



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

HALÁSZ LAJOS TIBOR

TDK DOLGOZAT

3D NYOMTATOTT RÖVIDSZÁLAS KOMPOZITOK RÉTEGKÖZI  
HEGEDÉSE

Témavezető:

*Dr. Kovács Norbert Krisztián*  
adjunktus

Konzulens:

*Tóth Csenge*  
doktorandusz

BUDAPEST, 2023

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Kovács Norbert Krisztiánnak a dolgozatom során nyújtott támogatásáért, Tóth Csengének a folyamatos, kiemelkedő segítségéért és odaadó elhivatottságáért.

Külön köszönettel tartozom Varga László Józsefnek a szakítóvizsgálatok elvégzéséhez a gépbetanítésért és Lukács Norbertnek, aki a munkadarabok kinyomtatásához a Prusa Mini-t a rendelkezésemre bocsátotta.

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-II-BME-140 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A TDK dolgozat Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

A TDK dolgozat az OTKA FK134336 számú projekt keretein belül, a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással valósult meg.

# TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás.....	1
1. Bevezetés.....	4
2. Szakirodalmi áttekintés .....	5
2.1. Anyagextrúzió alapuló 3D nyomtatás (FFF) .....	5
2.1.1 Technológia ismertetése.....	5
2.1.2 Alapanyagok, kompozitok .....	6
2.1.3 Rövidszálas kompozitok nyomtatása .....	8
2.2. Rétegek közötti hegedés .....	8
2.2.1 Rétegek közötti hegedési folyamat bemutatása .....	8
2.2.2 Rétegek közötti szilárdság meghatározása, mért értékek.....	10
2.3. Összefoglalás, célkitűzés.....	11
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések.....	14
3.1. Kutatási terv.....	14
3.2. Felhasznált alapanyagok.....	15
3.3. Alkalmazott berendezések .....	16
3.4. Vizsgálati módszerek .....	16
3.4.1 Rétegek közötti szakítóvizsgálat .....	16
3.4.2 Optikai mikroszkópia .....	17
3.4.3 Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) .....	17
4. Kísérleti/fejlesztési rész.....	18
4.1. Kompozit próbatestek gyártása .....	18
4.2. Rétegek közötti szilárdság .....	22
4.2.1 A szakítóvizsgálat eredményei.....	22
4.2.2 Szálhossz vizsgálatok .....	24
4.2.3 Optikai mikroszkópia eredményei.....	26
4.2.4 Pásztázó elektronmikroszkópia eredményei.....	30
5. ÖSSZEFOGLALÁS .....	38
6. Felhasznált források .....	39

## Jelölések jegyzéke

### Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
FFF	Anyagextrúzió alapuló 3D nyomtatás (Fused Filament Fabrication)
PLA	polilátsav (polylactic acid)
GF	üvegszál erősítés (glass fiber)
BF	bazaltszál erősítés (basalt fiber)
CF	szénszál erősítés (carbon fiber)
SEM	Pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Electron Microscope)

## 1. BEVEZETÉS

Az anyagextrúzióon alapuló 3D nyomtatás (Fused Filament Fabrication) napjaink egyik legnépszerűbb additív gyártási technológiája. Ipari felhasználási területe legáltalánosabban a gyors prototípus gyártás, azonban a technológia alacsony költsége miatt már otthoni használata is kezd világszinten elterjedté válni.

A 3D nyomtatott termékeknel van egy kinevezett építési irány, melyben a polimer ömledéket az extruder rétegenként egymásra helyezi, s ezek érintkezéskor részben összehegednek. A hegedés minősége nagymértékben befolyásolja a termék mechanikai tulajdonságait, erre vonatkozóan a témában már több kutatás is készült. [1-2]

A nyomtatott termékek mechanikai tulajdonságainak javítása a hegedést befolyásoló tényezők módosításával érhető el. Ezen tényezők a nyomtatási paraméterek pl. sebesség, hőmérséklet, üregek mérete több falvonal esetén. Elterjedt továbbá a töltőanyagok, vagy erősítőszálak alkalmazása is, mely széles körben igazoltan javítja a mechanikai jellemzőket, azonban a hegedési folyamatra gyakorolt hatása még nem feltárt [3].

Célom a rétegeközi hegedés vizsgálata volt különböző erősítő száltípusok esetén rögzített paraméterekkel, eltérő száltartalom függvényében. Az általam vizsgált 1 réteg vastagságú téglalap alakú próbatestek bazalt, üveg és szén erősítéssel és politejsav mátrixanyaggal készültek. A lapkák építési irányban kerültek kivágásra a próbatestből, így a szakítóvizsgálattal a hegedés minősége vizsgálható. Kutatásomban feltártam az erősítőszál tartalom, illetve az eltérő hővezetési képességű száltípusok hatását a rétegeközi hegedési folyamatra.

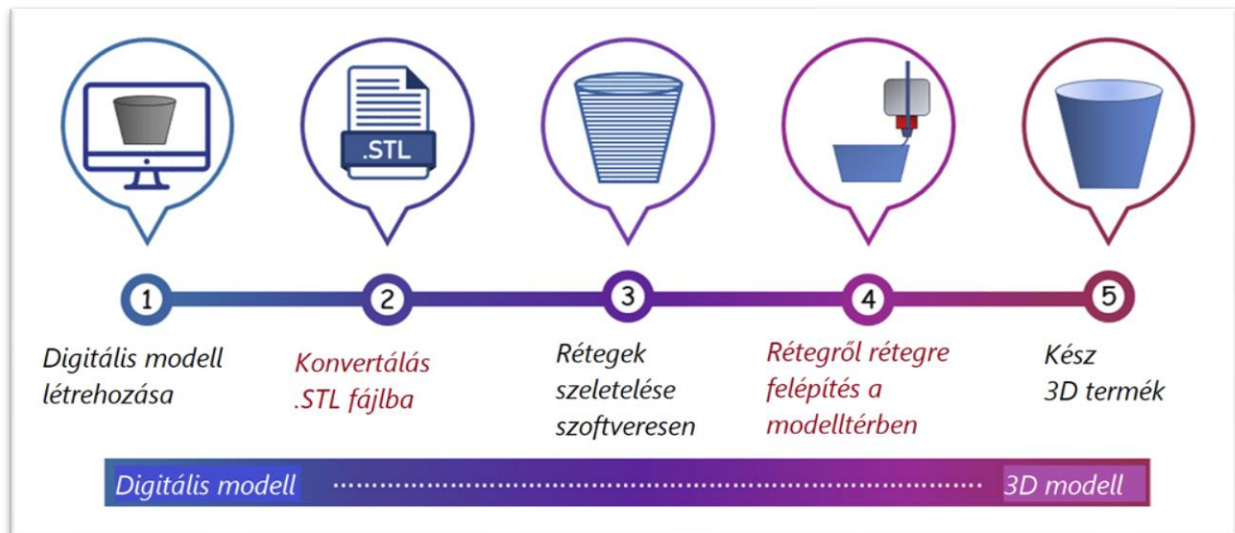
## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A rétegek közötti hegedési kapcsolatok áttekintése előtt ismertetném röviden az FFF technológiát, amellyel a próbatestek készültek, ez után térlek ki a szálerősítés használatának jelentőségére a szakirodalom alapján, bemutatva az általam használt erősítőanyagokat.

### 2.1. Anyagextrúzió alapuló 3D nyomtatás (FFF)

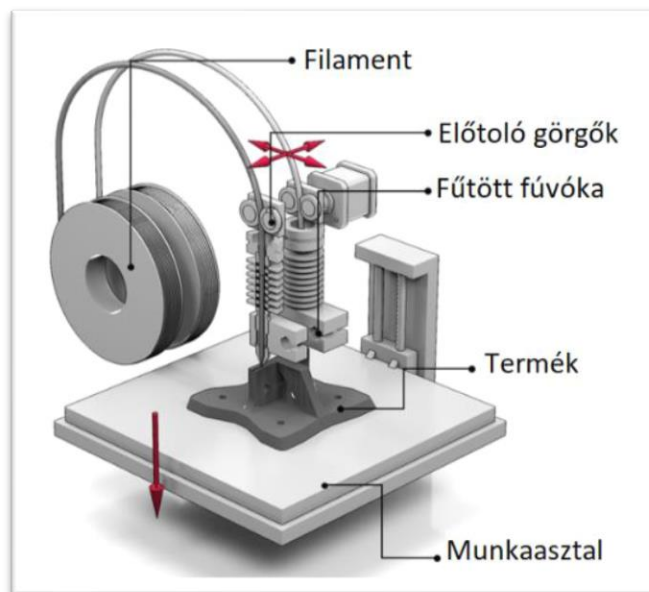
#### 2.1.1 Technológia ismertetése

Az anyagextrúzió alapuló 3D nyomtatás alapja, hogy termoplasztikus polimer alapanyagot egy fúvókán átsajtoltva állítunk elő egy előre megtervezett alkatrészt. A technológia általános lépéseit az 1. ábra mutatja be. A technológiát nagy tervezési szabadság jellemzi, komplex geometriák előállítására kiválóan alkalmas. A változtatható nyomtatási paraméterek eszköztára igen széles, fontos azonban ezek hatásait ismerni, mivel változtatásuk nagymértékben befolyásolja a kész termék minőségét is. Az így készült termékek jellemző hátrányai a gyenge rétegek közötti kapcsolat a vékony hegedési zónák és rétegek közötti üregek jelenléte miatt.



1. ábra - Additív gyártás lépései [4]

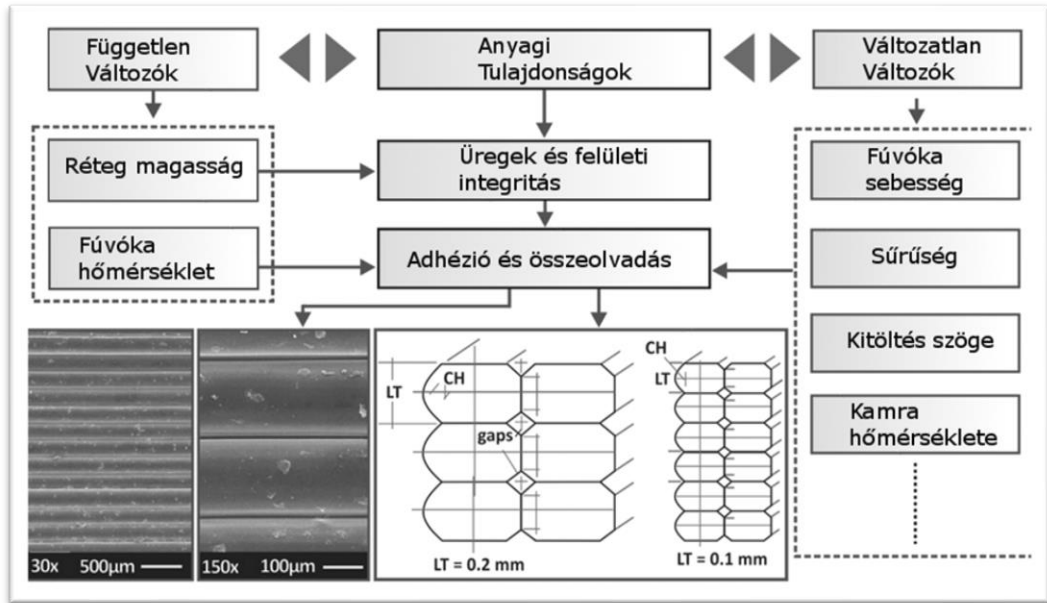
A filamentet egy előtoló berendezés juttatja el a nyomtatófejhez ahol az alapanyag megömlik és a munkatérbe kerül (2. ábra). A terméket rétegenként építjük fel, építési irányban, függőlegesen letről felfelé haladva. Miután egy síkmetszet elkészítésével végezett, a fej vagy a tárgyasztal elmozdul függőleges irányban a rétegmagasságnak megfelelő értékkel és elkészíti a következő réteget jellemző síkmetszetet. Ez a folyamat egészen a termék elkészültéig ismétlődik. Az FFF technológiához alkalmazott polimerszál, a filament jellemzően tekercselve kerül elhelyezésre a nyomtató mellett oly módon, hogy minél könnyebben el tudjon fordulni, megkönnyítve ezzel az adagolást. [5]



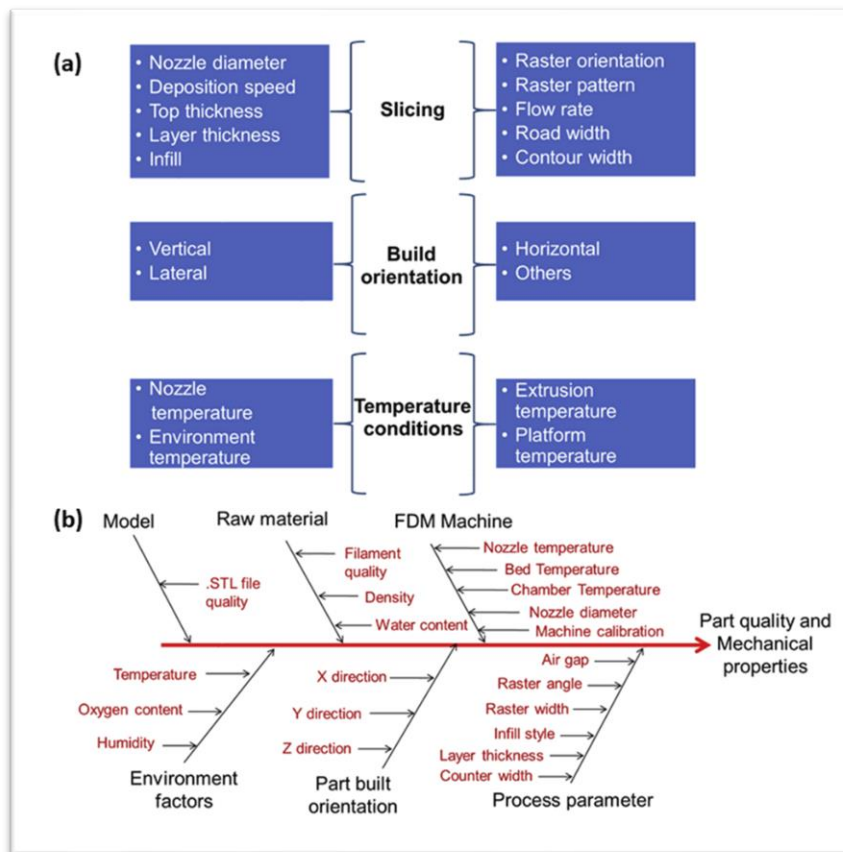
2. ábra – Anyagextrúzió alapuló 3D nyomtatás [5]

### 2.1.2 Alapanyagok, kompozitok

Az additív gyártás területén is növekvő igény mutatkozik a kompozit anyagok előállítására a jobb mechanikai tulajdonságok elérésének reményében, azonban még rengeteg a tisztázatlan körülmény az ehhez szükséges nyomtatási paraméterek hatásait illetően. Ezek hatásait úgy nevezett faktoriális kísérlettervezési módszerrel [6] lehetne egyszerre vizsgálni, azonban jelen dolgozat keretein belül kizárólag egy paraméter, a száltartalom változtatás mellett kívántam az eredményeket értékelni. A 3. ábra azokat a nyomtatási paramétereket összegzi, amelyek a rétegek közötti jellemzőket befolyásolják. Látható, hogy a rétegek közötti kapcsolat a réteg magassággal és a fúvóka hőmérsékletével közvetlenül befolyásolható. A 4. ábra ugyancsak a nyomtatási paraméterek hatásait foglalja össze, de nem csak a rétegek közötti kapcsolat, hanem a teljes termék minősége szempontjából. Eszerint a felosztás szerint a paramétereknek 3 fő csoportja van, a szeletelésből adódó (*slicing*), a nyomtatási orientációt befolyásoló (*build orientation*) és a hőmérsékleti viszonyokat befolyásoló paraméterek (*temperature conditions*).



3. ábra Nyomtatósi paraméterek additív gyártás esetén [7]



4. ábra Nyomtatósi paraméterek additív gyártás esetén [4]



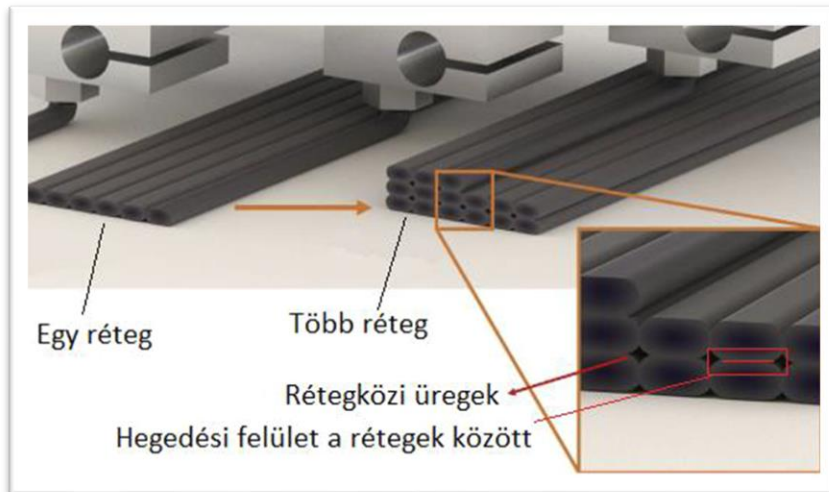
### 2.1.3 Rövidszálas kompozitok nyomtatása

A 3D nyomtatott termékek mechanikai jellemzőinek javítása érdekében elterjedtek a szálerősített kompozit alapanyagok.

Tekinalp és társai [8] megállapították, hogy szénszállal erősített ABS esetén 40% száltartalomnál az alapanyag már nem nyomtatható a fúvóka eltömődése miatt. Beran és társai [9] vizsgálták a fúvóka eltömődésének lehetséges okait és megállapították, hogy az eltömődés kizárólag a fúvókaátmérő és a töltőanyag átmérőjének arányától függ. Kutatásuk érdekes megállapítása, hogy az eltömődés független az alapanyag viszkozitásától. A növekvő száltartalom növeli a viszkozitást, azaz a belső súrlódást, így a filament kevésbé lesz folyóképes [10].

## 2.2. Rétegek közötti hegedés

Bár a 3D nyomtatás képes rendkívül felgyorsítani és költséghatékonyá tenni a gyártási folyamatokat, a nyomtatott alkatrészek szilárdsága nem vetekszik a hagyományosan gyártott (pl. fröccsöntött vagy préselt) alkatrészekével. A termék nem homogén, hanem rétegekből épül fel, így a rétegek közötti hegesztési varratok határfelületein kialakuló szilárdság lesz a meghatározó mechanikai jellemző. [5]



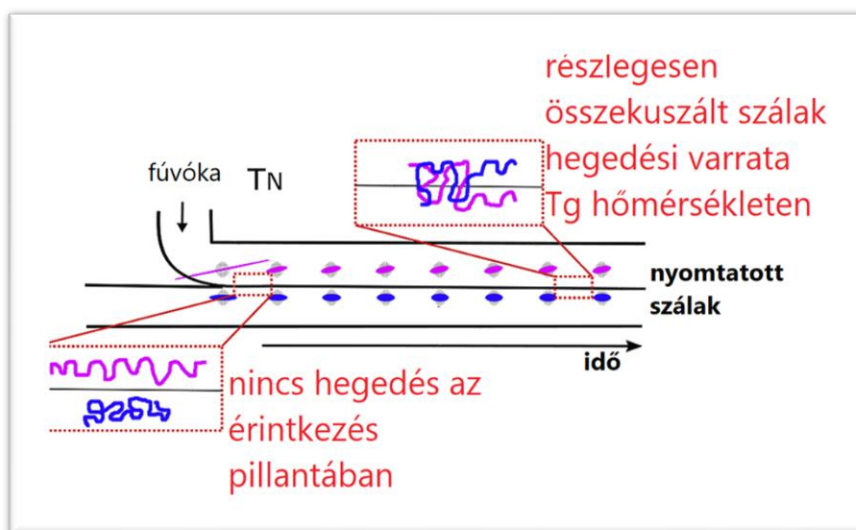
5. ábra - Rétegek közötti üregek, rétegek közötti hegedés értelmezése [5]

### 2.2.1 Rétegek közötti hegedési folyamat bemutatása

Ahogy nyomtatás közben a rétegek egymásra kerülnek, a hegedés a rétegek közötti diffúziós folyamat eredményeképp játszódik le. A folyamat akkor kezdődik mikor a

két réteg egy-egy adott pontjában először találkozik, ekkor még nincs hegedés. Ahogy a fúvóka elhalad az ömledékréteg hűlni kezd, és ezzel párhuzamosan hőátadás is történik az alsó rétegre, amely alacsonyabb hőmérsékleten van a saját lehűlési folyamatában (5. ábra).

A diffúzió akkor kezdődik el, amikor a két réteg határfelülete ömledék állapotba kerül, azonban fokozatosan lassul, mivel a fúvóka elhaladtával a határfelület is hűlni kezd.



6. ábra - Rétegekőzi hegedést magyarázó ábra [11]

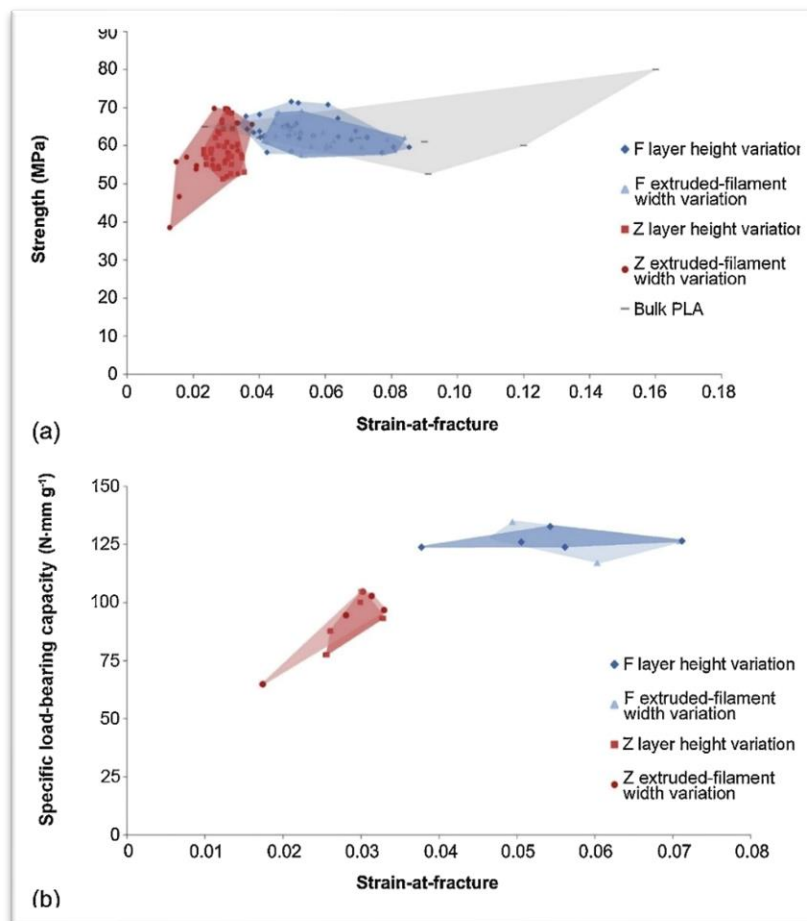
A diffúziót a fúvókában a nagy nyírási sebesség is befolyásolja, amely a hegesztés előtt jelentősen deformálja és szétzilálja a polimer mikroszerkezetét. A nyírás abból adódik, hogy a fúvókából függőlegesen kilépő ömledéket nagyon kis távolságon belül vízszintesen helyezzük el. [11]

A hegedés akkor megfelelő, ha a molekulaláncok áthatolnak a réteghatáron és összehurkolódnak, újrendeződnek. A folyamat beindulásának feltétele a polimerek hegesztéséhez hasonlóan a megfelelő hőmérséklet, nyomás és hűtési idő. 3D nyomtatás esetén ezeket a jellemzőket több nyomtatási paraméterrel befolyásolhatjuk, emiatt a folyamat sokkal összetettebb lesz. Egy új réteg elhelyezése során az ömledék hőmérsékletére befolyással van a fúvóka hőmérséklete, kilépéskor a légköri hőmérséklet, a munkatér hőmérséklete (ha pl. fűtött), illetve befolyásolja a hűtés alkalmazása is, amennyiben használunk extra ventilátorokat a munkatérben, vagy a fúvóka közelében közvetlenül az extruderfejen. J. Coogan és társai a kutatásukban összefüggést tapasztaltak az ömledéknomás és a rétegvastagság között, miszerint az olvadáknomás kis rétegmagasság esetén magas és a rétegmagasság emelésével csökken. [12] Mivel a rétegvastagság paraméter a szeletelő programban szoftveresen beállítható, így a nyomást tekinthetjük állandónak.

## 2.2.2 Rétegek közötti szilárdság meghatározása, mért értékek

Szálérősítést nem tartalmazó filament anyagok rétegek közötti hegedését már több kutatás is vizsgálta a korábban említett paraméterek változtatásaival. Ezen vizsgálatok tapasztalatai is megállapították, hogy a rétegek közötti szilárdságot leginkább befolyásoló tényezők a rétegek közötti diffúzió, a nyírás sebesség, az anyag reológiai karakterisztikája. A szilárdságbeli változásokat okozó paraméterek változásait úgy nevezett „in-line” érzékelőkkel figyelték meg az extruder kilépő keresztmetszetében. [13]

James Allum és társai tiszta PLA esetében vizsgálták egy minta építési és elhúzási irányú mechanikai tulajdonságait. Az eredmény alapján a kötési szilárdság építési irányban az elhúzási irányéhoz hasonló értékeket produkált, azonban a szívósság és a fajlagos teherbírása alacsonyabb volt. [14]

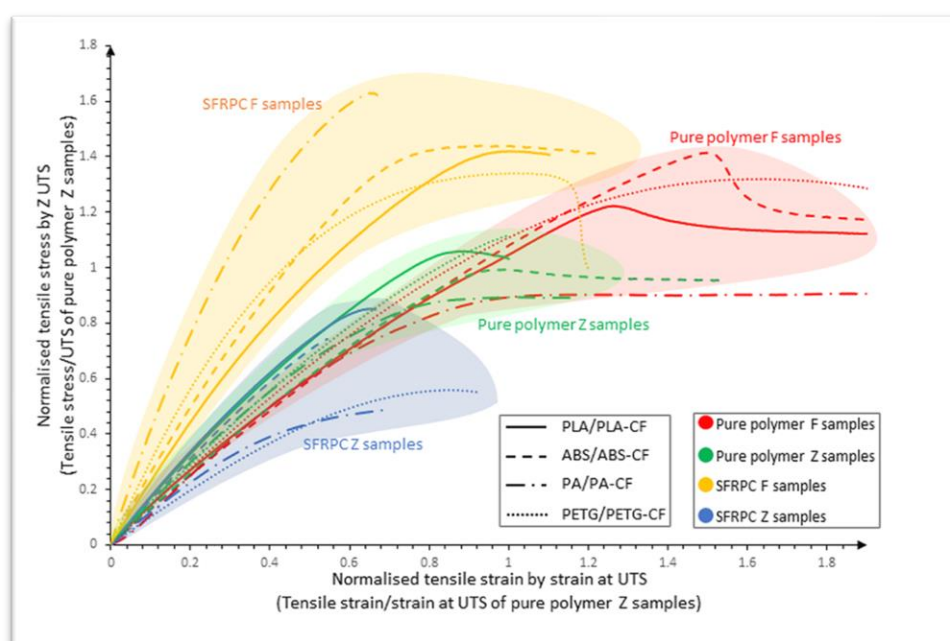


7. ábra Építési (Z) és elhúzási (F) irányú mechanikai tulajdonságai a tiszta PLA anyagnak [14]

Adódik a kérdés, hogy a kompozit rövidszálérősítésű filamentekben építési irányban vajon milyen hatással vannak a szálak a kötési szilárdságra, amennyiben részt vesznek a hegedési folyamatban?

Egy tanulmányban összehasonlításra kerültek FFF technológiában használatos alappolimerek ((PLA, ABS, PETG) szálerősítés mentes és szénszálerősítéssel rendelkező változataiból készült próbatestek szakítóvizsgálatainak eredményei, mind építési-, mind elhúzási irányban.

A 7. ábrán jól látható, hogy az elhúzási irányában (F) a szakítószilárdság jelentősen növekedett a szálak hozzáadásával, hiszen az extruder szűk keresztmetszetén egy irányba kilépő ömledéknek jelentős orientációs hatása van, és a kompozit szálak ennek megfelelően elhúzási irányban beállva kiváló erősítőanyagként funkcionálnak szakításkor. Ezzel szemben építkezési irányban (Z) az anyagok szakítószilárdságában csökkenés tapasztalható, a szálak nem erősítenek és jelenlétükkel még csökkentik is a mátrix-mátrix adhéziós kapcsolat kialakulási felületét a töltetlen alappolimerhez képest, hibahelyekként funkcionálnak. [15-16]



8. ábra - Töltetlen alappolimerek és szénszálerősített alappolimerek szakítóeredményei [16]

### 2.3. Összefoglalás, célkitűzés

A korábban említett nyomtatási paraméterek lehetnek pl. a fúvóka átmérő, a nyomtatási sebesség, a száltartalom, a szálak hossza, átmérője, orientációja, mátrix anyaggal való adhéziója, a rétegek közötti üregek hossza, mérete, átmérője, alakja, az extrúziós tényező, és a lista még sokáig folytatható. Szakirodalmi forrásokból levont következtetésem, mely alapján a kísérleteket végeztem:

- **Viszkozitás:** A növekvő száltartalom növeli a viszkozitást, azaz a belső súrlódást, így a filament kevésbé lesz folyóképes, a fúvóka eltömődhet. [17] Ennek kiküszöbölése érdekében érdemes nagyobb nyomtatási hőmérsékletet választani,

vagy nagyobb fúvókaátmérőt. Ez okból a dolgozatomban 0,8 mm-es átmérőjű fúvókát használtam.

- **Száltartalom:** A jelenleg még használhatónak ítélt legnagyobb rövidszálas erősítőanyag térfogatszázalék 28% körül mozog [17], emiatt a dolgozatomban 5-től 25 százalékos szálerősítésű filamenteket vizsgáltam.
- **Szál - mátrix kapcsolat:** Az erősítőanyag megváltoztatja az alappolimer szilárdságát és a merevségét a szál és a mátrix adhéziójától függően. Ahol ez a tulajdonság kedvezőtlen, ott akár csökkentheti is, hiszen a száltartalom növelésével csökkentjük a jó adhézióra képes térfogatot. A dolgozatomban mikroszkópi felvételeken vizsgáltam a szál mátrix adhézió megfelelőségére utaló jeleket.
- **Szálak orientációja:** A Dongming Yang és társai által végzett kísérlet bizonyította, hogy a szálak orientációja a fúvóka belső geometriájától függően változhat kilépéskor, valamint a fúvóka és a tárgyasztal közötti kis távolság és egymáshoz képesti relatív mozgás is torzítja az ömledékárambeli szálorientációt. Kompozitokról lévén szó, tudvalevő, hogy a szálak hosszanti irányban rendelkeznek előnyös szakítási tulajdonságokkal. A dolgozatomban mikroszkópi felvételeken vizsgáltam, mennyire orientáltak a szálak a töretfelületen és környékén. [18-19]
- **Szálhossz:** Rövidszálas kompozitok szakítószilárdságát nagymértékben befolyásolja a szálhossz. A kritikus szálhossz egy anyagpárra jellemző érték, amely megadja azt a minimum hosszt, amelynél még erősít a szál.
- **Üregek:** A rétegek között a gyártás során üregek alakulnak ki, melyekre hibahelyekként tekinthetünk, csökkentik a rétegek közötti kapcsolódó felületek nagyságát, ami rontja a megfelelő rétegek közötti kapcsolat kialakulását. A Siwon Yu és társai által végzett kutatásban kétféle üreget definiáltak: „Inter-„ és „Inner-filament” üregeket, melyeket fordíthatunk rétegek közötti és rétegen-belüli üregeknek. Az általam alkalmazott próbatest egyetlen réteg falvastagsággal rendelkezik, így a dolgozatomban kizárólag az ömledékáramban létrejövő folytonossági hiányokból képződő, rétegen-belüli üregek fordulhatnak elő, mint befolyásoló tényező. [20]
- **Fűtés-hűtés:** A dolgozatomban sem fűtött munkatérrel, sem extra ventilátoros hűtést nem alkalmaztam a munkatérben és a fúvókán.

A töltetlen alappolimerek tekintetében a rétegek közötti hegedés témaköre már alaposan körül járt. Látható, hogy a folyamat soktényezős, a nyomtatási paraméterek egymásra is hatással vannak. Kompozit rövid-erősítőszálak alkalmazására már találni szakirodalmi leírásokat a témában, de a legtöbbje egy-vagy több alappolimer összehasonlítása egy szénszállal töltött mintával.

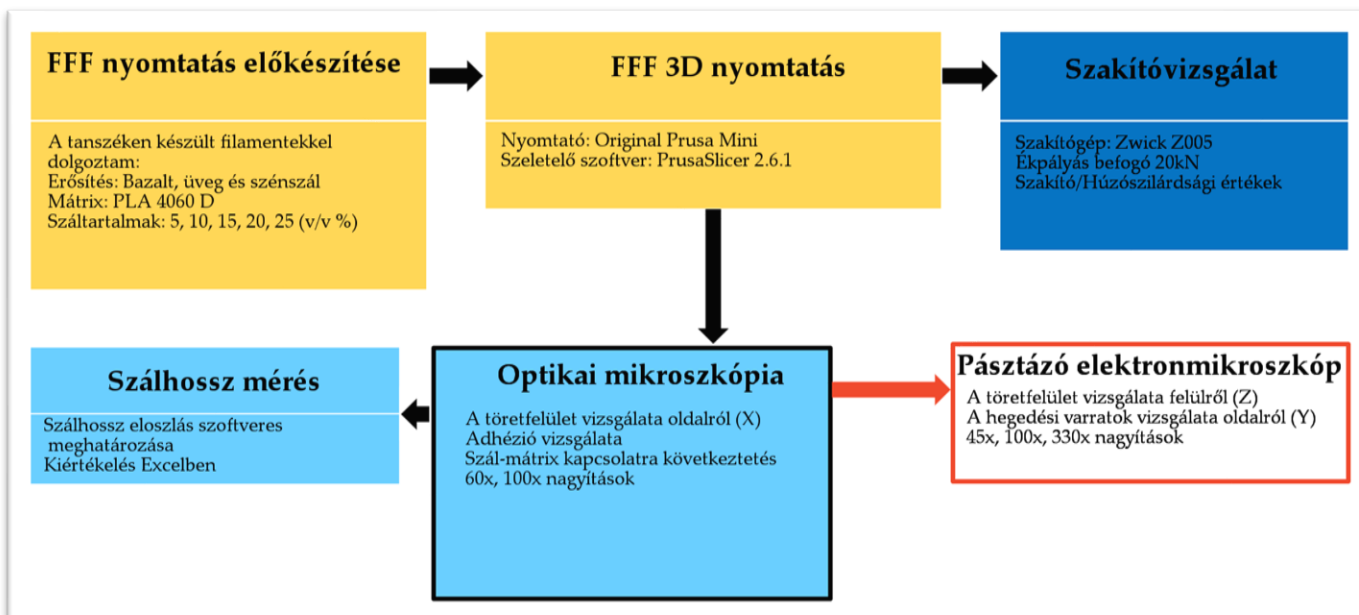
A dolgozatom célja az, hogy szélesebb körben is megvizsgáljam a rétegek közötti hegedés jelenségét üveg-, szén- és bazaltszálak alkalmazásával, eltérő száltartalmak függvényében. Vizsgálom a szálak szerepét a diffúziós folyamatokban, az építési irányban (Z) történő szakítóvizsgálatok eredményeinek kiértékelésével, valamint a szál-mátrix adhéziós kapcsolatot, amelyre a mikroszkópi töretfelület vizsgálata ad majd lehetőséget.

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben az általam felhasznált alapanyagokat, berendezéseket, mérési módszereket ismertetem.

#### 3.1. Kutatási terv

Első lépésként előkészítem a nyomtatást, amely során megválasztottam a tanszéken készült kompozit filamentek megfelelő nyomtatási paramétereit. A nyomtatásokat többféle próbatest geometriával is kipróbáltam, hogy a szakításra kerülő részeket melyekből lesz a legkönnyebb előállítani. A teljes kutatási tervet a 8. ábra mutatja be.



9. ábra - Kutatási terv a dolgozatomhoz

A nyomtatásokat a tanszéki laborban végeztem egy Prusa Mini nyomtatón, a nyomtatás elkészülte után pedig egy kevlárvágó ollóval és lemezollóval alakítottam ki belőlük a szakítópróbatéteket. A szakítóvizsgálatok eredményeit egy Excel táblázatban formájában letöltöttem a vizsgálat után, ugyanitt végeztem a kiértékelésüket is. A töretfelületek vizsgálatára, a szálak átlagos hosszának mérésére, valamint a szál-mátrix adhézió vizsgálatára optikai mikroszkópot és nagyobb nagyítások szükségessége esetén pásztázó elektronmikroszkópot alkalmaztam.

### 3.2. Felhasznált alapanyagok

A dolgozatomban a mátrix anyagnak a PLA anyagot választottam, mert rendkívül elterjedt, mechanikai tulajdonságai már ismertek, könnyen feldolgozható és olcsó. A választott PLA típus:

- Amorf politejsav PLA 4060D (NatureWorks LLC)

A mátrix anyaghoz megfelelő szálhányadban adagolt rövid erősítőszálak:

- Vágott bazaltszál (Kamenny Vek)
- Vágott szénszál (The Panex 35 Chopped Pellet 95 product of Zoltek Zrt)
- Vágott üvegszál

Jelölés	Alapanyagok			Száltartalom hatása
	Mátrix	Vágott szál	Száltartalom	Rétegekőzi kötőszilárdság (szakítóvizsgálattal)
BF_5 BF_10 BF_15 BF_20 BF_25	PLA 4060D	BF Kamenny vek 8 mm	5	Fix nyomtatási paraméterekkel*, típusonként 5 db próbatest
			10	
			15	
			20	
			25	
CF_5 CF_10 CF_15 CF_20 CF_25		CF Zoltek PX35 8 mm	5	Fix nyomtatási paraméterekkel*, típusonként 5 db próbatest
			10	
			15	
			20	
	25			
GF_5 GF_10 GF_15 GF_20 GF_25	GF	5	Fix nyomtatási paraméterekkel*, típusonként 5 db próbatest	
		10		
		15		
		20		
		25		

10. ábra - A felhasznált alapanyagok a dolgozatomban

A felhasznált filamentek a tanszéken kerültek legyártásra a kutatást megelőző fél évben. A filamentek a legelterjedtebb kompaundálási módszerrel készültek, a PLA mátrixhoz a szükséges térfogatszázalékban hozzáadagolják a rövidszál keverékeket (szén, üveg, bazalt) és egy LTE 26-44 kétcsigás extruderrel összedolgozták. A csigák sebessége 25 fordulat/perc volt, a zóna hőmérsékletei 180 - 200 °C közötti hőmérsékletűek voltak. A kompaund, elkészülte után 6 mm hosszú pelletszemcsékké lett granulálva, melyből utolsó lépésben a filamentet egy 3Devo Precision 450 egycsigás filament extruderrel állítottuk elő. A csiga sebessége 4,5 fordulat/perc volt, a zóna hőmérsékletei pedig 170 °C, 210 °C, 185 °C és 175 °C voltak. A filamentek átmérője 1,7±0,5 mm átmérőre lett gyártva.



### 3.3. Alkalmazott berendezések

A gyártást megelőzően egy CAD modellt készítettem a kívánt geometriáról, melyet egy szeletelőszoftver (PrusaSlicer 2.6.1) síkrétegekre bont. A megfelelő nyomtatási paraméterek beállítása után a program előállítja a nyomtatáshoz szükséges parancsokat tartalmazó G-kódot, melyet a 3D nyomtatóra feltöltve megkezdhető a nyomtatás.

- **FFF 3D nyomtató: Original Prusa Mini**

A nyomtatás után egy kevlárvágó ollóval és a tanszéki lemezvágó ollóval feldaraboltam a próbatesteket.

- **Kevlárágó olló: Novia SZ-AP007**
- **Lemezolló: BS 400 karos lemezolló**

A próbatestek előállítása után a tanszéki labor szakítógépén végeztem a szakítóvizsgálatokat:

- **Szakítógép: Zwick Z005 + 20kN ékpályás befogó pofák**

A töretfelületek, illetve a szálhossz vizsgálatára a tanszéki mikroszkópok használatával került sor:

- **Optikai mikroszkóp: Keyence VHX-500**
- **Pásztázó elektronmikroszkóp: JEOL JSM 6380LA**

A berendezésekről képeket a 4. Kísérleti rész -ben helyeztem el.

### 3.4. Vizsgálati módszerek

#### 3.4.1 Rétegekőzi szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat során egy szabványos próbatestet két végénél rögzítünk egy-egy befogóba, majd a próbatestre tiszta húzóigénybevételt fejtünk ki. A mérés jellemzően a próbatest szakadásáig, vagy egy előre megadott nyúlásértékig tart. Eredményként erő-elmozdulás görbét kapunk. A vizsgálat által meghatározhatjuk a próbatest szakítószilárdságát, szakadási nyúlását, húzószilárdságát, húzószilárdsági nyúlását és rugalmassági modulusát.

Ezt a módszert a szakirodalomban leírtakhoz hasonlóan azért választottam a rétegekőzi kapcsolat vizsgálatára, mert építési irányban elvégezve a szakítóvizsgálatot arról közvetlen és egyértelmű információ nyerhető és a rétegekőzi kapcsolat erősségét közvetlenül számszerűsíteni lehet húzószilárdság formájában. [5]

A szakítóvizsgálat esetében a meghatározó szakítási paraméterek:

- Szakítóvizsgálat sebesség: 5 mm/perc
- Befogási távolság: 40 mm
- A kiinduló keresztmetszetek átlagos szélessége és vastagsága

A kiértékelés során meghatároztam a szakítószilárdságot az alábbi összefüggés szerint:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ahol  $\sigma$  (MPa) a szakítószilárdság,  $F$  (N) a szakadáskor mért erő és  $A$  (mm) a kezdeti keresztmetszet.

### 3.4.2 Optikai mikroszkópia

Az optikai mikroszkóp egy olyan műszer, amely a látható fénnel megvilágítva teszi lehetővé teszi apró minták részletes vizsgálatát 40-500-szoros nagyítási tartományokon. A vizsgálat során 60-szoros és 100-szoros nagyítással készítettem képeket az erősített darabok legkisebb és legnagyobb száltartalmat tartalmazó mintáiról.

A szállhossz eloszlás vizsgálatához kézenfekvő volt ezt a műszert alkalmazni ugyanis a szálak a mikroszkóp által vizsgált mérettartományban tökéletesen kivehetők és jó következtetéseket tehetünk az adott szál és mátrix adhéziós tulajdonságaira is.

### 3.4.3 Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM)

A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) egy olyan műszer, amelyet a mikroszkopikus részletek nagyobb felbontással és mélyebb áthatolással történő vizsgálatára használnak. Működése eltér az optikai mikroszkópétól, mivel elektronokat használ fény helyett. A SEM működése a következőképpen történik: Elektronforrásból (pl. wolfram katód) nagyon magas energiájú fókuszált nyalábokat irányítunk a minta felé. Amikor az elektronok a mintára esnek, a mintából származó visszaszórt elektronok jeleit észlelik és rögzítik. Ezen jelek alapján a mikroszkóp számítógépes programja elkészíti a minta 3D topográfiai térképét, amely lehetővé teszi a részletes felbontást és a mélyebb áthatolást valós időben. A mérés során 45-szörös, 100-szoros és 330-szoros nagyításokat alkalmaztam a képek készítésénél, de a SEM akár 18 000-szeres nagyításra is képes, így rendkívül részletes és pontos képeket készíthetünk a vizsgált felületről.

A SEM-et azon felületek vizsgálatára használtam, amelyre az optikai mikroszkóp nem volt alkalmas: A töretfelületek felülnézeti vizsgálatára, valamint a minták széléből kivágott darabokon a varratok keresztmetszeti képének vizsgálatára.

A vizsgálat előtt a mintákat aranyoztuk a statikus töltődés elkerülése érdekében.

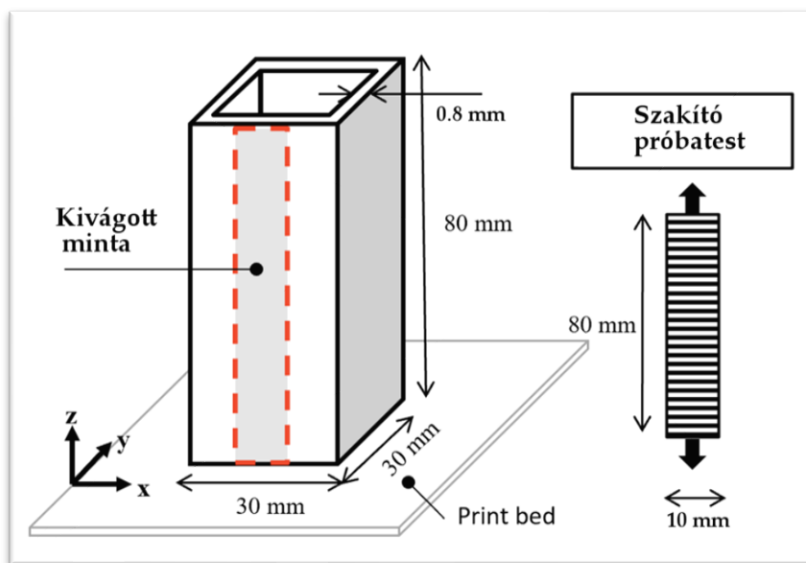
## 4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Ebben a fejezetben mutatom be a kutatás során végzett önálló munkát.

### 4.1. Kompozit próbatetek gyártása

A geometria, amellyel dolgoztam a 10. ábrán látható. A falvastagság a fűvókaátmérővel volt azonos (0,8 mm), a próbatest magassága 80 mm, egy 30x30mm es téglatest alapú hasáb, melynek az alsó és felső lapja nyitott.

A szeletelő szoftverben (PrusaSlicer 2.6.1) alkalmazott nyomtatási paramétereim:

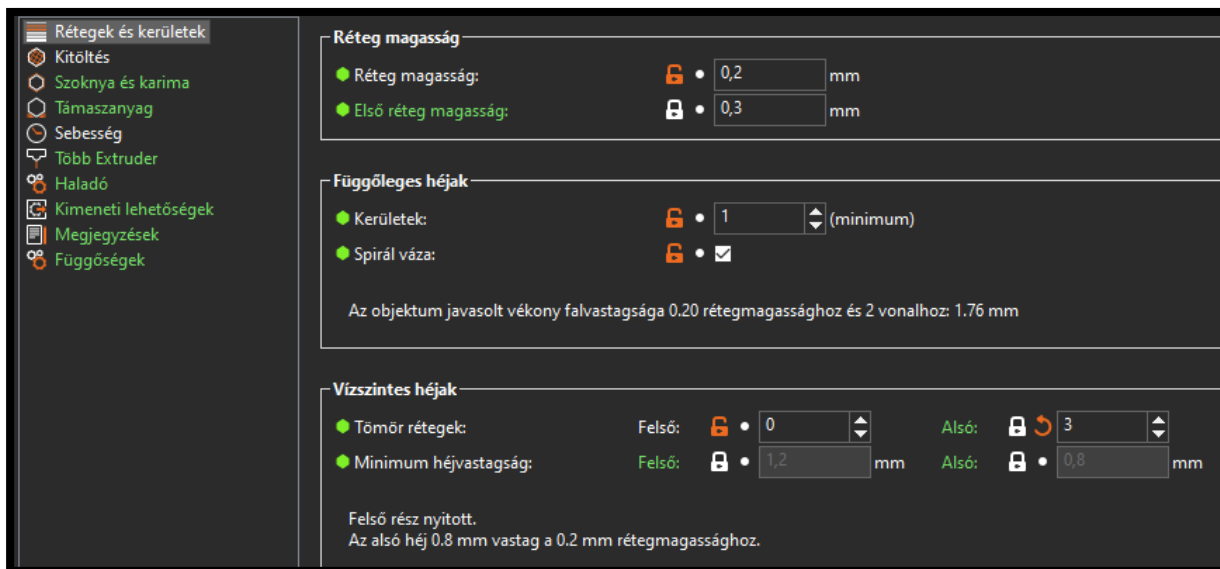


41. ábra - A szakítópróbatetest előállítása

- Rétegek és kerületek (Layers and perimeters):

A réteg magasság:	0,2 mm
Az első réteg magassága:	0,3 mm
Spirál váza funkció	engedélyezve

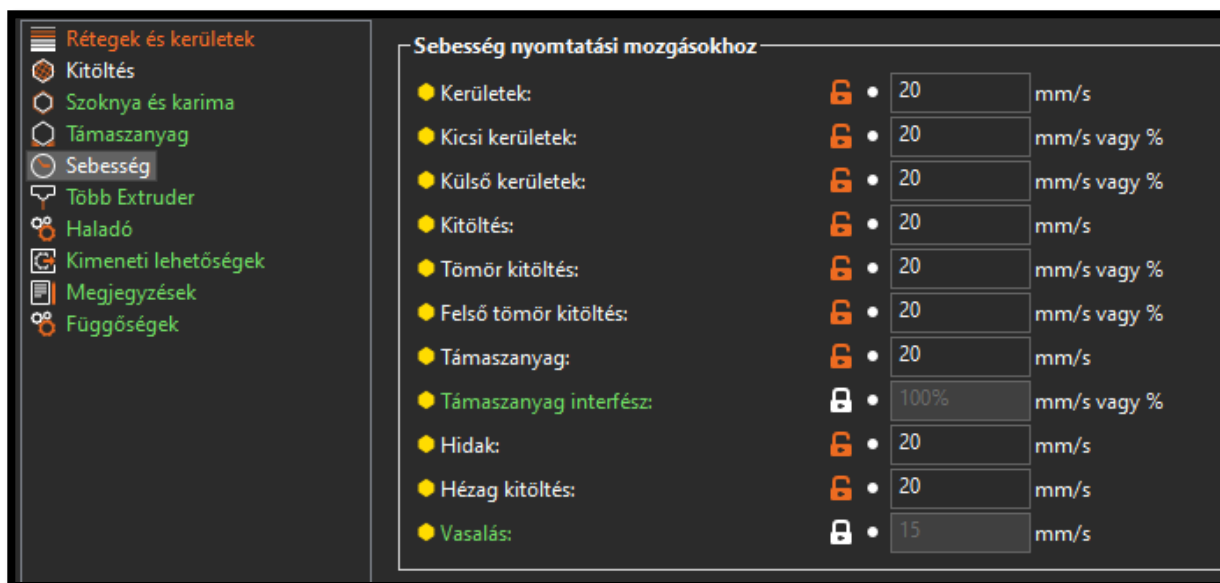
A Spirál váza funkció olyan megfontolásból került kiválasztásra, hogy az ömledékáram megszakadása nélkül nyomtatódhasson le a geometria. A kész próbatestek felépítésében semmi változást nem okozott volna. A Spirál váza funkció egyébként is az egy réteg kerületi vastagságú modellekhez ajánlott, így a kutatásomban ez a célnak pont megfelelt.



52. ábra - Rétegek és kerületek beállítása PrusaSlicerben

- Sebesség (Speed)

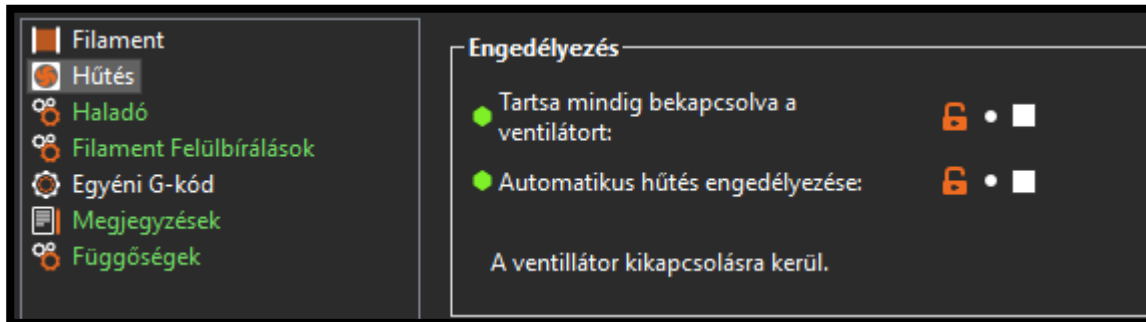
Az összes nyomtatási sebesség 20 mm/s-ra lett állítva. Ez a lassú sebesség garantálja, hogy a rétegek elhúzási sebessége ne legyen túl gyors, létrejöhesse a megfelelő hegedés. Az összes adat ennyi, hogy ne fordulhasson elő a fej gyorsulásából adódó eltérés a nyomtatás közben.



13. ábra - Sebesség beállítása PrusaSlicerben

- Hűtés (Cooling)

Nem akarjuk extra hűtéssel befolyásolni a nyomtatást. A ventilátor így kikapcsolásra került. Az Enable menüpont alatt mindkét érték le van tiltva.

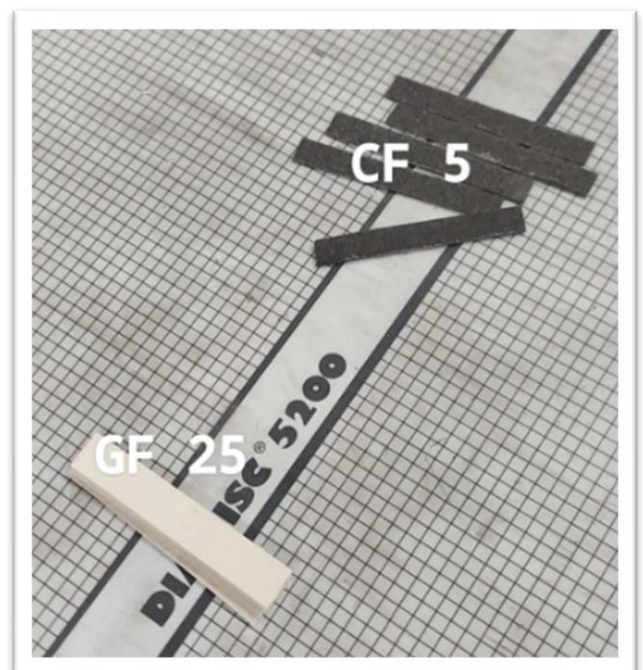


64. ábra - Hűtés beállítása PrusaSlicerben

A nyomtatott darabok kimunkálását magam végeztem a tanszéki laborban a BS 400 lemezollón, valamint Novia Sz-AP007-es kevlárvágó ollóval. A nyomtatott darabok szélét elvágtam, vigyázva hogy a repedések ne fussanak végig a mintadarab többi részén, majd a lemezollóval kialakítottam a 80 mm x10 mm-es próbatesteket.



75. ábra - Az elkészült nyomtatások



86. ábra - Az előállított szakítópróbatestek

A nyomtatások közül végül egyedül a BF\_25, azaz a 25 térfogatszázalékos bazaltszál nem készült el a gyártott filament tekercs rossz minősége miatt, mivel a 3.2-es pontban említett 1,7 mm-hez megengedett  $\pm 0,5$  mm átmérő tartományban sem a felső, sem az alsó értéknek nem felelt meg, így az ömledékáram nem volt folytonos.

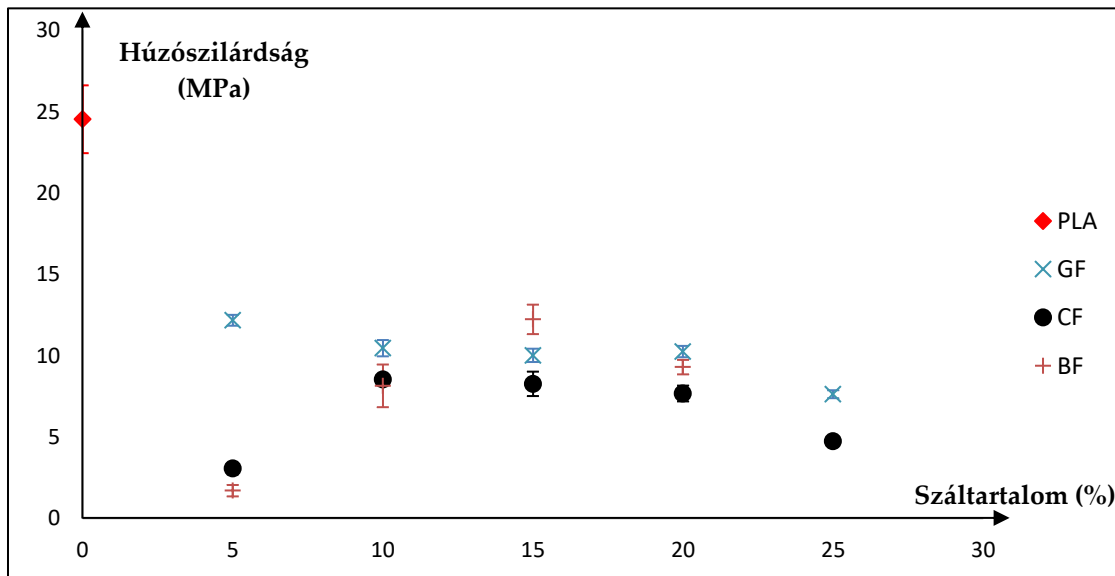
A fúvóka eltömődését meggátlandó a behúzó szerkezet elé egy 1,9 mm belső átmérőjű műanyagcsövet helyeztem, amelyen behúzáskor a filament áthaladt. A tűrésmező alapján a filamentnek nem lenne szabad elakadnia, a BF\_25 azonban sokadik újraindításra is elakadt, így végül a mintadarab nem készült el, mivel új alapanyag kompaundálására és filament tekercs gyártására ezen dolgozat keretein belül már nem maradt időm.

## 4.2. Rétegek közötti szilárdság

A rétegek közötti szilárdság vizsgálatát a szakítógépről letöltött adatok kiértékelésével kezdtem, majd a mikroszkópi képekkel, azaz a töretfelületek vizsgálatával következtetéseket tettem az anyagi viselkedés okára. A letöltött adatokból a kiértékelést a Microsoft Excel programban végeztem.

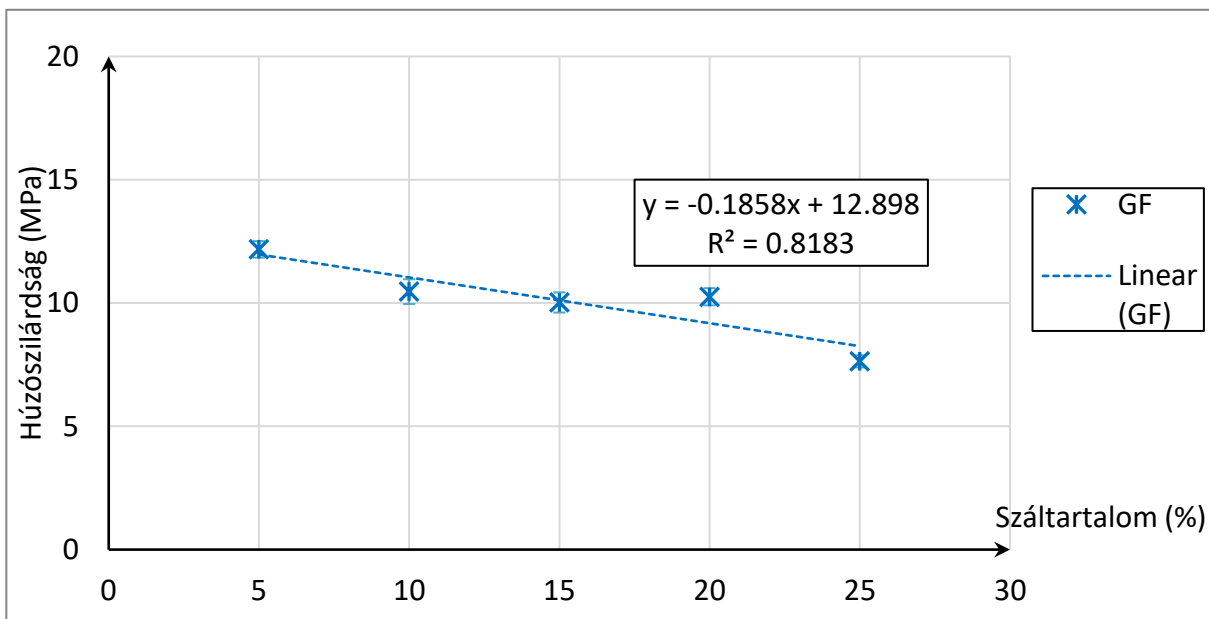
### 4.2.1 A szakítóvizsgálat eredményei

A szakítópróbatesteket húzásra vesszük igénybe, így a húzószilárdsági értékeket ábrázoltam a növekvő száltartalmak függvényében. A szakításokat anyagonként és száltartalmanként 5-5 elemszámú mintákból értékeltem ki Microsoft Excel programban.

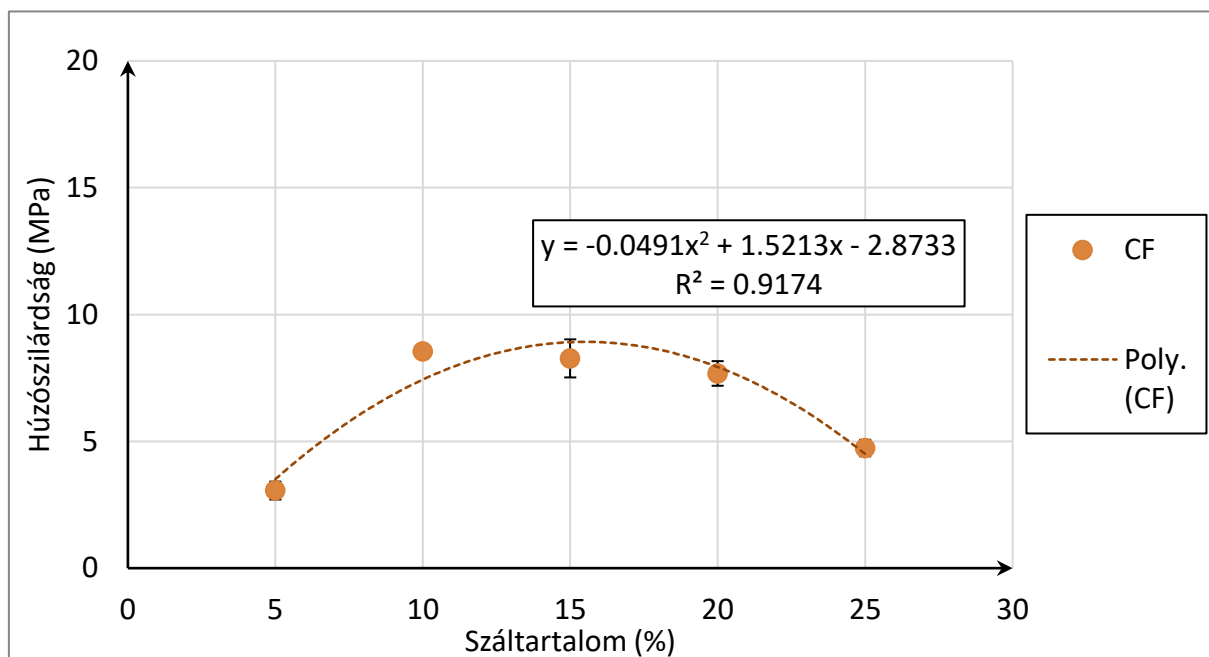


17. ábra - Húzószilárdsági értékek a száltartalom függvényében

Az 17. ábrán látható az adott száltartalmú anyagok 5 mintájának átlaga (jelmagyarozatban jelölt pontok) és az adatok szórása (hibasávok). Az egyes anyagok diagramjait a következőkben külön-külön is ábrázoltam a jobb átláthatóság érdekében. Érdekes már ezen az ábrán megfigyelni, hogy a nagyjából 25 MPa húzószilárdságú PLA-4060D, kizárólag mátrixot tartalmazó anyag húzószilárdságát egyik száltartalmú anyag sem közelíti meg. Természetesen ez kizárólag az építési irányra vonatkozó húzószilárdsági érték, ahogy már korábban is említésre került, az erősítőszálakra merőleges irányban a kompozit szálak erősítő tulajdonságait nem tudjuk kihasználni.



18. ábra - Húzószilárdsági értékek a szál tartalom függvényében üvegszálás minta esetén



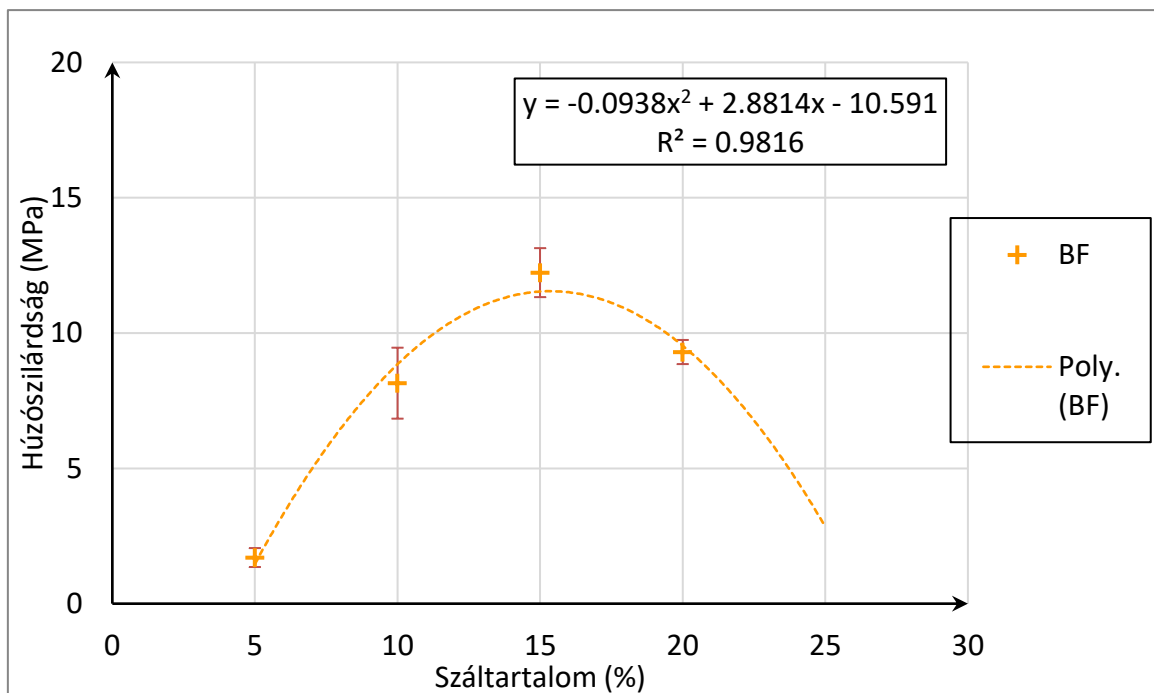
19. ábra - Húzószilárdsági értékek a szál tartalom függvényében szénszálás minta esetén

Az üvegszálás minta esetében elmondható, hogy a minta húzószilárdsága a szál tartalom növelésével végig csökkenő tendenciát mutat, vagyis minél több szál adagolunk a mintához, annál kisebb lesz a húzószilárdsága. Ez alapján azt a következtetést vontam le, hogy rossz a szál-mátrix adhézió, hiszen a húzási ellenállását a hegedési zónán belül egyedül a mátrix-mátrix adhézió biztosítja, a szálak hozzáadásával a hibahelyek számát növeljük csak.



A szénszál esetében más a helyzet, itt azt tapasztaltam, hogy bár kezdetben 5 térfogatszázaléknál nagyon alacsony a húzószilárdság, ez növekvő tendenciát mutat 10-15 térfogatszázalékig, ahol plató szerűen tartja az értékét 20%-ig, míg végül csökkenni kezd 25%-ig.

Természetesen egy pontosabb görbe felvételéhez sokkal több mérésre lenne szükség, azonban az a mért pontokból is látszik, hogy a kezdeti 5%-os értékhez képest még a 25%-os érték is magasabb! A szál-mátrix adhézió tehát az üvegszálhoz képest itt jobbnak tűnik, a húzási ellenállásban a szálak is részt vesznek, és 10-15% közötti értékig növelik is azt!

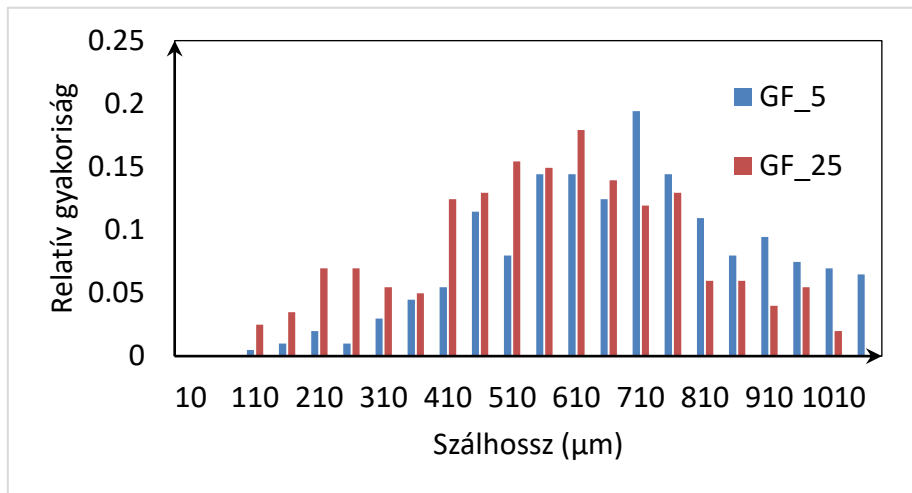


20. ábra - Húzószilárdsági értékek a szál tartalom függvényében bazaltszálás minta esetén

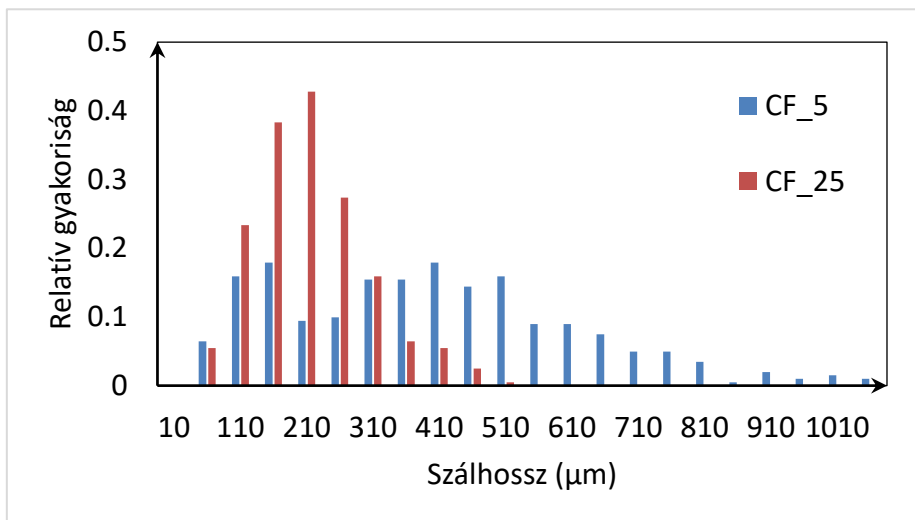
A bazaltszálás minta esetében hasonló tapasztalunk, mint a szénszálás minta esetében, annyi különbséggel, hogy itt sokkal meredekebb emelkedő tendenciát tapasztalunk 5-15% közötti szál tartalmak esetén. A 25%-os mintát korábban említett okok miatt sajnos nem sikerült legyártani, de a 15-20% közötti változásból látható, hogy 20% után már itt is csökkenő tendenciát mutatnak a húzószilárdsági értékek.

#### 4.2.2. Szálhossz vizsgálatok

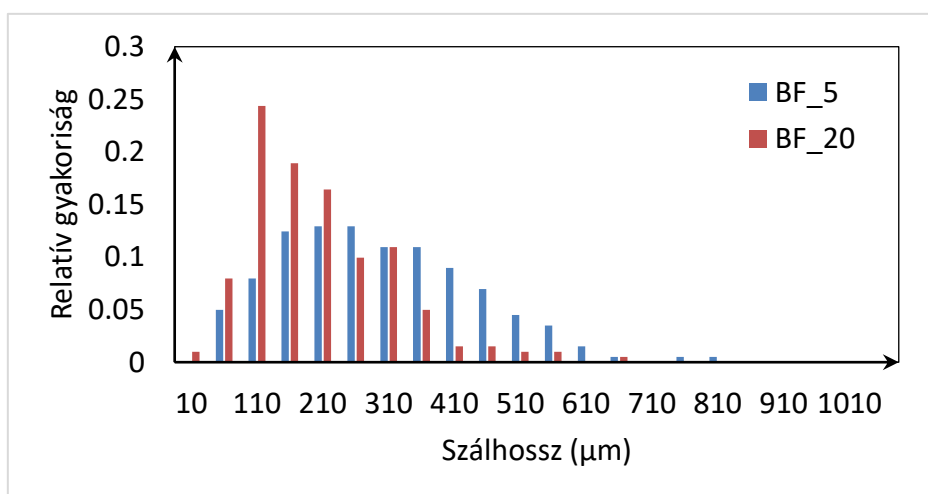
A Keyence VHX-500 optikai mikroszkóp szoftvere alkalmas automatikus szálhossz mérésre a vizsgált felületen amennyiben a szálak nem lógnak egymásra és kellően nagy a kontraszt a háttér és a szálak között. Az alkalmazott szálak hossz eloszlását az alábbi hisztogramok szemléltetik (21-23. diagramok).



21. ábra - Üvegszálás minta szálhossz eloszlása 5 és 25%-os minták esetén



22. ábra - Szénszálás minta szálhossz eloszlása 5 és 25%-os minták esetén



23. ábra - Bazaltszálás minta szálhossz eloszlása 5 és 20%-os minták esetén

Látható a fenti diagramokról, hogy a bazalt- és szénaszál minták jellemzően rövid 100-300 mikrométeres szálakat tartalmaznak, míg az üvegszálak hosszabbak, jellemzően 500-700 mikrométeresek. A szálhossz befolyással van a szál-mátrix adhéziós kapcsolatra, hosszabb szálak esetén nagyobb felületen tud a szál a mátrixhoz kapcsolódni. Így az adhéziós karakterisztika hatása jobban megmutatkozhat.

### 4.2.3 Optikai mikroszkópia eredményei

Az optikai mikroszkópot a szál-mátrix adhéziós kapcsolat szemrevételezéssel megállapítható tulajdonságai miatt alkalmaztam. Készítettem képeket 60x, 100x-os nagyításokban a kompozit próbatetek legkisebb (5%) és legnagyobb (25% illetve bazaltnál 20%) száltartalmú mintáiról, majd néhány mondatban jellemeztem a látottakat egymáshoz- és a szakítási karakterisztikához képest.



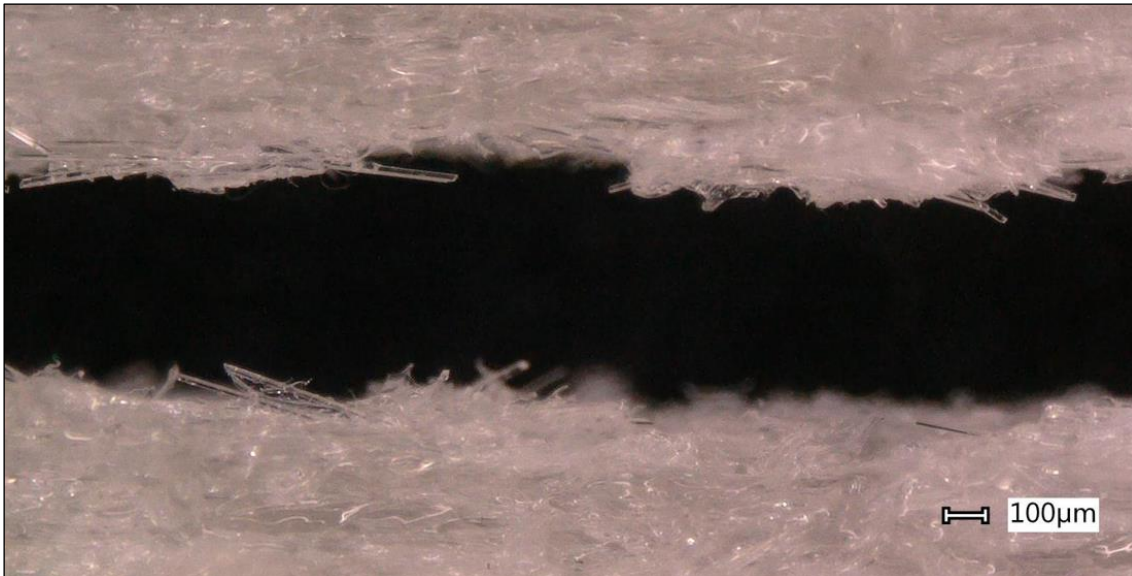
24. ábra -GF 5% -os minta töretfelülete 60x-os nagyításban



25. ábra - GF 25%-os minta töretfelülete 60x-os nagyításban

Két fontos aspektust vizsgáltunk minden töretfelületi képnél, az első, hogy hegedési zóna mentén szakadt-e végig, a második, hogy milyen a szál-mátrix kapcsolat, mennyire lógnak ki a szálak a töretfelületből, mennyire öleli körbe a mátrix a kompozitot.

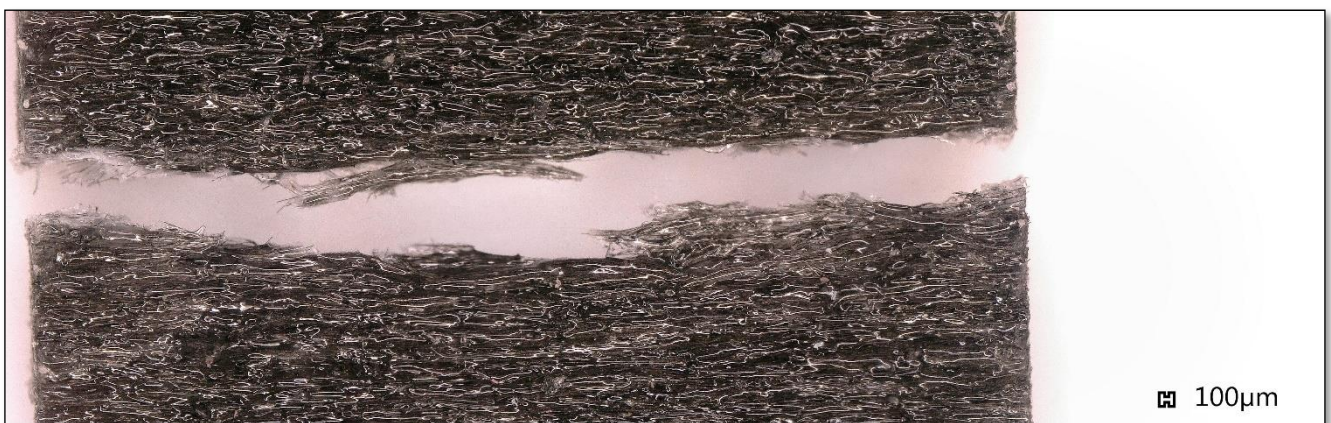




**269. ábra -GF 5%-os minta töretfelülete 100x-os nagyításban**

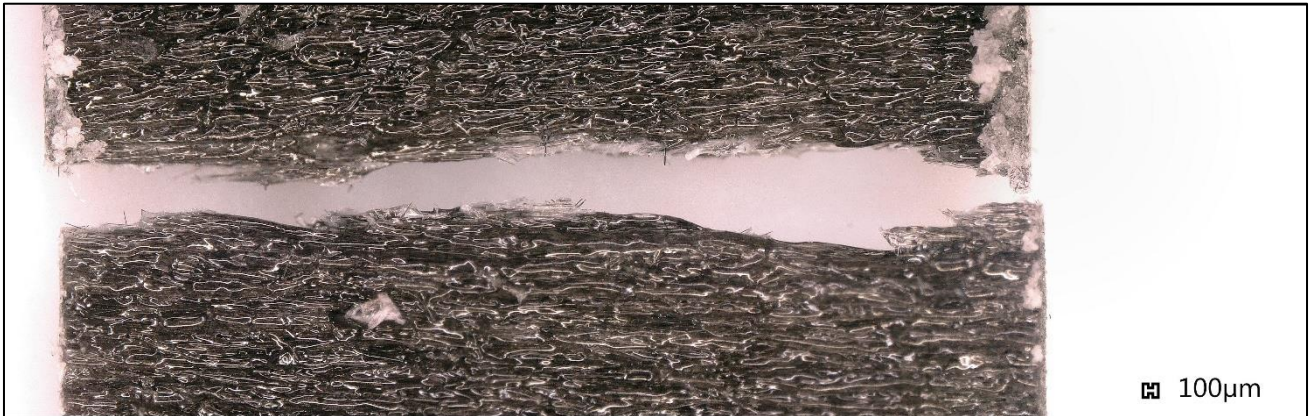
Az üvegszálalás minta esetében azt látjuk, hogy az 5%-os mintánál a szakítás vonala drasztikusan kilép a rétegből, amelyben elindult és egy másikban ér véget. Ezzel szemben a 25%-os minta közel megtartotta a szakadás vonalát.

A 100x-os nagyítási képen jobban kivehető, hogy a szálak rendszertelenül állnak ki a PLA mátrixból és jellemzően nincsen rajtuk mátrix anyagdarabka, nem öleli körbe a mátrix a szálakat úgy, ahogy a többi anyagnál fogjuk tapasztalni. Ez is arra enged következtetni, hogy rossz a szál-mátrix adhézió, ahogyan a szakítási eredményekből is tapasztaltuk. A szálak pedig valóban sokkal nagyobbak, mint a másik két anyagnál fogjuk tapasztalni.



**107. ábra - CF 5%-os minta töretfelülete 60x-os nagyítás esetén**

A szénszálalás minta esetében azt tapasztaltuk a szakításnál, hogy a szál-mátrix kapcsolat jobb, mint az üvegszálalé. Ennek megfelelően látszik a töretfelületen, hogy a szálakat a PLA mátrix a tövüknél körülöleli, némely esetben egészen a hegyéig bevonja, azonban nem lepi el őket jellemzően teljesen.



28. ábra - CF 25%-os minta töretfelülete 60x-os nagyítás esetén

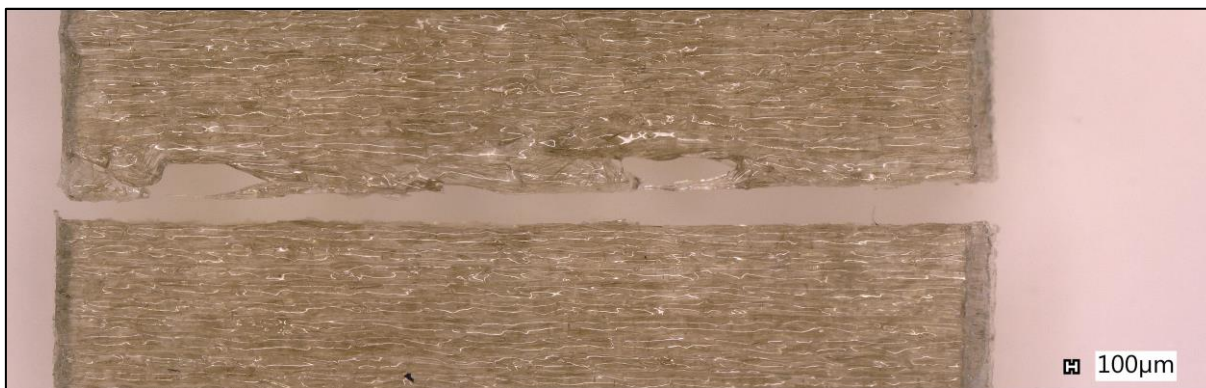


29. ábra - CF 25%-os minta töretfelülete 100x-os nagyítás esetén

Sem az 5, sem a 25 százalékos minta nem a hegedési zóna mentén szakadt, a töretfelület több réteget váltott szakadás közben. A szálak nagyon orientáltak. Összességében a töretfelületi képből nem sok a változás a száltartalom növelésével, azonban a húzószilárdsági értékek sem változtak kifejezetten sokat 5-25% között.

A bazaltszál mintáknál azt tapasztaljuk, hogy a szálak jellemzően nem lépnek ki a mátrixból a töretfelület mentén. A BF 5%-os mintában a szakadás vonala szinte tökéletesen egyenes, míg a 25%-os mintában a törésvonal drasztikus rétegváltásokat produkált.

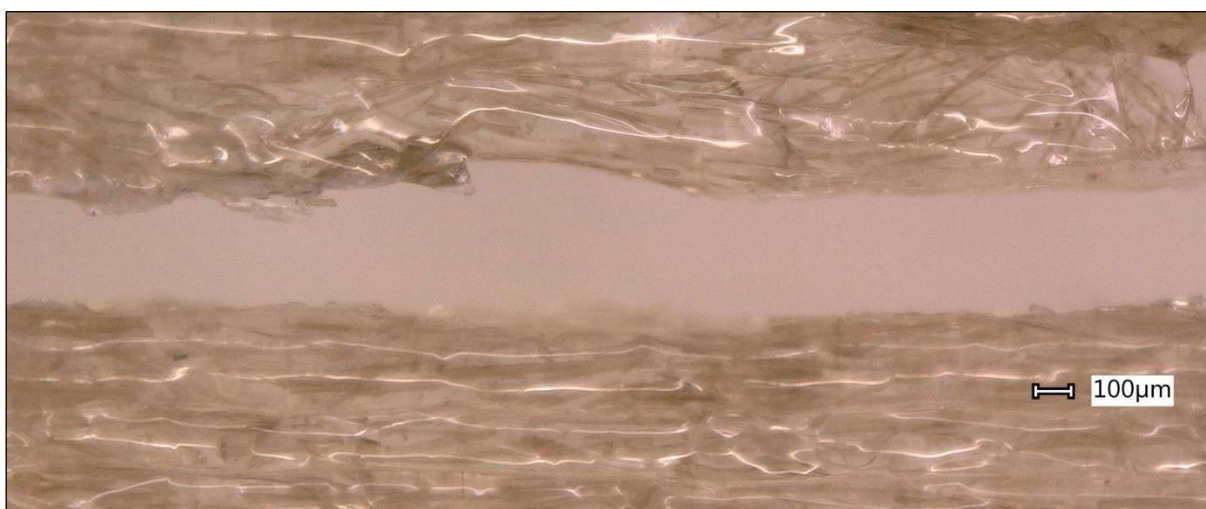




30. ábra - BF 5% -os minta töretfelülete 60x-os nagyítás esetén



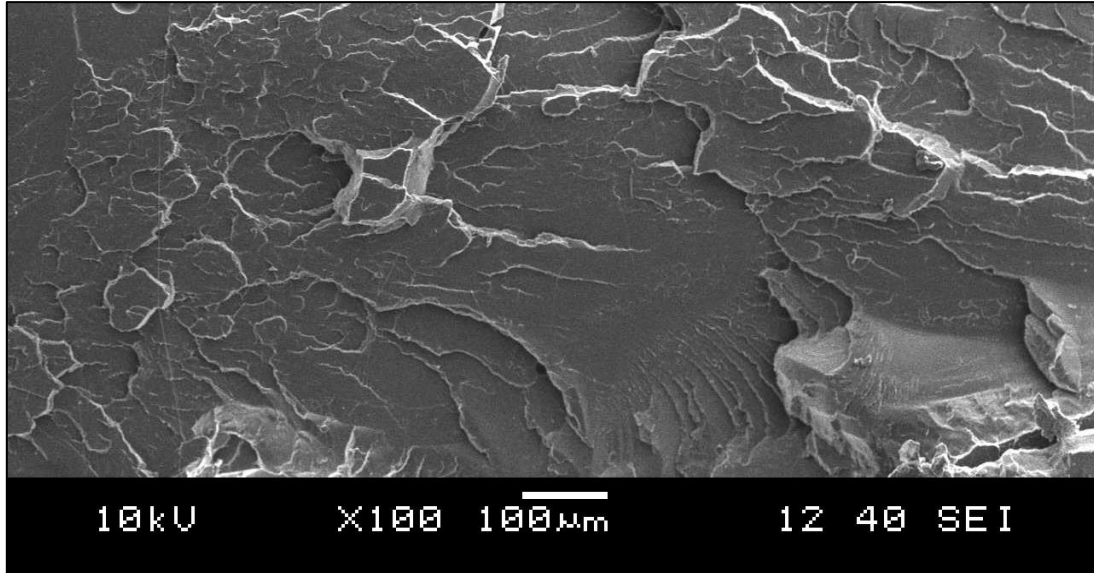
31. ábra - BF 25% -os minta töretfelülete 60x-os nagyítás esetén



32. ábra - BF 5% -os minta töretfelülete 100x-os nagyítás esetén

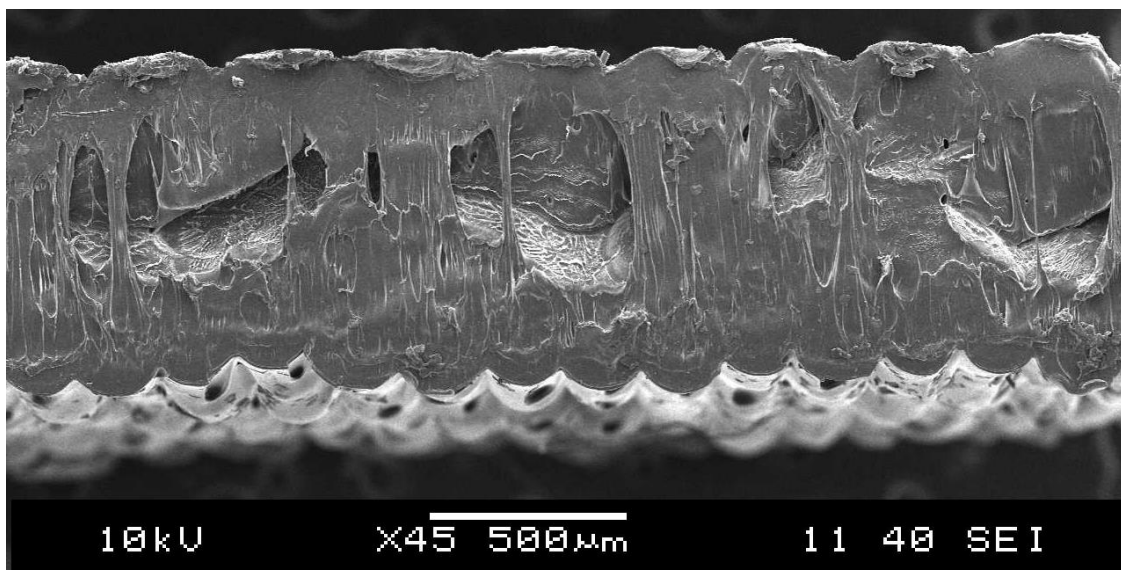
#### 4.2.4 Pásztázó elektronmikroszkópia eredményei

Végül a töretfelületek felülnézeti és keresztmetszeti képeinek vizsgálatára pásztázó elektronmikroszkópot alkalmaztam. A SEM-be helyezett összesen tizennégy minta tartalmazta a 6 kompozit + 1 PLA referencia minta, egyenként 2-2 darabját. A kompozit minták a legkisebb és legnagyobb száltartalmú darabokból kerültek kivágásra lemezollóval. A mintákat vizsgálat előtt finom arany réteggel vontuk be.

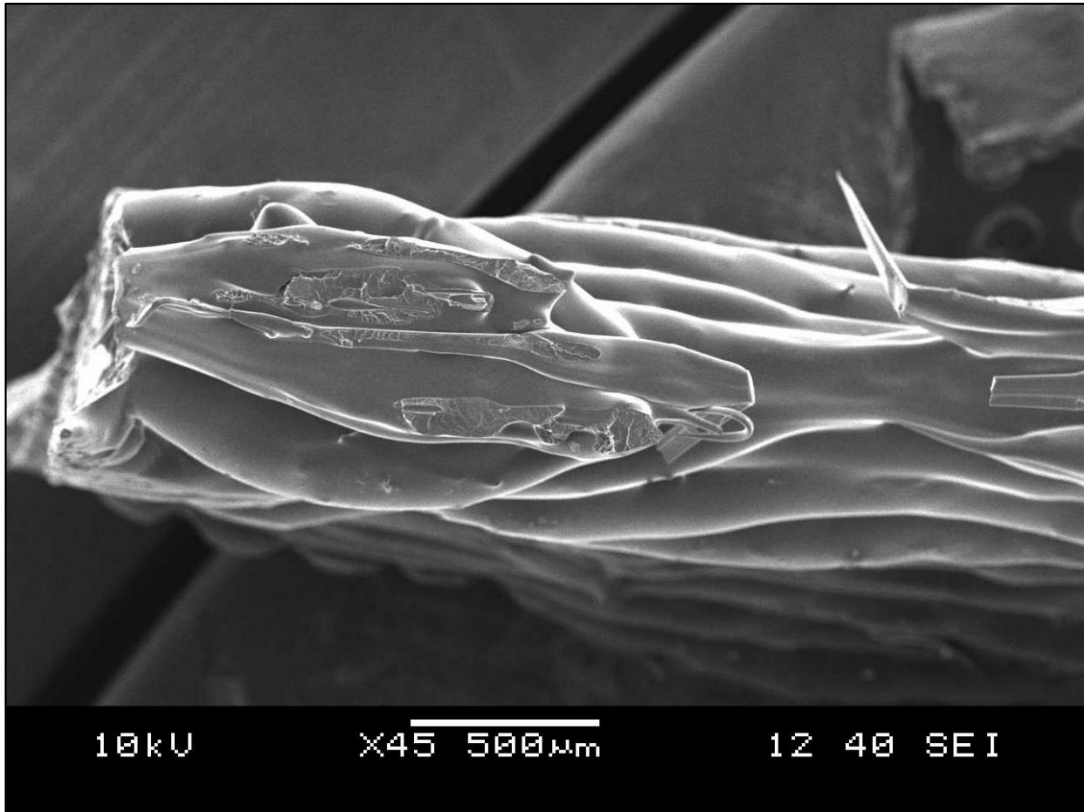


33. ábra - PLA 4060-D töretfelület SEM képe 100x-os nagyításban

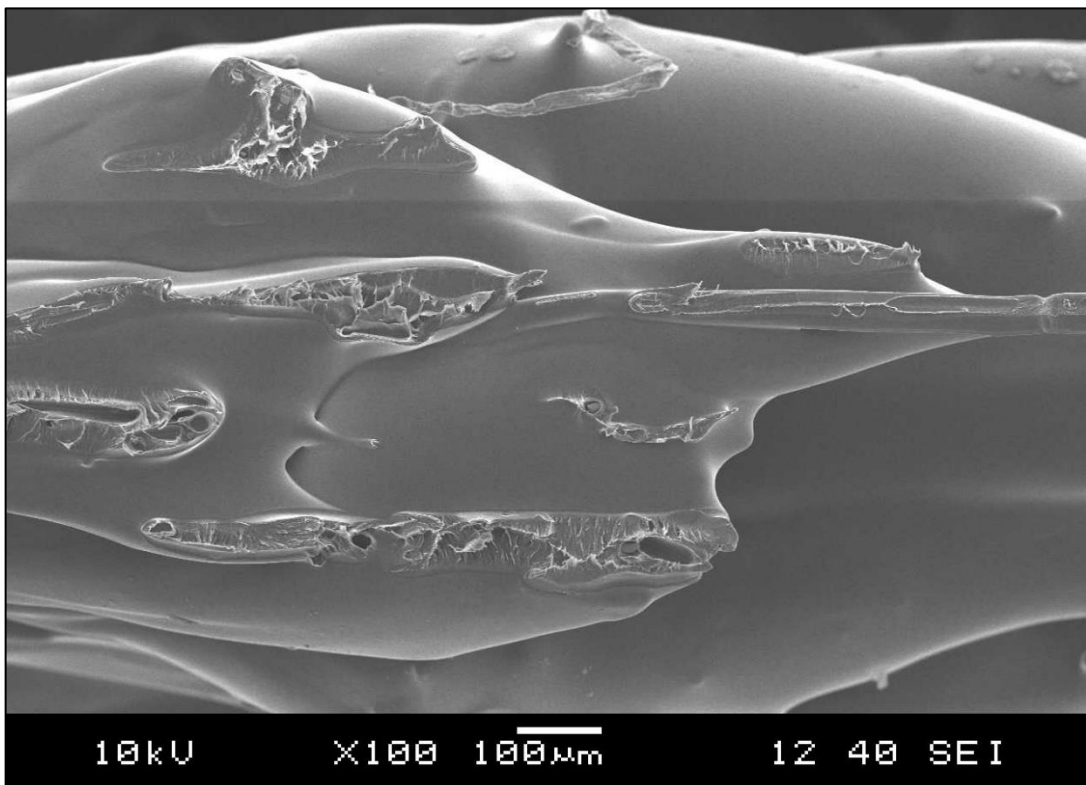
A sima PLA 4060-D töretfelülete 100x-os nagyításban lemezesen tört, mátrix-mátrix adhéziót mutat be a rajta végigfutó, szakításból visszamaradt mikrorepedésekkel. Az oldalnézeti képen pedig a rétegek hegedése látszik, alul visszamérhető a rétegek szélessége valóban 200 mikrométer, azaz 0,2 mm.



34. ábra - PLA 4060-D rétegek oldalnézeti SEM képe 45x-os nagyításban

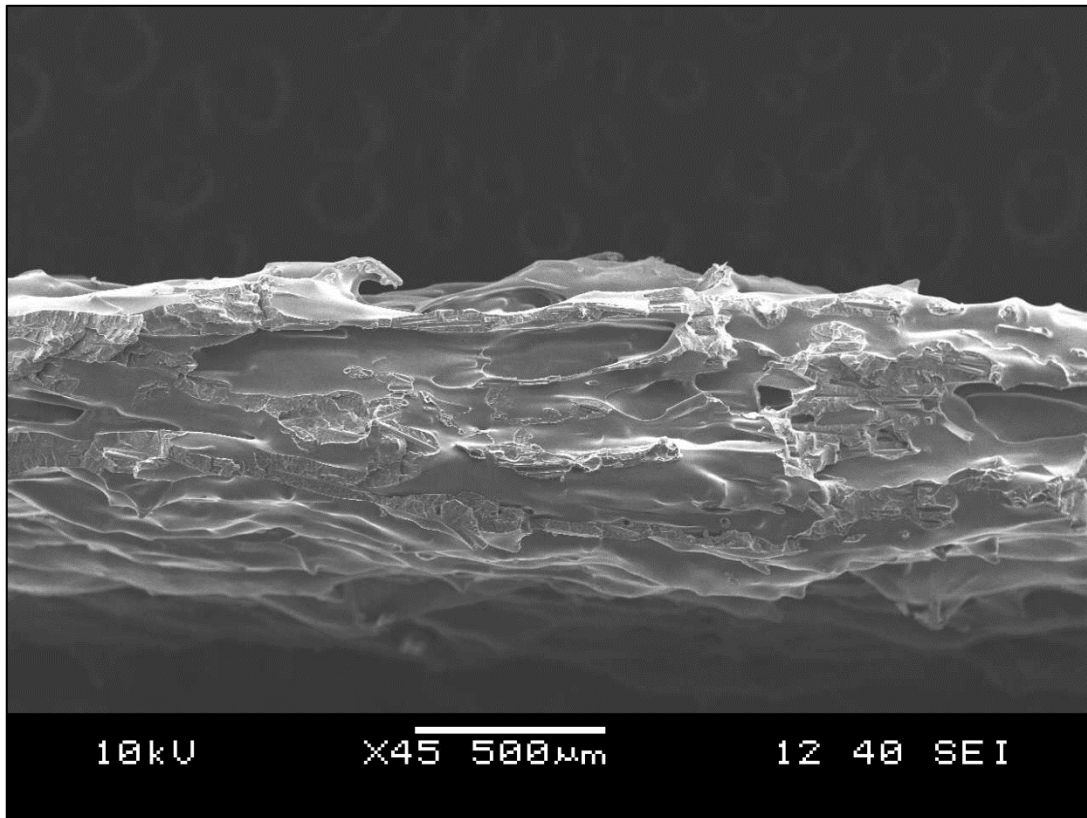


35. ábra - BF 5%-os minta töretfelületi SEM képe 45x-os nagyításban

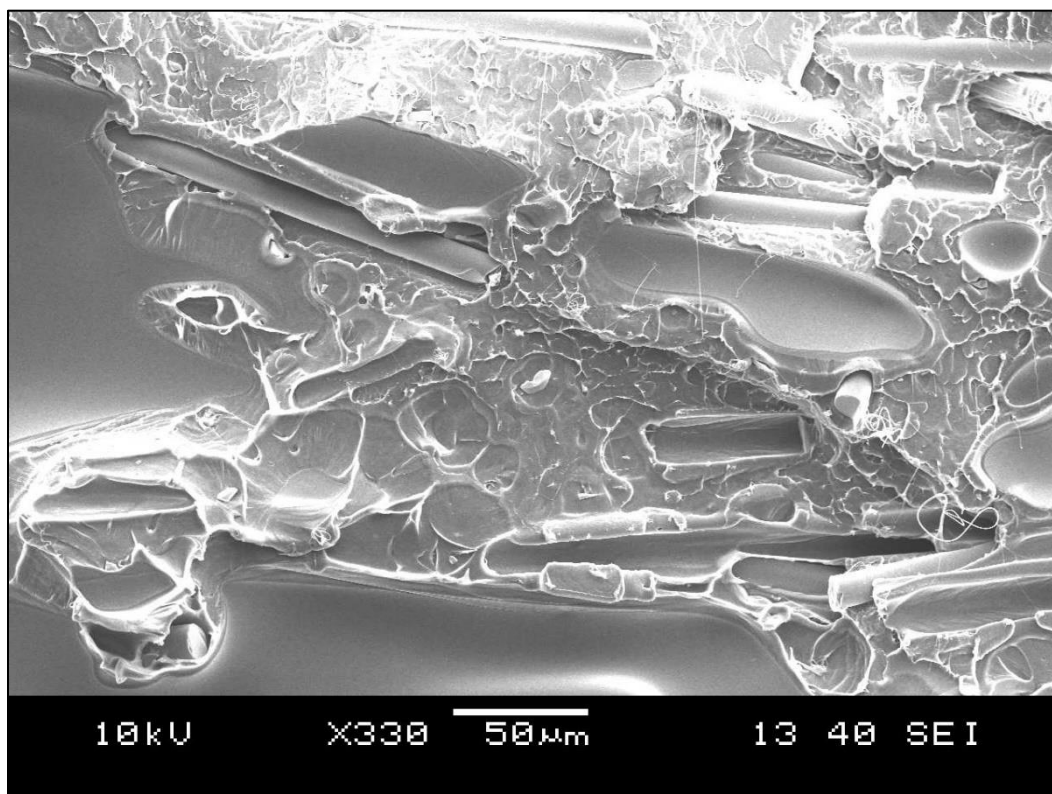


36. ábra - BF 5%-os minta töretfelületi SEM képe 100x-os nagyításban

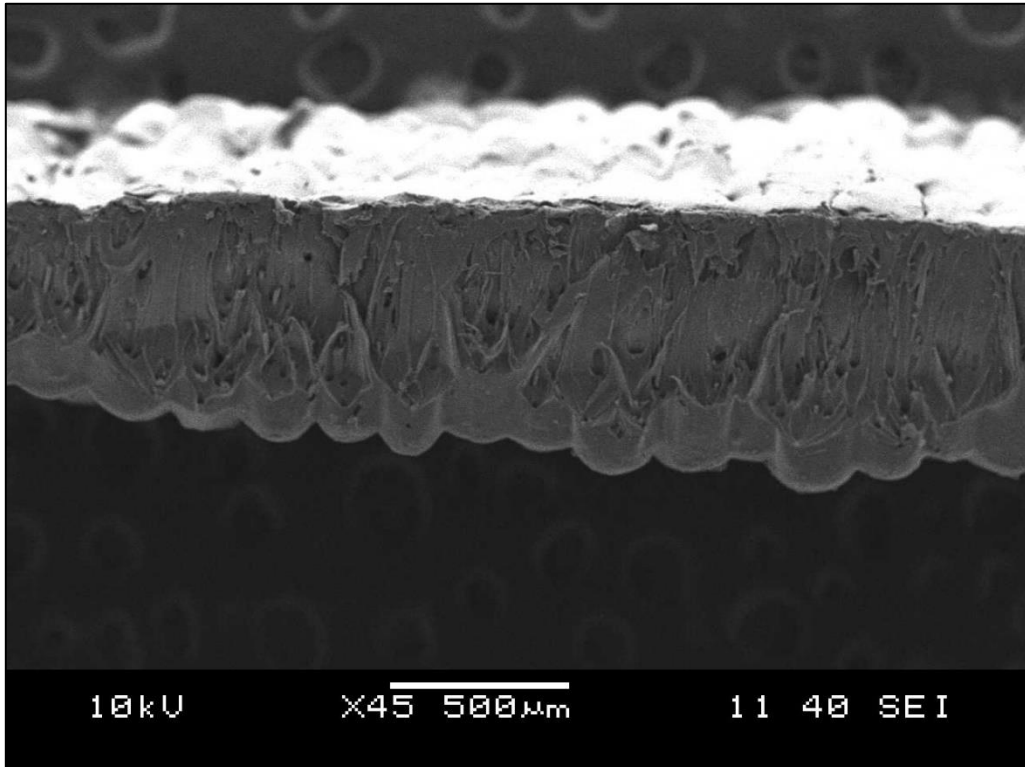




37. ábra - BF 20%-os minta töretfelületi SEM képe 45x-os nagyításban

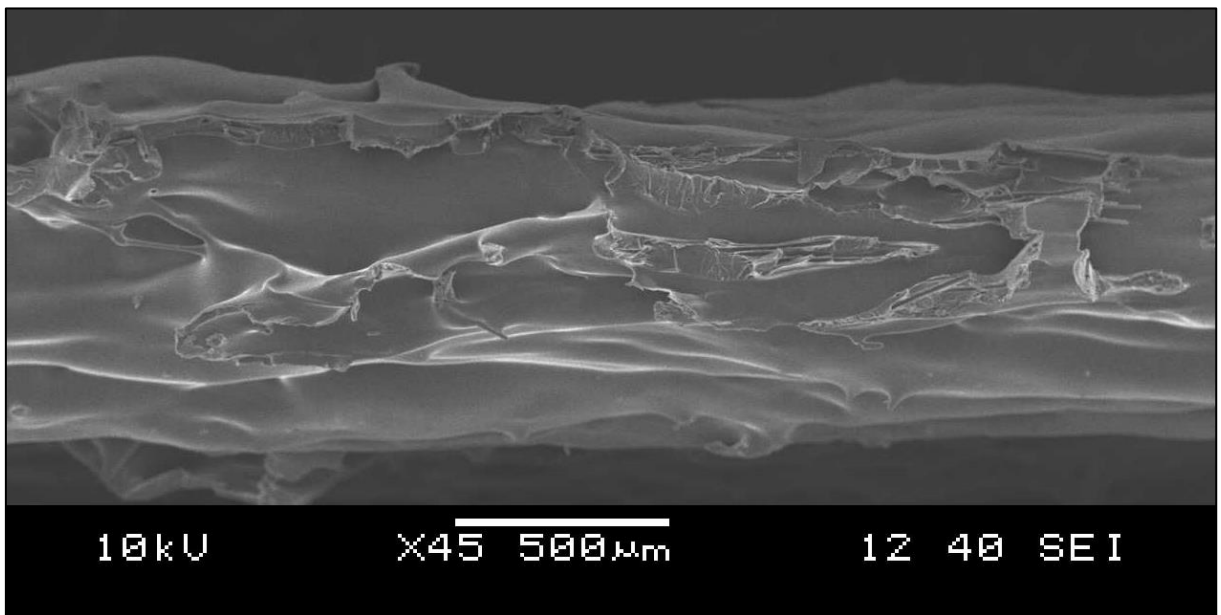


38. ábra - BF 20%-os minta töretfelületi SEM képe 330x-os nagyításban

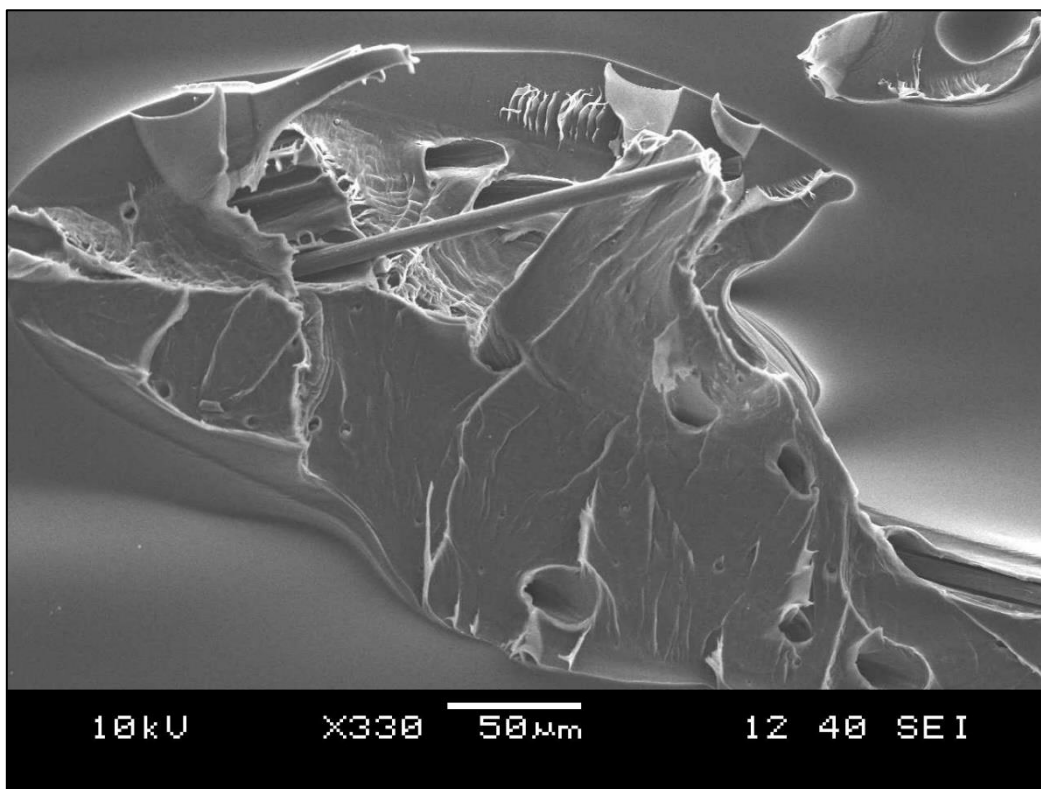


39. ábra – BF 5%-os minta oldalnézeti SEM képe 45x-os nagyításban

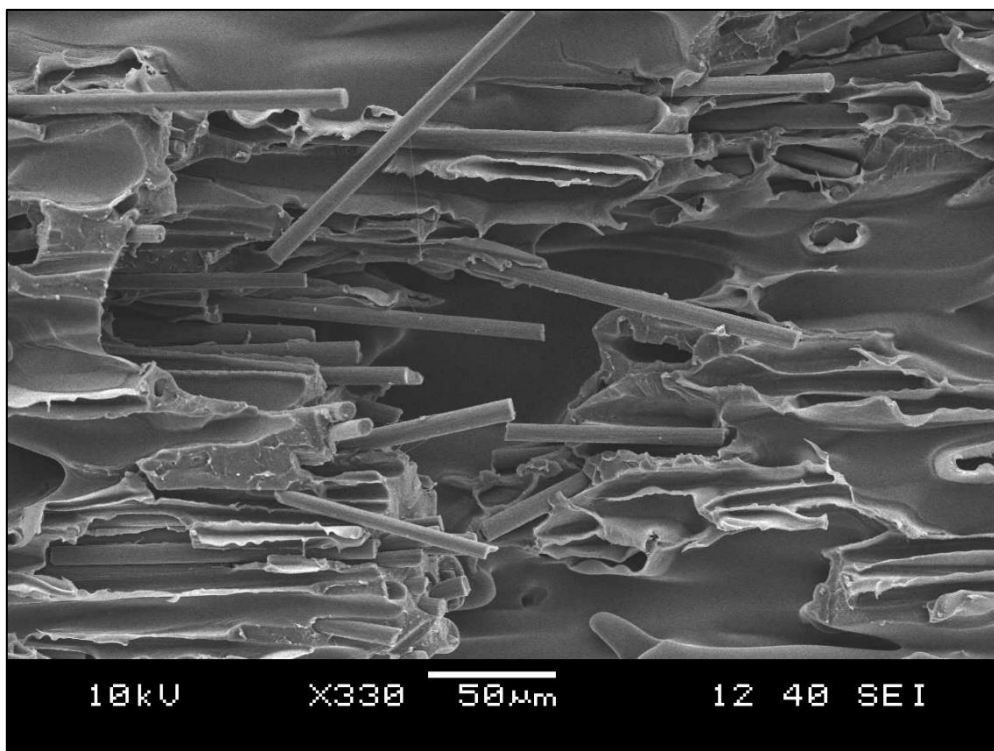
A bazaltszálal minták SEM képein (25-28.ábra) látszólag az 5%-os mintán kicsi, nem egybefüggő töretfelületek találhatók, nem történt kifejezetten jó hegedés a rétegek között, ami megmagyarázza miért vált el szint egyenesen két réteg között. A 25%-os mintán már sokkal egybefüggőbb ez a töretfelület, jó adhézió alakult ki.



40. ábra - CF 5% -os minta töretfelületi SEM képe 45x-os nagyításban

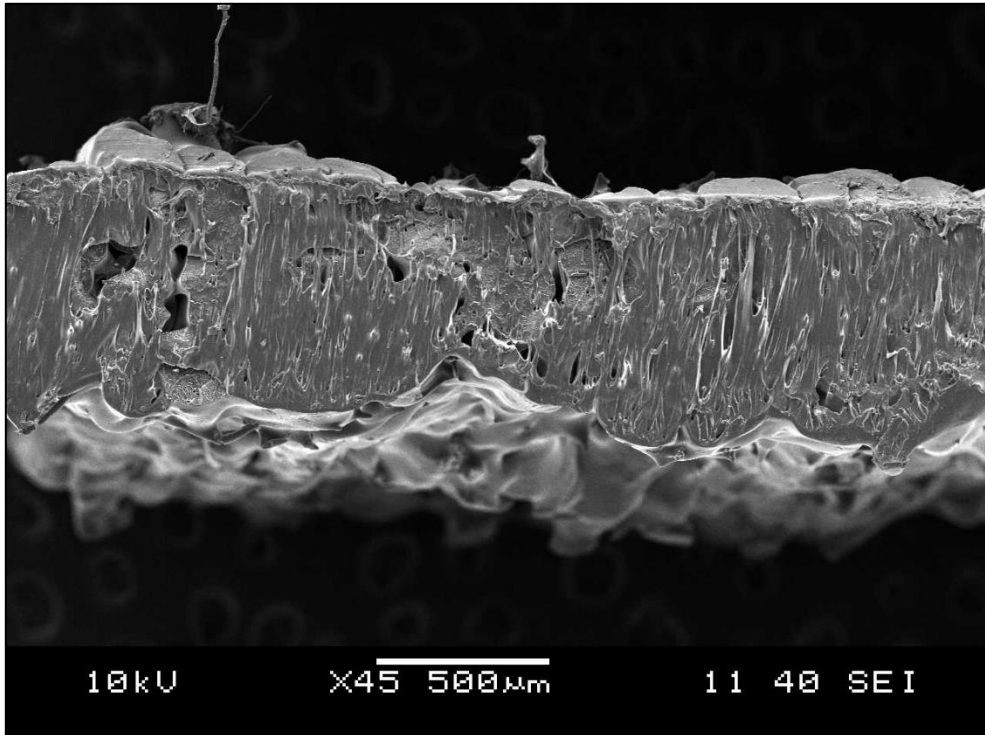


41. ábra - CF 5% -os minta töretfelületi SEM képe 330x-os nagyításban



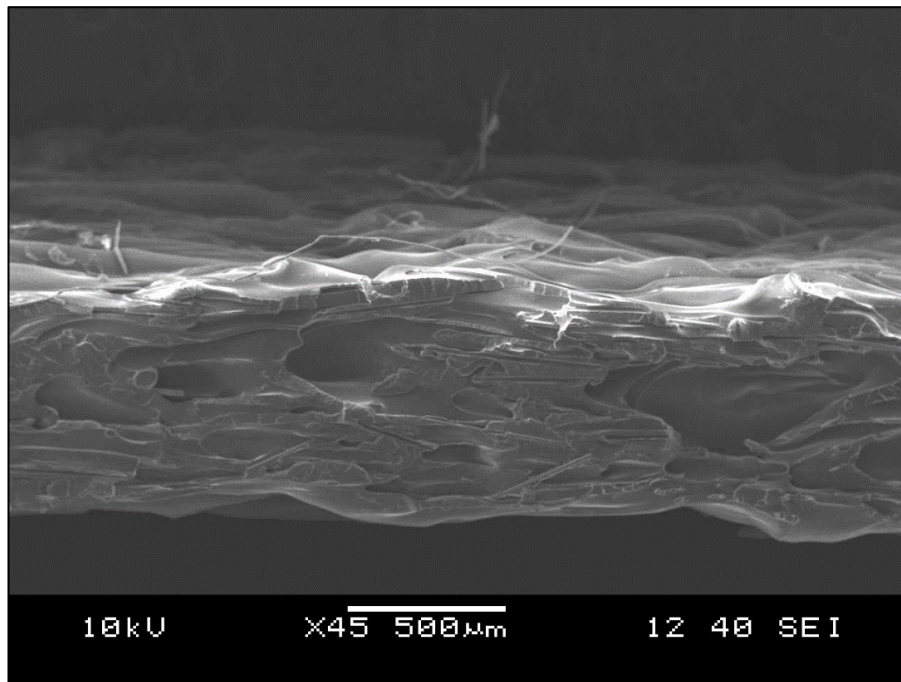
42. ábra - CF 25% -os minta töretfelületi SEM képe 330x-os nagyításban



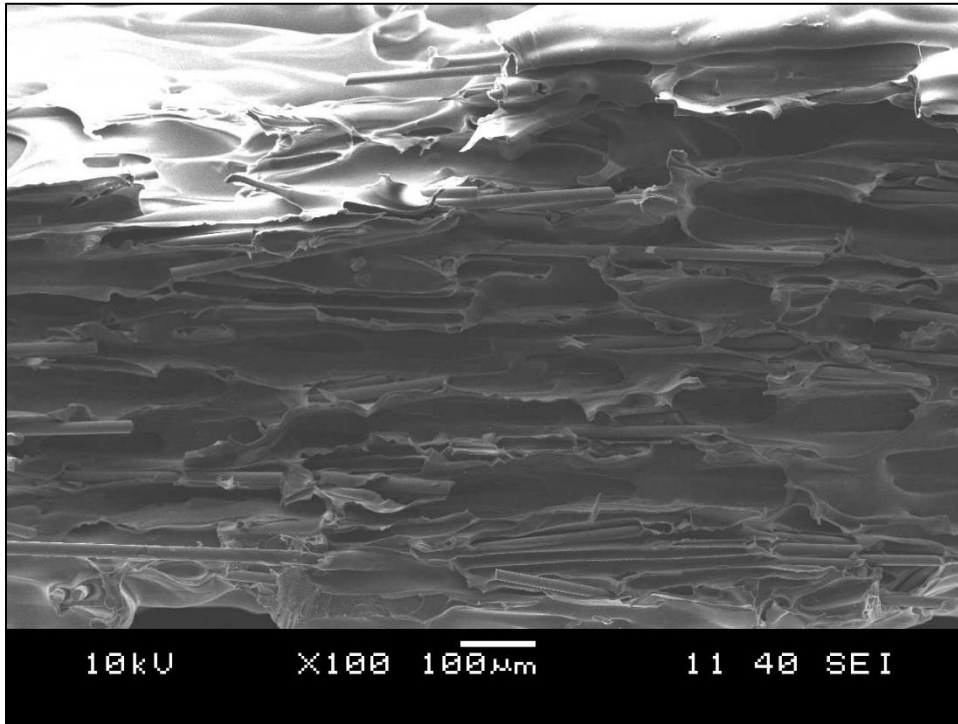


43. ábra - CF 5%-os minta oldalnézeti SEM képe 45x-os nagyításban

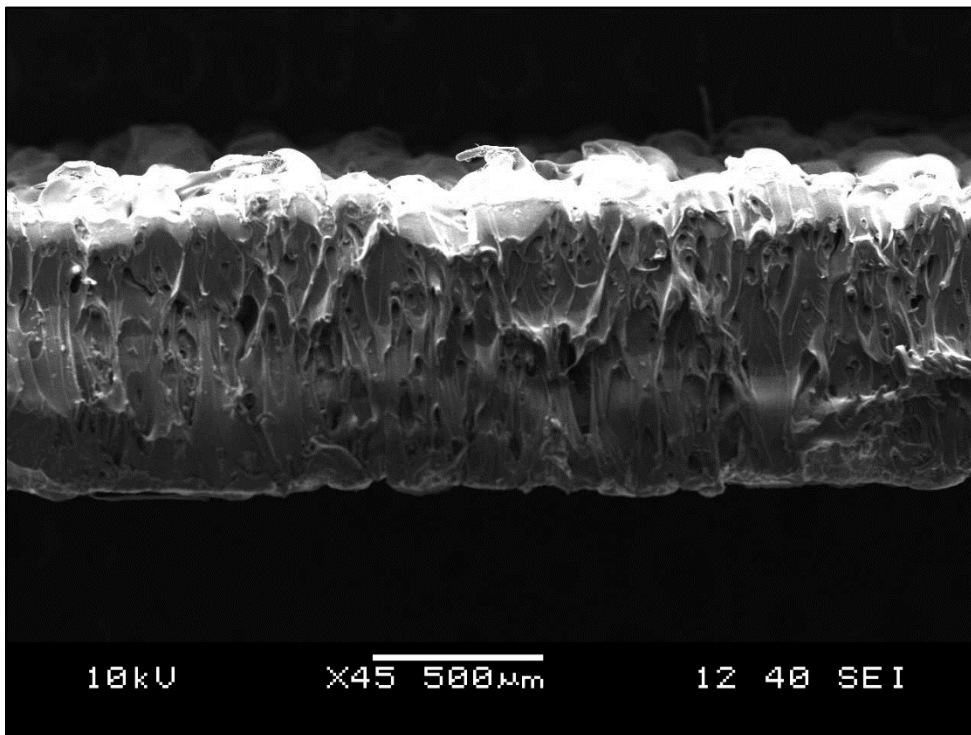
A szénszálalás mintáknál is megfigyelhető, hogy a 25%-os mintánál kicsivel több a hegedési zóna, azonban nem olyan mértékű a különbség, mint a bazalt esetében. A töretfelületi képeken (32-32.ábra) jól kivehető a száltartalombeli változás, valamint, hogy a mátrix mennyire körül veszi a szálakat. Itt is jó adhéziót feltételeztünk és a képek igazolják a feltevéseinket.



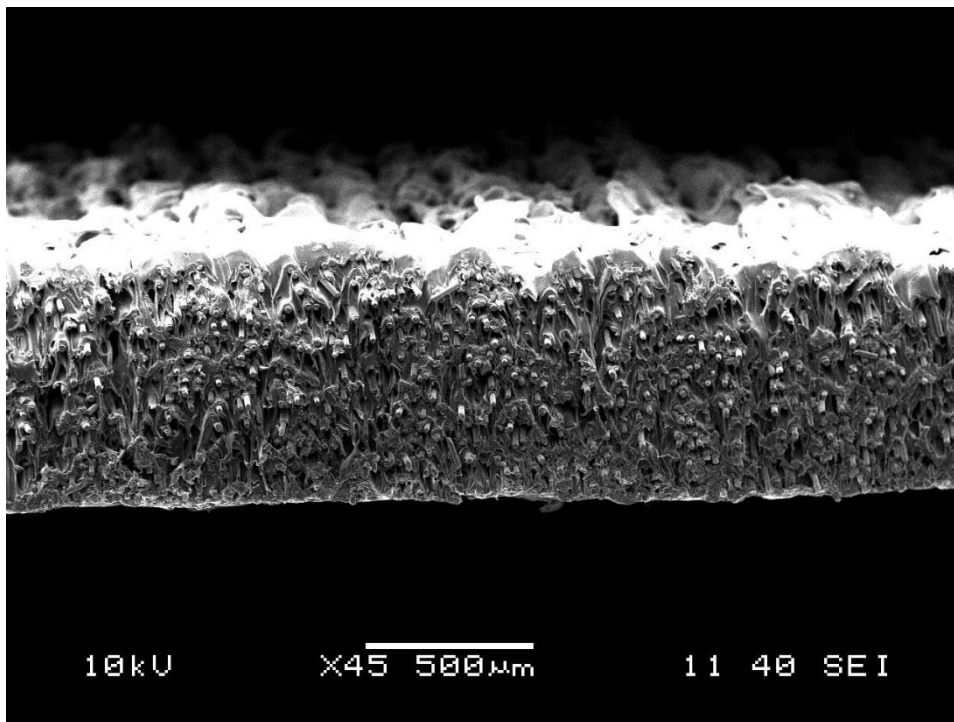
4411. ábra - GF 5% töretfelületi SEM képe 45x-os nagyításban



45. ábra - GF 25% töretfelületi SEM képe 100x-os nagyításban



46. ábra - GF 5% oldalnézeti SEM képe 45x-os nagyításban



47. ábra - GF 25% oldalnézeti SEM képe 45x-os nagyításban

Az üvegszálak minták oldalnézeti képein jól látható a száltartalombeli változás, valamint, hogy kevésbé orientáltak. A töretfelületek inkább lemezesek, mint a sima PLA referencia, ami arra enged következtetni, hogy a szálak itt valóban nem játszanak szerepet az adhézióban, ahogyan a szakításnál is megállapítottuk.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az anyagextrúzióon alapuló 3D nyomtatás (Fused Filament Fabrication) napjaink egyik legnépszerűbb additív gyártási technológiája. Az így készült termékek mechanikai tulajdonságaira a rétegek közötti hegedés minősége nagy hatással van. A töltetlen alappolimerek tekintetében a rétegek közötti hegedés témaköre már alaposan körüljárt, a szakirodalom alapján jól definiáltak a nyomtatási paraméterek, azonban a töltőanyagok, vagy erősítőszálak hegedési folyamatra gyakorolt hatása még kevésbé ismert.

A kutatásom célja az volt, hogy szélesebb körben is megvizsgáljam a rétegek közötti hegedés jelenségét üveg-, szén- és bazaltszálak alkalmazásával, eltérő száltartalmak függvényében. Vizsgáltam a szálak szerepét a diffúziós folyamatokban, az építési irányban (Z) történő szakítóvizsgálatok eredményeinek kiértékelésével, valamint a szál-mátrix adhéziós kapcsolatot, optikai – illetve pásztázó elektronmikroszkópia használatával.

A kutatási tervem első lépéseként előkészítettem az 5, 10, 15, 20, 25 térfogatszázalék bazalt-, szén- és üvegszállal töltött filamenteket, majd megválasztottam a nyomtatási paramétereket. A száltartalmon kívül a többi paramétert rögzítettem. A nyomtatásokat többféle próbatest geometriával is kipróbáltam, hogy a szakításra kerülő részeket melyekből lesz a legkönnyebb előállítani.

A szakítás eredményeinek kiértékeléséből következtettem a szál-mátrix adhézióra. Az üvegszál esetében rossz, a bazalt és szénszál esetében jó adhéziót feltételeztem. 10-15% száltartalom környékén tapasztaltam a maximális húzószilárdságot építési irányban. A töretfelületi képek szemrevételezése igazolta a szakítási eredmények alapján tett következtetéseimet.

A kutatás eredményei új ismereteket adnak a 3D nyomtatott kompozitok anizotróp viselkedéséről, a száltartalom és a száltípus hatásairól, azonban számos lehetőség van még a rétegek közötti hegedés fokozására a nyomtatási paraméterek változtatásával, pl. vasaló szakasz vagy fűtött munkatér alkalmazása.

## 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Coogan, T. J., Kazmer, D. O.: Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35, 101368 (2020).
2. Allum, J., Moetazedian, A., Gleadall, A., Silberschmidt, V.V.: Interlayer bonding has bulk material strength in extrusion additive manufacturing: New understanding of anisotropy. *Additive Manufacturing*, 34, 101297 (2020).
3. Balogh Bence, Kovács Péter, Zoltán Szávai Szabolcs.: Szimulációs eljárással támogatott 3D nyomtatás. *Multidiszciplináris tudományok*, 9. kötet (2019), 4. sz. pp. 535-547
4. V. Shanmugam, D. J. J. Rajendran, K. Babu, S. Rajendran, A. Veerasimman, U. Marimuthu, S. Singh, O. Das, R. E. Neisiany, M. S. Hedenqvist, F. Berto, S. Ramakrishna.: The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites prepared through the additive manufacturing. *Polymer Testing*, 93, 106925 (2021)
5. Kiss Bálint: Hegedési zónák meghatározása ömledékrétegzésen alapuló 3D nyomtatással készült szerkezetekben. Diploma, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2022)
6. Kiss Bálint, Párizs Richárd Dominik, Tóth Csenge, Török Dániel, Kovács Norbert Krisztián.: Anyagextrúzió alapú additív gyártástechnológiával készült termékek anizotróp viselkedésének elemzése. [www.polimerek.hu](http://www.polimerek.hu), *Polimerek*, IX. évfolyam 5. szám (2023)
7. N.Vidakis, M. Petousis, J.D. Kechagias.: A comprehensive investigation of the 3D printing parameters' effects on the mechanical response of polycarbonate in fused filament fabrication. *Progress in Additive Manufacturing*, 7, pages 713–722 (2022)
8. H.L. Tekinalp, V.Kunc, G. M. Velez-Garcia, Chad E. Duty, L. J. Love, A.K. Naskar, C.A. Blue, S. Ozcan.: Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, (2014)
9. Tobias Beran, Tom Mulholland, Frank Henning, Natalie Rudolph, Tim A. Osswald.: Nozzle clogging factors during fused filament fabrication of spherical particle filled polymers. *Additive Manufacturing*, 23, (2018)
10. Lin Sang, Shuangfeng Han, Xingshuang Peng, Xigao Jian, Jinyan Wang.: Development of 3D-printed basalt fiber reinforced thermoplastic honeycombs with enhanced compressive mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105518 (2019)
11. C. McIlroy, P.D. Olmsted.: Disentanglement effects on welding behaviour of polymer melts during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing. *Polymer*, 123, Pages 376-391 (2017)
12. Timothy J. Coogan, David O. Kazmer.: Modeling of interlayer contact and contact pressure during fused filament fabrication. *J. Rheol.* 63, 655–672 (2019)



13. Timothy J Coogan, David O Kazmer.: Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 35, 101368 (2020)
14. James Allum, Amirpasha Moetazedian, Andrew Gleadall, Vadim V. Silberschmidt.: Interlayer bonding has bulk-material strength in extrusion additive manufacturing: New understanding of anisotropy. *Additive Manufacturing*, 34, 101297 (2020)
15. Eduardo Barocio, Bastian Brenken, Anthony Favaloro, R. Byron Pipes.: Interlayer fusion bonding of semi-crystalline polymer composites in extrusion deposition additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 230, Part 2, 109334 (2022)
16. Jiongyi Yan, Emrah Demirci, Andrew Gleadall.: Single-filament-wide tensile-testing specimens reveal material-independent fibre-induced anisotropy for fibre-reinforced material extrusion additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, ISSN: 1355-2546 (2023)
17. Jacob J. Fallon, Steven H. McKnight , Michael J. Bortner Highly loaded fiber filled polymers for material extrusion: A review of current understanding *Additive Manufacturing*, 30, 100810 (2019).
18. Zhihe Yang, Zeshi Yang, Hui Chen, Wentao Yan.: 3D printing of short fiber reinforced composites via material extrusion: Fiber breakage. *Additive Manufacturing*, 58, 103067 (2022)
19. Dongmin Yang, Haoqi Zhang, Jiang Wu, Edward D. McCarthy.: Fibre flow and void formation in 3D printing of short-fibre reinforced thermoplastic composites: An experimental benchmark exercise. *Additive Manufacturing*, 37, 101686 (2021)
20. Siwon Yu, Yun Hyeong Hwang, Jun Yeon Hwang, Soon Hyung Hong.: Analytical study on the 3D-printed structure and mechanical properties of basalt fiber-reinforced PLA composites using X-ray microscopy. *Composites Science and Technology*, 175, (2019)