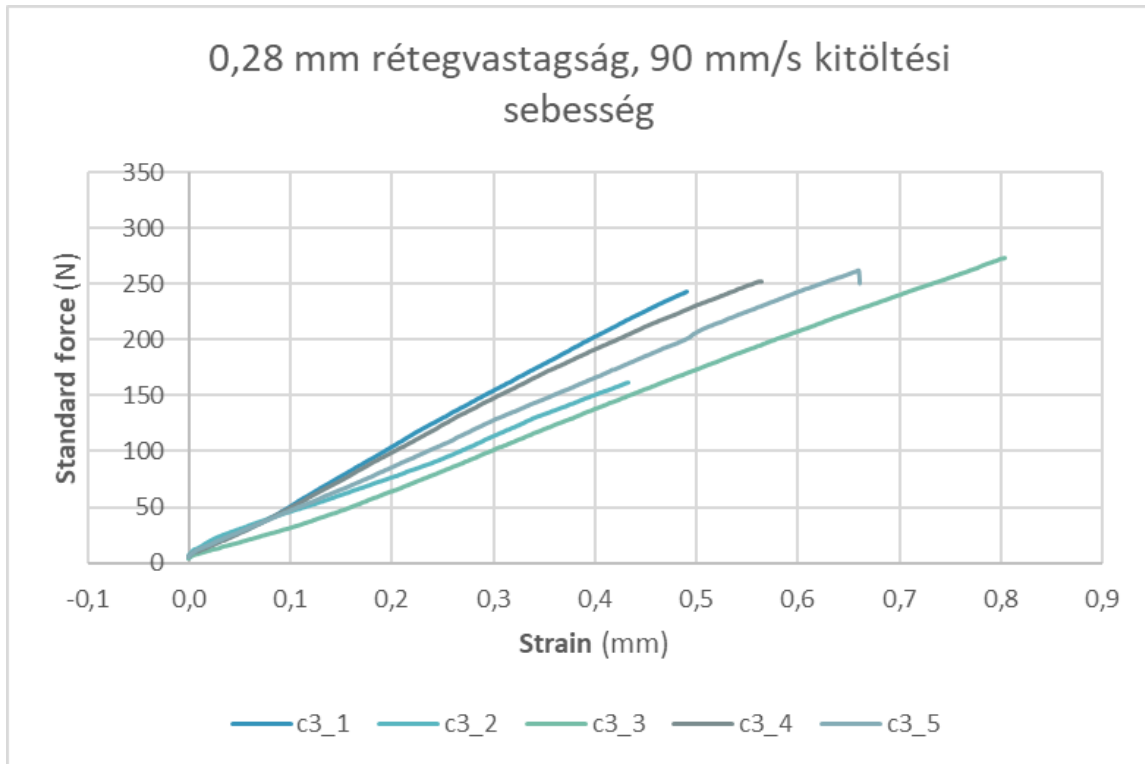
9.4. ábra Hárompontos hajlításhoz a készülékek



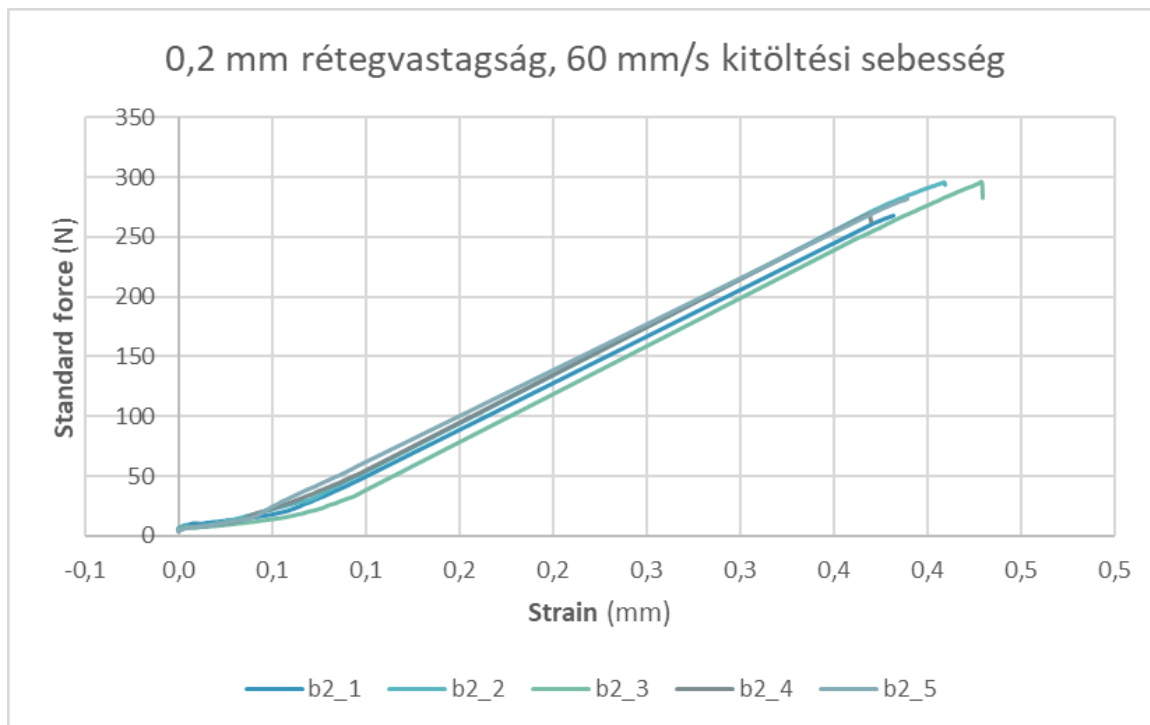
9.5. ábra A hajlítóvizsgálat közbeni kis alakváltozás közvetlenül a törés előtt



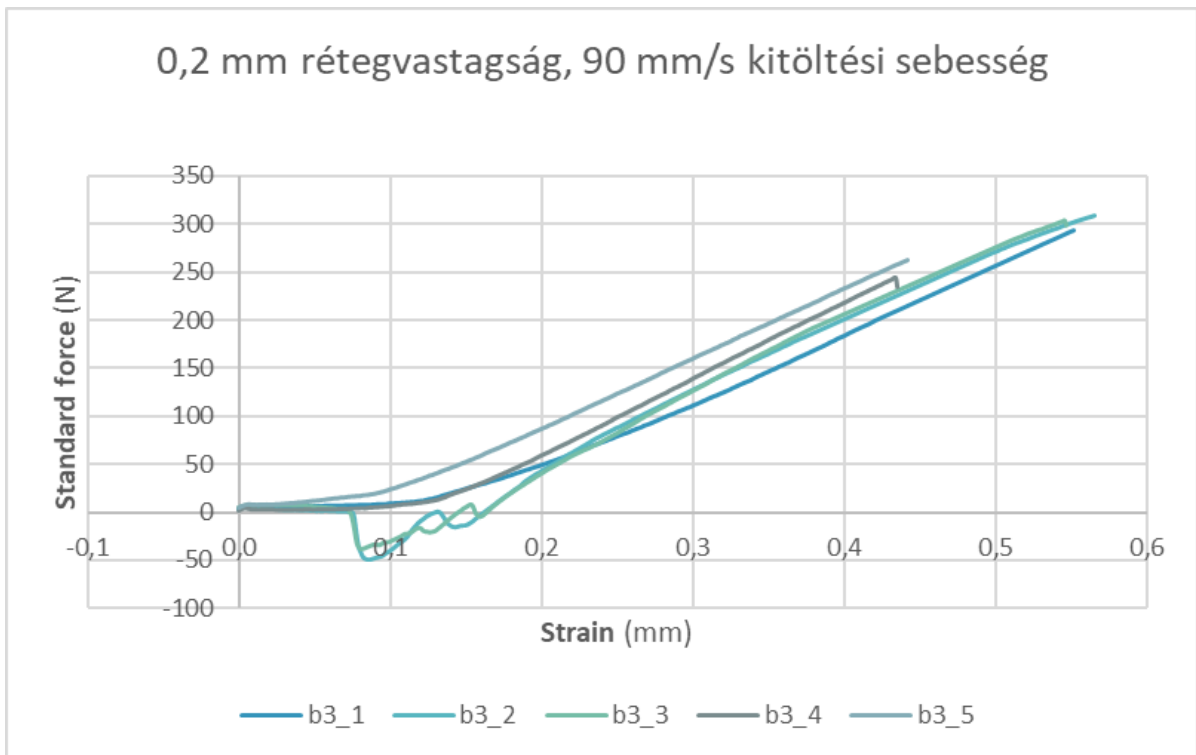
9.6. ábra C2 jelölésű próbatestek erő-nyúlás görbéi



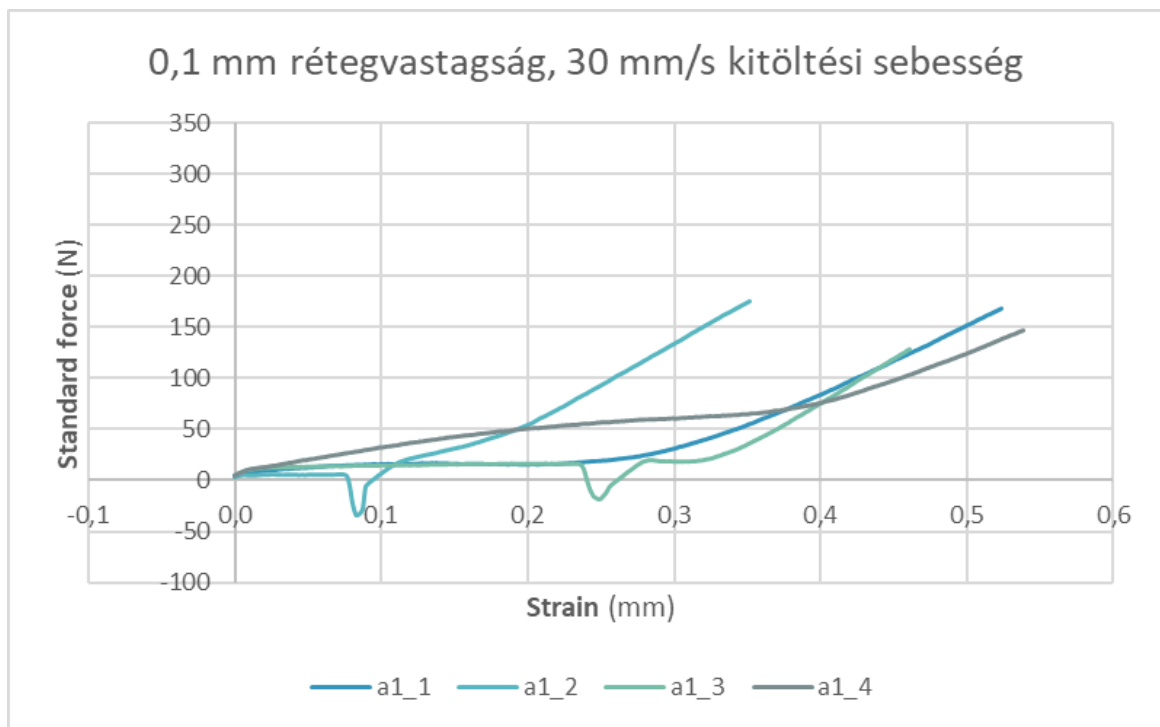
9.7. ábra C3 jelölésű próbatestek erő-nyúlás görbéi



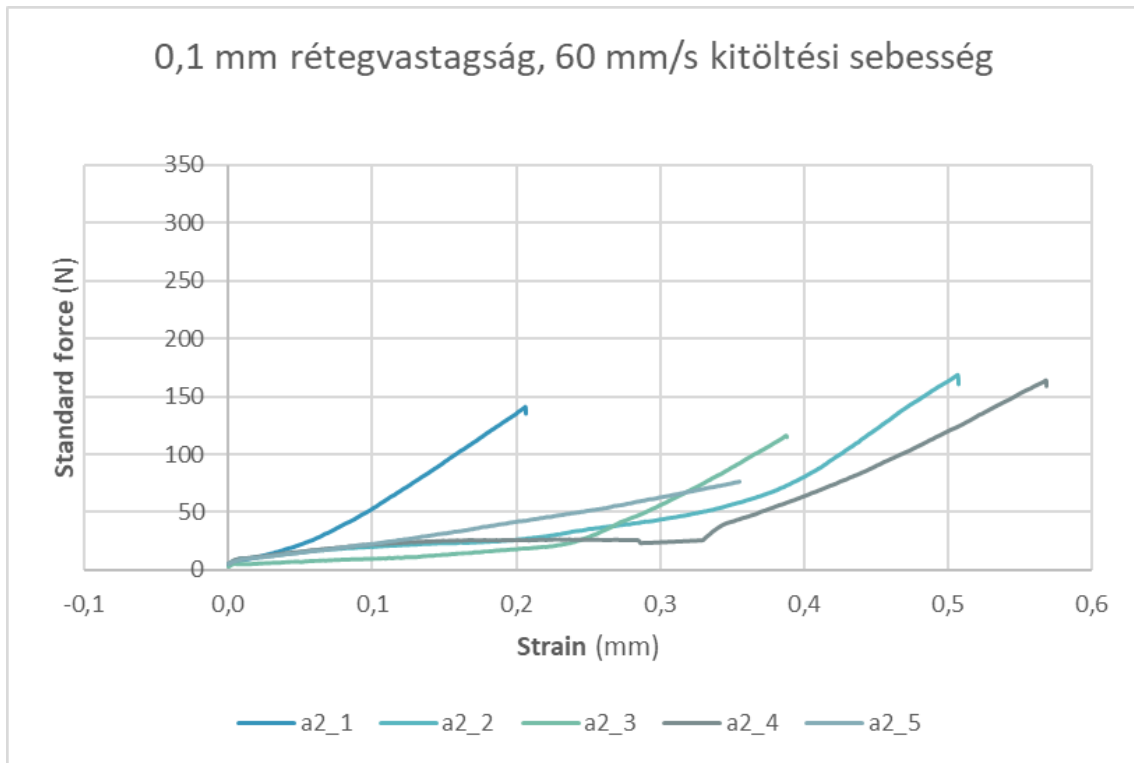
9.8. ábra B2 jelölésű próbatestek erő-nyúlás görbéi



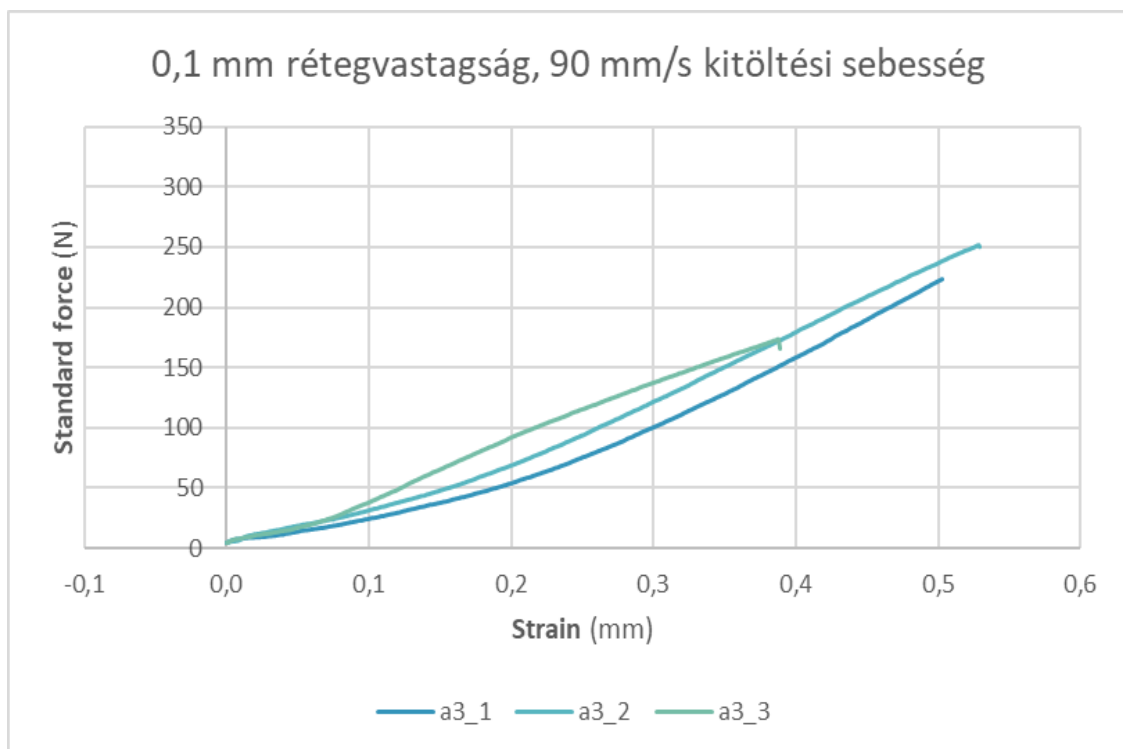
9.9. ábra B3 jelölésű próbatetek erő-nyúlás görbéi



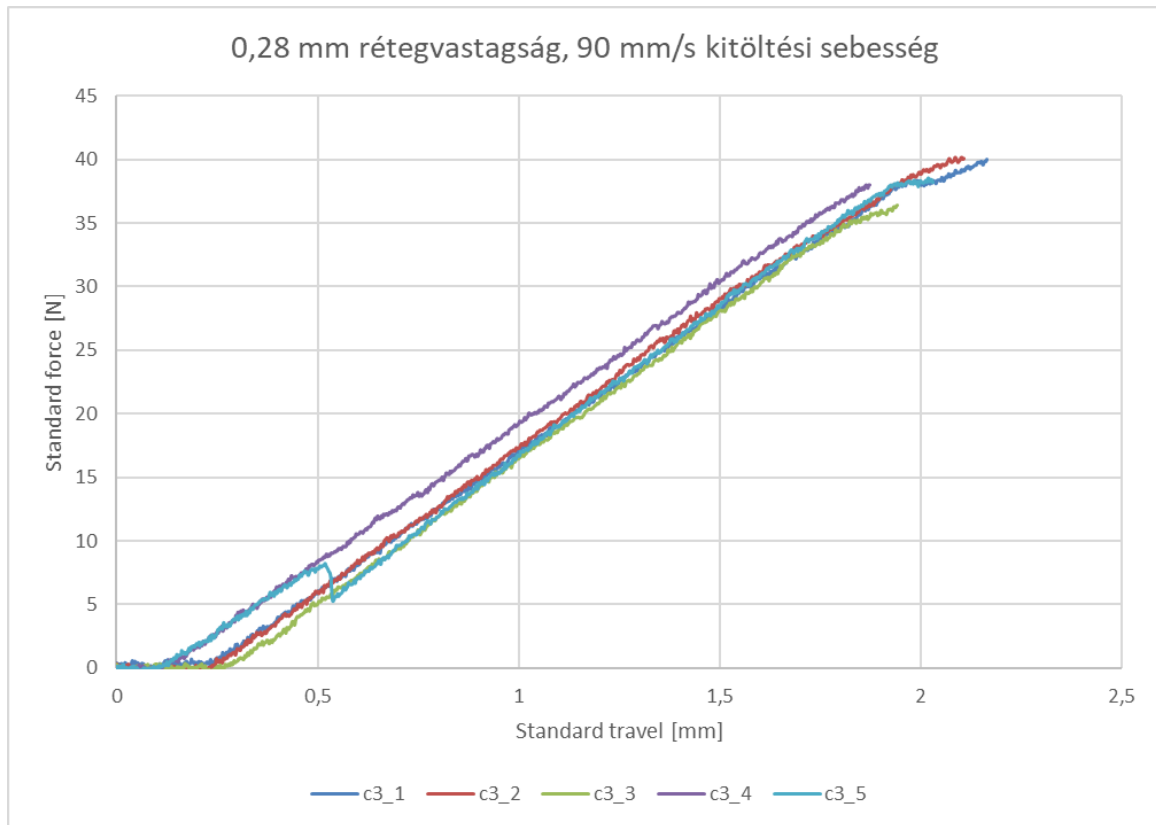
9.10. ábra A1 jelölésű próbatetek erő-nyúlás görbéi



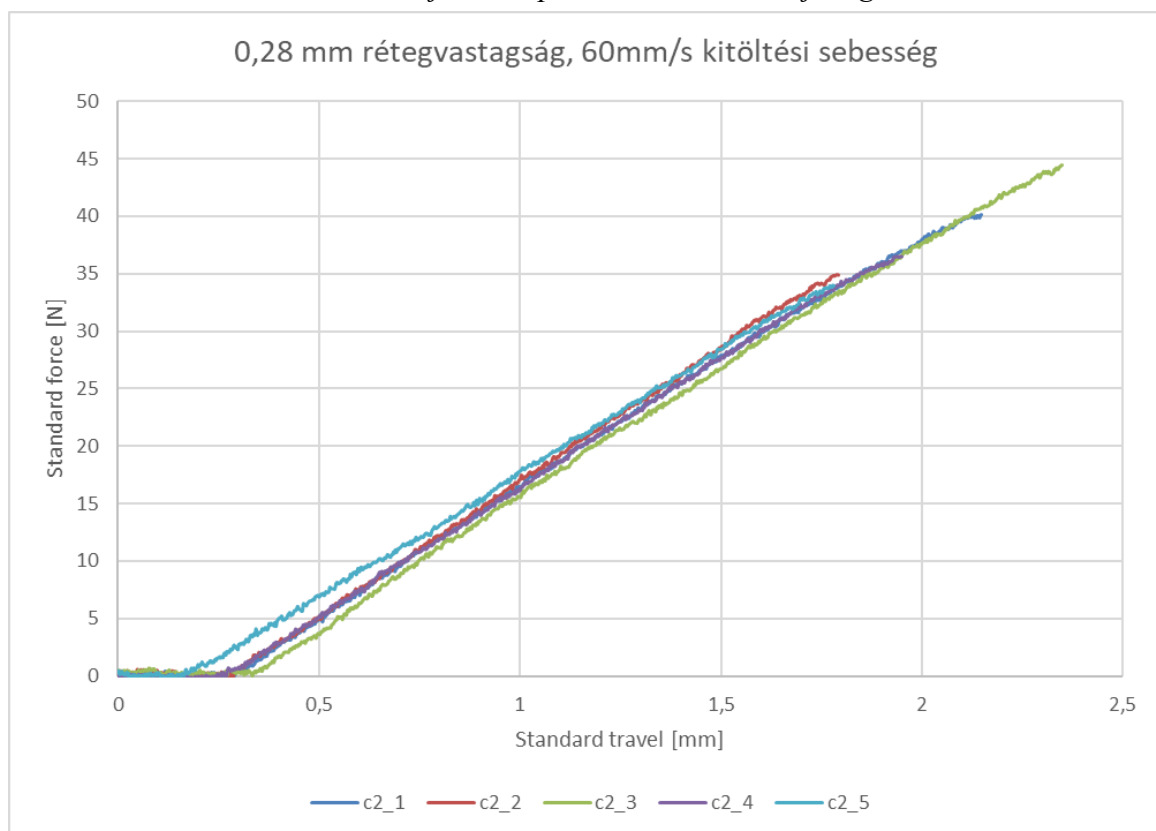
9.11. ábra A2 jelölésű próbatetek erő-nyúlás görbéi



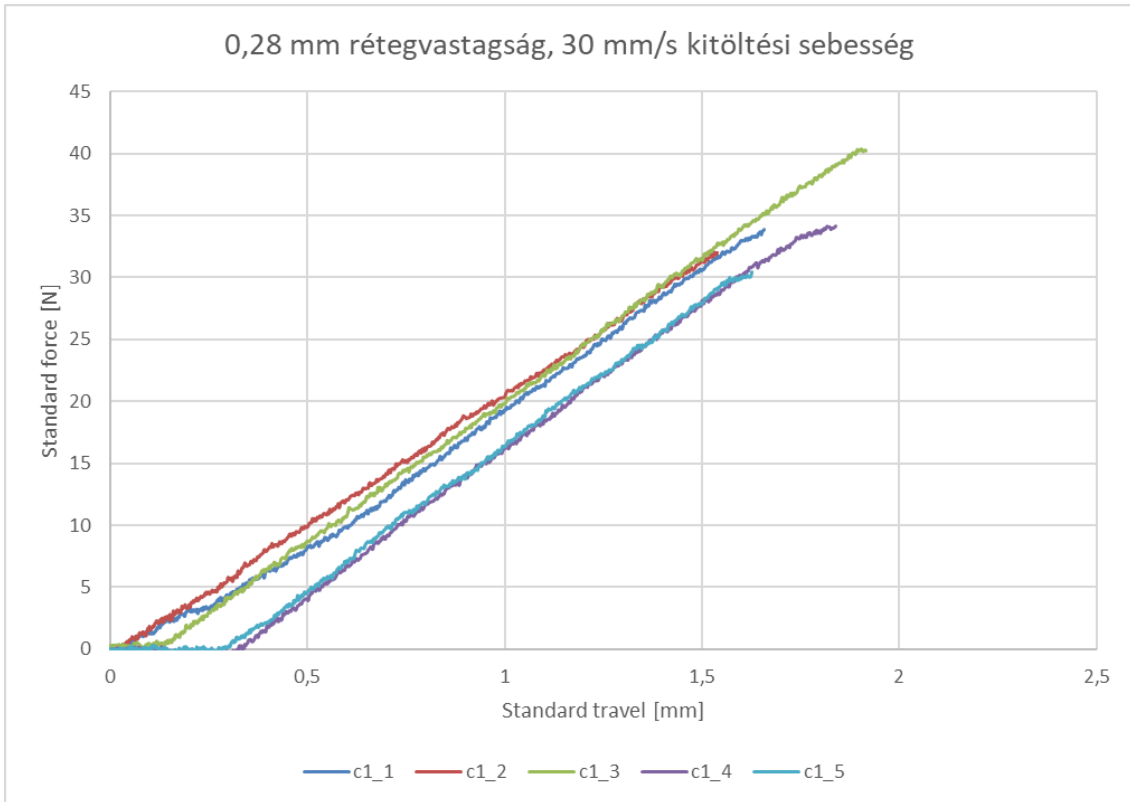
9.12. ábra A3 jelölésű próbatetek erő-nyúlás görbéi



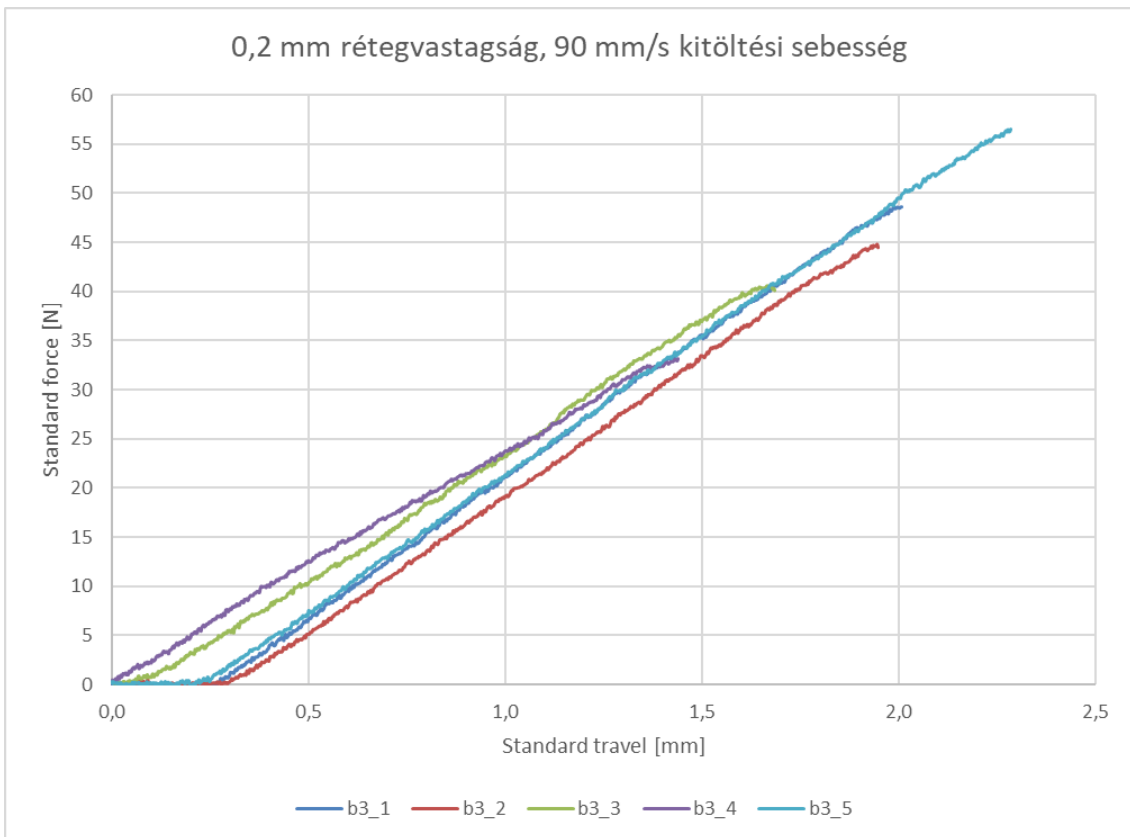
9.13. ábra C3 jelölésű próbatetek erő-elhajlás görbéi



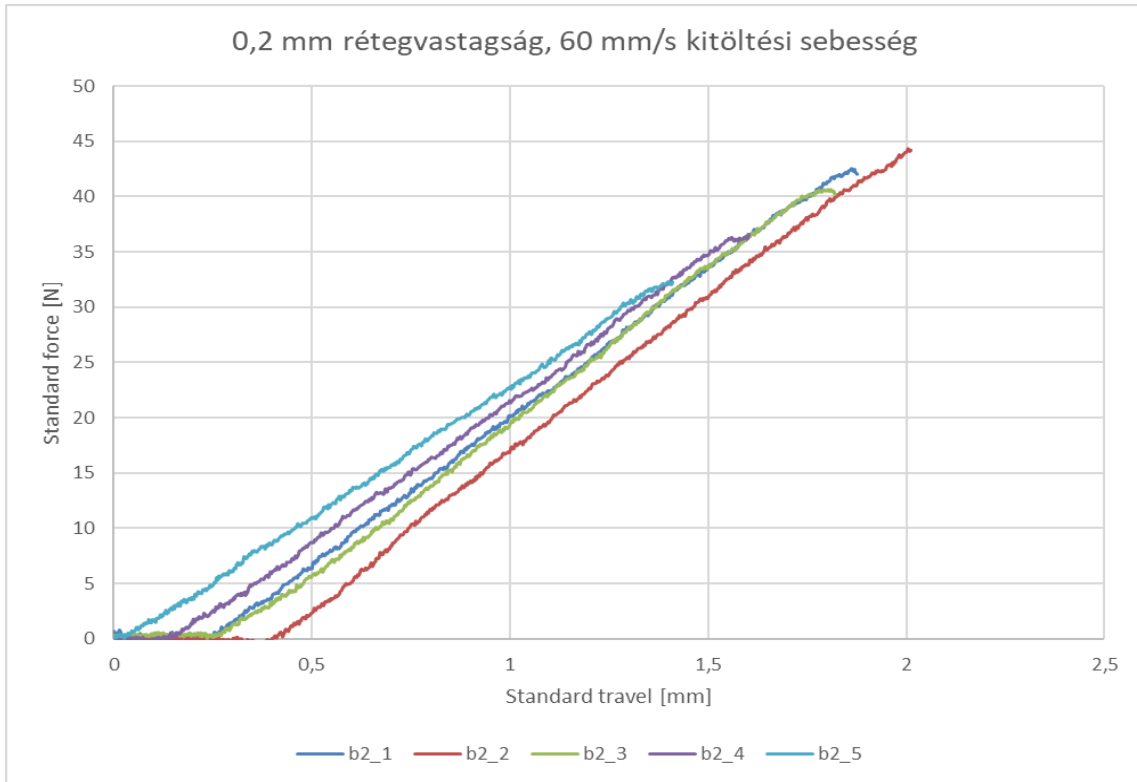
9.0.14. ábra C2 jelölésű próbatetek erő-elhajlás görbéi



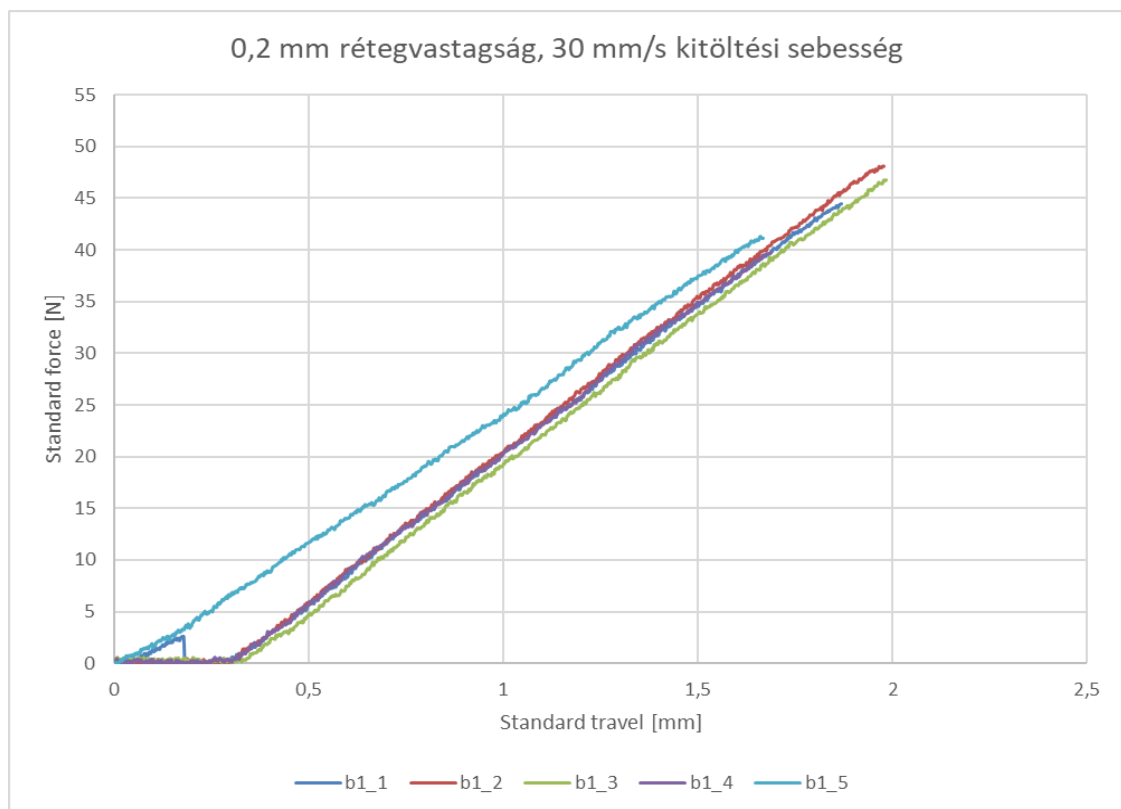
9.15. ábra C1 jelölésű próbatestek erő-elhajlás görbéi



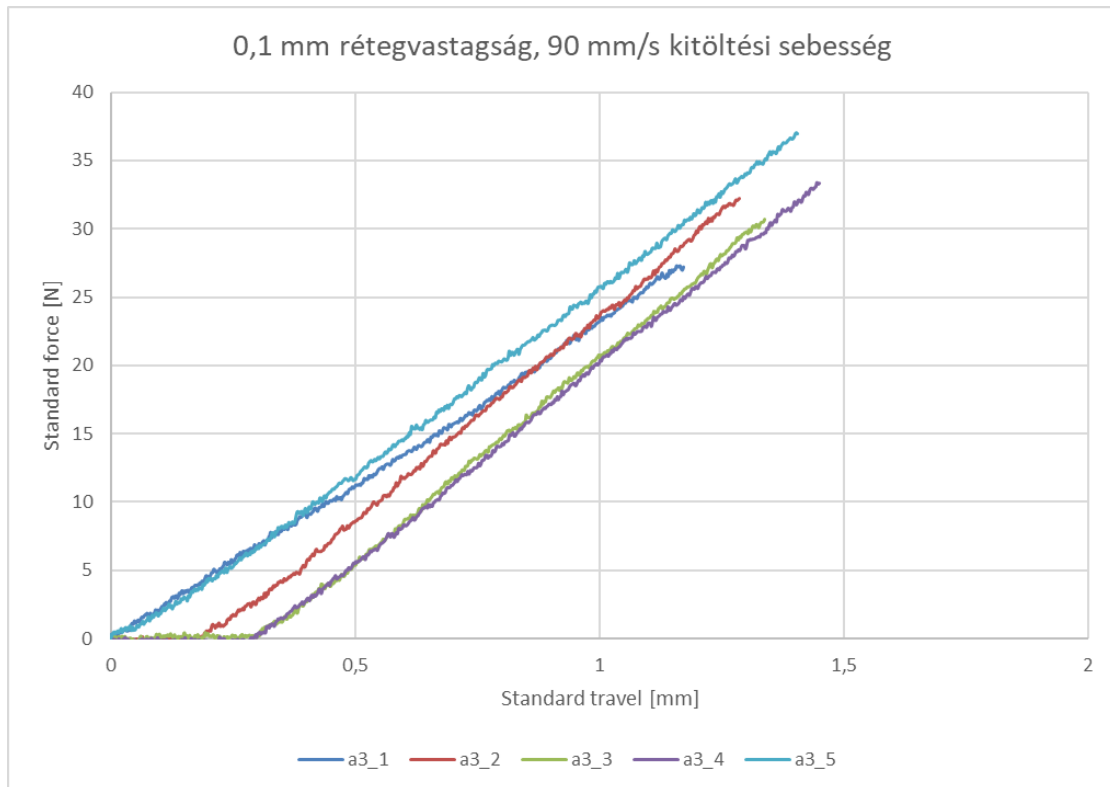
9.16. ábra B3 jelölésű próbatestek erő-elhajlás görbéi



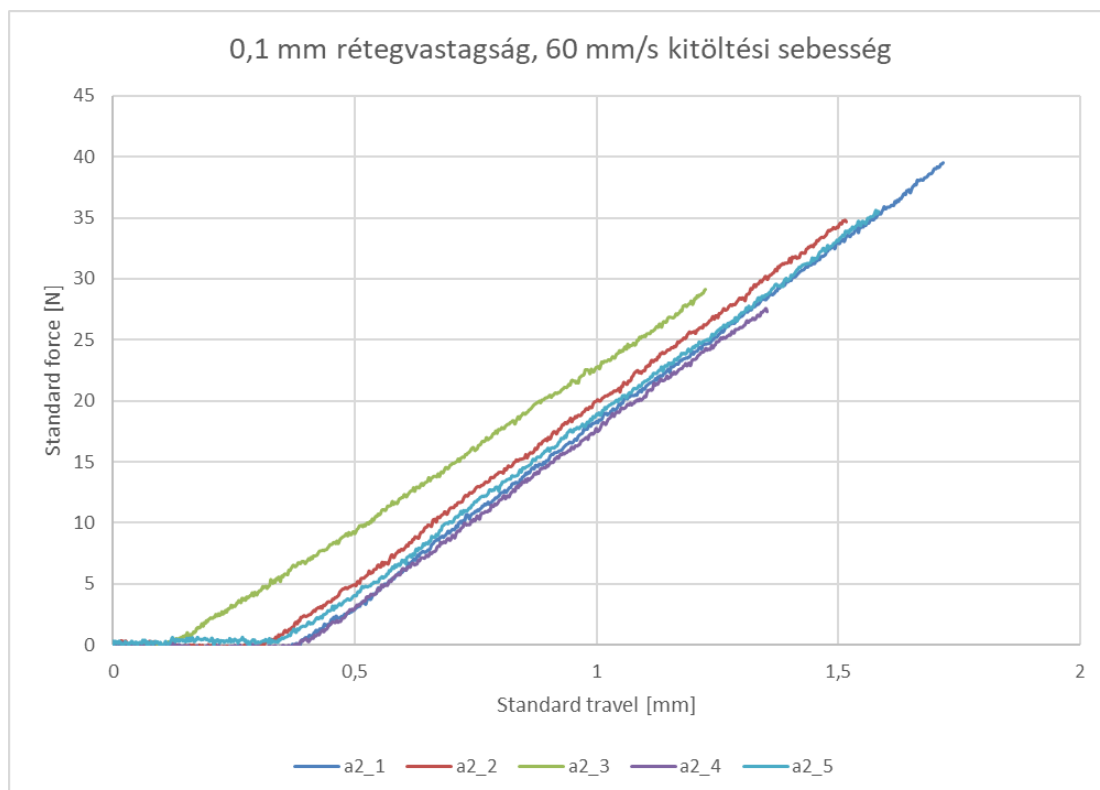
9.17. ábra B2 jelölésű próbatetek erő-elhajlás görbéi



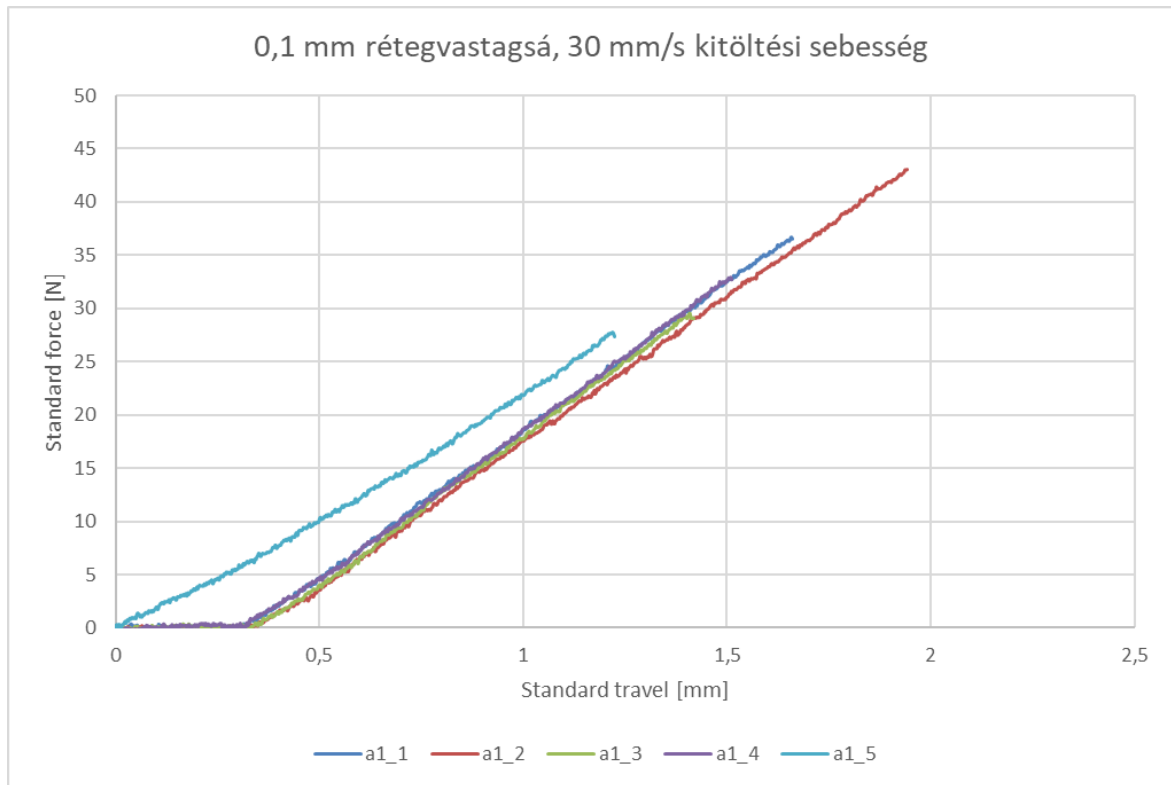
9.18. ábra B1 jelölésű próbatetek erő-elhajlás görbéi



9.19. ábra A3 jelölésű próbatetek erő-elhajlás görbéi



9.20. ábra A2 jelölésű próbatetek erő-elhajlás görbéi



9.21. ábra A1 jelölésű próbatestek erő-elhajlás görbéi