



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

LUKÁCS NORBERT LÁSZLÓ

TDK DOLGOZAT

IN-SITU HABKÉPZÉssel ELŐÁLLÍTOTT BIOPOLIMER  
KOMPOZITOK ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

Témavezető:

*Tóth Csenge*

doktorandusz

Konzulens:

*Dr. Kovács Norbert Krisztián*

adjunktus

BUDAPEST, 2023

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Tóth Csengének és Dr. Kovács Norbert Krisztiánnak a szakmai segítségnyújtásukért és Bartók Györgynek a labormunkában nyújtott segítségéért. A TDK dolgozat a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2-III-BME-293 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A TDK dolgozat 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 a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-466 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 .....	ii
Jelölések jegyzéke.....	v
1. Bevezetés .....	2
2. Szakirodalmi áttekintés .....	3
2.1. Szendvicsszerkezetek alkalmazása .....	3
2.2. 3D nyomtatott szendvicsszerkezetek.....	5
2.3. Összefoglalás, célkitűzés.....	11
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések .....	12
3.1. Felhasznált alapanyagok .....	12
3.1.1. <i>Colorabb LW-PLA</i> .....	12
3.1.2. <i>Amorf politejsav</i> .....	12
3.1.3. <i>Vágott szénszál</i> .....	12
3.2. Alkalmazott berendezések .....	12
3.2.1. <i>Ikercsigás extruder</i> .....	12
3.2.2. <i>Granulálás</i> .....	13
3.2.3. <i>Filament extruder</i> .....	13
3.2.4. <i>3D nyomtató</i> .....	13
3.2.5. <i>Zwick Z050 szakító gép – hajlító befogóval</i> .....	14
3.2.6. <i>Ejtődárdás ütőmű – Ceast Fractovis 9350</i> .....	14
3.2.7. <i>Digitális tolómérő</i> .....	15
3.3. Felhasznált szeletelő és CAD szoftverek.....	15
3.4. Vizsgálati módszerek .....	15
3.4.1. <i>Hajlítóvizsgálat</i> .....	15
3.4.2. <i>Ejtődárdás vizsgálat</i> .....	16
4. Kísérleti/fejlesztési rész .....	18
4.1. Habosodó filamentek expanziós tulajdonságainak vizsgálata .....	18
4.1.1. <i>Habosodás vizsgálata</i> .....	18
4.2. Szénszálalás filament gyártása.....	19
4.3. Próbatestek nyomtatása .....	20
4.4. Mechanikai vizsgálatok eredménye.....	22
4.4.1. <i>Ejtődárdás vizsgálatok</i> .....	22
4.4.2. <i>Hajlítóvizsgálatok</i> .....	24
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	28

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló.....	<b>Hiba! A könyvjelző nem létezik.</b>
6. Felhasznált források .....	29

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

### Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
T	hőmérséklet (temperature)	°C
T <sub>g</sub>	üvegesedési átmenet hőmérséklet (glass transition temperature)	°C

### Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$\sigma$	mechanikai szilárdság	MPa

### Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
PLA	Polylactic acid
LW-PLA	In-situ habosodó PLA alapanyag 3D nyomtatáshoz
FDM	Szálfektetésen alapuló additív gyártás (Fused Deposition Modeling)
CF	szénszál (carbon fibre)
gCode	A 3D nyomtatók által használt, a modell paramétereit tartalmazó kód

## 1. BEVEZETÉS

Az additív gyártástechnológiák – a köznyelvben 3D nyomtatás – fejlődésének hála a technológia alkalmazása ma már szinte mindenki számára elérhető. A legtöbbet használt technológiák között vannak az extrúzió alapú, additív gyártástechnológiák, mint az FDM (Fused Deposition Modeling) valamint a FFF (Fused Filament Fabrication). Az FDM és FFF technológiákkal a fröccsöntésben is használt termoplasztikus műanyagok nagy része felhasználható. Amíg korábban a technológia kifejezetten bemutató és prototípus darabok elkészítésére volt használható, addig ma már végfelhasználásra szánt alkatrészek gyártására is alkalmas. A rétegről rétegre történő felépítés miatt az extrúzió alapú technológiákkal szinte bármilyen geometria előállítható, tehát nagy tervezői szabadságot biztosít a felhasználó számára.

Az FDM technológia hátránya hosszú ideig az volt, hogy egyszerre csak egy modellanyag és esetleg egy másik nyomtatófej felhasználásával egy támaszanyag volt felhasználható. Napjainkban már elérhetők olyan berendezések, amelyek egyszerre akár 4-5 műszaki alapanyag felhasználását is lehetővé teszik, így a mérnöki tervezésben egészen új lehetőségek nyíltak meg. A fejlesztéseknek hála, ma már elképzelhető, hogy egy-egy alkatrész több anyagból épül fel, egyes részei teljesen más anyagtulajdonságokkal rendelkeznek, mint a többi.

TDK dolgozatom célja az volt, hogy megvizsgáljam a különböző tulajdonságokkal rendelkező, később a doktori munkámban is felhasználni kívánt alapanyagokat, illetve teszteljem az ezekből az anyagokból kialakított anyagpárosítások lehetséges előnyeit. Az FDM technológia lehetővé teszi, hogy ugyan azon a berendezésen mind kompozit, mind akár az extrúzió hatására habosodó alapanyagokat is felhasználjunk (In-situ habosodó alapanyagok). A technológia fejlődésével ma már ez a két alapanyag egy alkatrészen belül, egy gyártási ciklus során is felhasználható, ezért kutatásom során kompozitok és habok 3D nyomtatással való társíthatóságát vizsgáltam. A habok előnye a tömegcsökkentés és az energiaelnyelő képesség növelése, míg a szálerősített kompozitokkal a merevség és a szilárdság javítható. Az együttes 3D nyomtatás által adott igénybevételre tervezett szerkezetek hozhatóak létre, amelyekben egyszerre érvényesülnek a komponensek előnyei. Olyan szendvicsszerkezeteket és struktúrákat hoztam létre, amelyekkel demonstrálhatom a technológiában rejlő lehetőségeket, a technológia felhasználhatóságát és előnyeit.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Irodalomkutatásom során a 3D nyomtatással készült szendvicsszerkezetekre fókuszáltam, amelyen belül információt gyűjtöttem az alkalmazott gyártási paraméterekről és az elért mechanikai jellemzőkről.

### 2.1. Szendvicsszerkezetek alkalmazása

Szendvicsszerkezetek alkalmazására az ipar több területén is találhatunk példákat. Fő ismervük a rendkívül nagy fajlagos szilárdságuk, energiaelnyelő képességük, kis súlyuk és nagy fokú variálhatóságuk az egyes speciális esetekre. Egy általános szendvicsszerkezet leírható két külső héjréteg, valamint egy középső, sok esetben könnyű mag által alkotott szerkezetként. A szendvicsszerkezetek külső héja a nyomásból és a hajlításból származó terhelés felvételére szolgálnak, míg a belső mag a nyírásból fellépő terhelés elosztatásáért felel. A belső mag vastagságának növelésével kis súlynövekedés mellett nagy szilárdságnövekedés érhető el [1]. Természetesen a rétegek sorrendje, a héjak, valamint a mag anyaga minden egyes alkalmazás esetén változhat. A maganyag több esetben rácsos szerkezetű is lehet így tovább könnyítve a szerkezetünket.

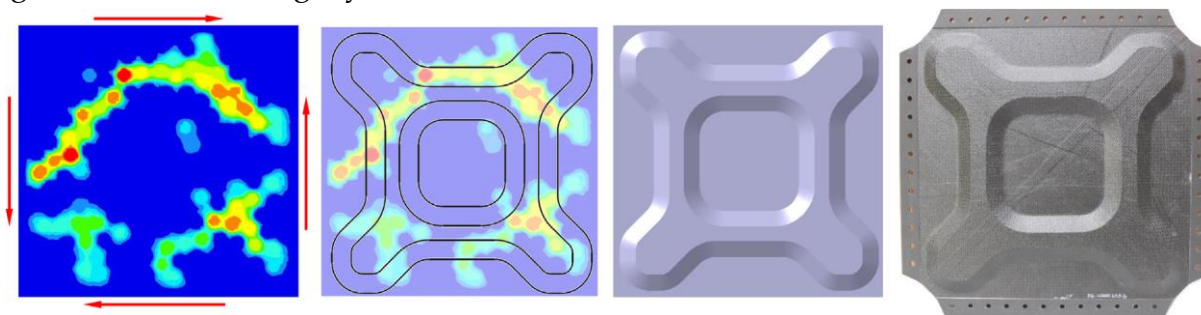
A szendvicsszerkezetek alapanyagait az adott alkalmazási terület határozza meg. Grafit-epoxi és karbon-epoxi szerkezeteket főleg a repülőiparban figyelhetünk meg, míg üveg-epoxi, valamint üveg-vinyl szerkezeteket a hajóiparban, valamint az építőiparban alkalmaznak. Amíg a repülőiparban főleg alumínium vagy úgynevezett Nomex méhsejt szerkezet használnak maganyagként (habként) addig az építőipari alkalmazásoknál ez többnyire nyitott vagy zártcellás habszerkezet szokott lenni [2]. Autóipari alkalmazások esetén elsősorban a jármű belsejében található, hajlításnak kitett alkatrészek készülhetnek szendvicsszerkezetekből, ezáltal a jó mechanikai tulajdonságok mellett nagy tömegcsökkenés is elérhető [3].

Az összetett magszerkezetek gyártása hagyományos gyártástechnológiákkal, mint a melegsajtolásos formázás (hot-press molding) drága és hosszadalmas lehet, hiszen a magszerkezet, valamint a héjrétegek külön, több lépésben készülnek el [4]. A szendvicsszerkezetek tulajdonságainak meghatározására legtöbbször nyomó, hárompontos hajlító valamint ejtődárdás vizsgálatokat alkalmaznak.

A szendvicsszerkezetek tulajdonságai nagyban függhetnek a gyártástechnológiától is. Aneta és társai [5] az alkalmazott gyártástechnológiának a hajlítószilárdságra gyakorolt hatásait vizsgálták. Munkájukban kézi laminálással, préssel és autoklávos eljárással készült minták mechanikai tulajdonságait vetették össze. Eredményeik alapján a leggyengébb hajlítószilárdsággal a kézi laminálással előállított minták rendelkeztek, amíg az autoklávban elkészült minták minden esetben felülmúlták a többi. Ennek oka az, hogy az autoklávban készült mintákban a hő és nyomás hatására kevesebb légzárvány alakul ki, így a hibahelyek száma kevesebb volt. Az autoklávban készült minták esetében jóval nagyobb száltartalomról is

beszélhetünk, mint a kézi laminálás esetében. A kézi laminálással gyártott mintáknál az eredmények nagyobb szórást is mutattak, mint a másik két technológia eredményei. Bár a kézi laminálás olcsó és egyszerű eljárás, az így készült alkatrészek reprodukálhatósága és ezáltal minőségbiztosítása jóval nehezebb, mint egy fejlettebb technológia esetén.

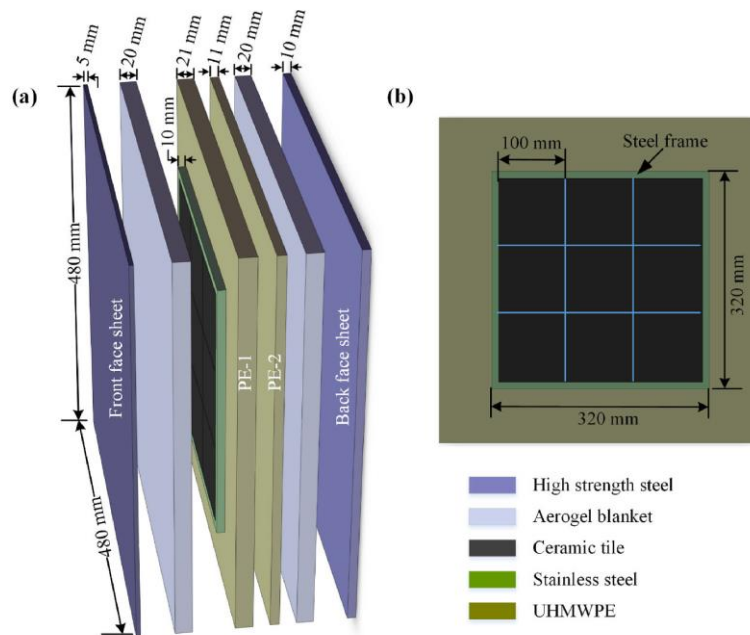
A szendvicsszerkezeteket gyakran alkalmazzák olyan kritikus környezetben, ahol a nagy fellépő terhelések ellenére a súlycsökkentés kiemelten fontos. Axel és társai [6] az aszimmetrikus szendvicsszerkezetek súlycsökkentését vizsgálták repülőipari alkalmazások esetén. Az aszimmetrikus szendvicsszerkezeteknél a magot közbezáró két héjréteg rétegszáma vagy rétegrendje eltér, így a fellépő terhelések sem szimmetrikusan oszlanak el a szerkezetben (1. ábra), ilyen szerkezet például a helikopterek szerkezeti és burkolati elemeinek egy jelentős része. A szendvicsszerkezetek további optimalizációjával – az eredeti szilárdság megőrzését vagy esetleg javítását szem előtt tartva – további súlycsökkentés érhető el. Az optimalizált forma gyártása becslések szerint körülbelül kétszer drágább lehet, mint a hagyományos panel előállítás, mely költséget főleg a szerszámzás és a megnövekedett emberigény tesz ki.



1. ábra A fellépő terhelés eloszlása alapján előállított, optimalizált forma [6]

A szendvicsszerkezetek és kompozitok aszimmetrikus rétegrendjére más példát is találhatunk az iparban. Pengcheng és társai [7] többrétegű kompozit pánccél fejlesztésével foglalkoztak. A kompozit pánccélok jellemzője, hogy a legkülső réteg kemény, rideg alapanyagból készül, amíg befelé haladva egyre szívósabb, puhább rétegek következnek (2. ábra). Eredményeik igazolták a kemény első réteg szerepét, hogy a beérkező nagy sebességű lövedéket darabokra törje, így csökkentve az energia mennyiségét, amit a következő rétegeknek el kell nyelnie.





2. ábra Egy kompozit páncél általános felépítése [7]

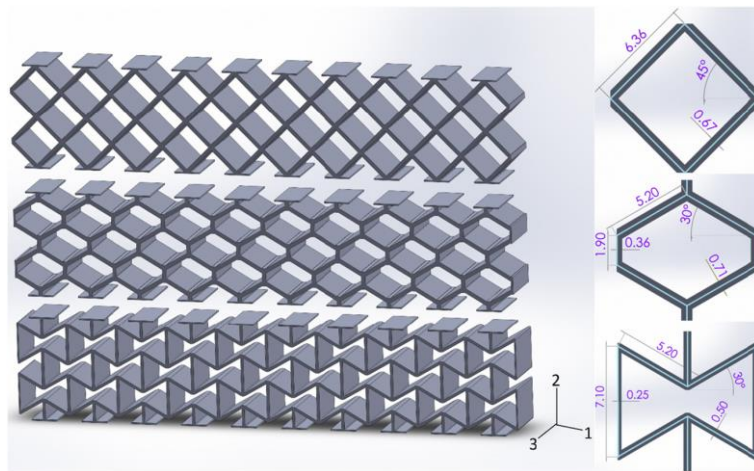
Bizonyos feltételek mellett a problémára megoldást jelenthetnek az additív gyártással előállított, emberi erőforrásokat kevésbé, szerszámozást egyáltalán nem igénylő alkatrészek.

## 2.2. 3D nyomtatott szendvicsszerkezetek

A 3D nyomtatás ütemes fejlődésének köszönhetően ma már többfázisú, összetett szerkezetek is nyomtathatók egy lépésben, így a technológia alkalmas habmaggal rendelkező kompozit szendvicsszerkezetek előállítására. Kutatásokban néhány évvel ezelőtt jelentek meg az első ezzel foglalkozó publikációk, 2020 óta pedig a piacon is elérhető berendezések a hétköznapi alkalmazást is lehetővé teszik.

Az additív gyártással előállított szendvicsszerkezetek egyik előnye lehet, hogy mind a héjszerkezet, mind a maganyag mintája és kitöltése is a felhasználáshoz igazítható, akár lokálisan megerősíthető vagy módosítható lehet.

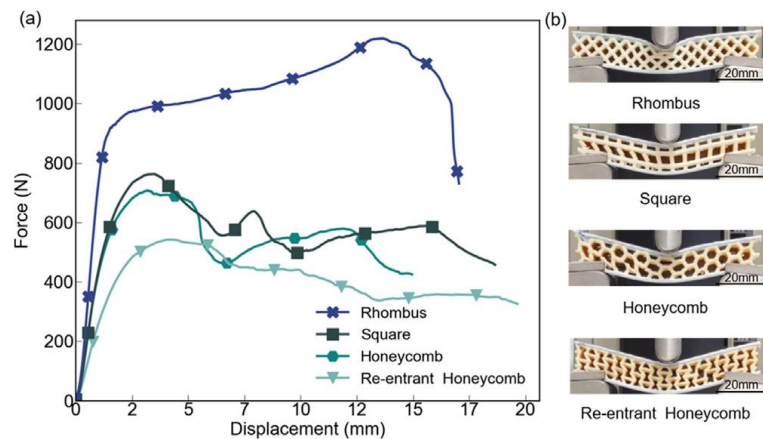
Shayou és társai [8] 3D nyomtatott maggal rendelkező szendvicsszerkezeteket vizsgáltak. A három nyomtatott magszerkezet a következő volt: gyémántrács minta, hagyományos méhsejtszerkezet és re-entrant (visszatérő) méhsejtszerkezet (3. ábra). A magszerkezetek térkitöltése minden esetben 20%-os volt.



3. ábra A gyémántrács (felül), méhsejt szerkezet (középen) valamint a "visszatérő" méhsejtszerkezet (alul) [8]

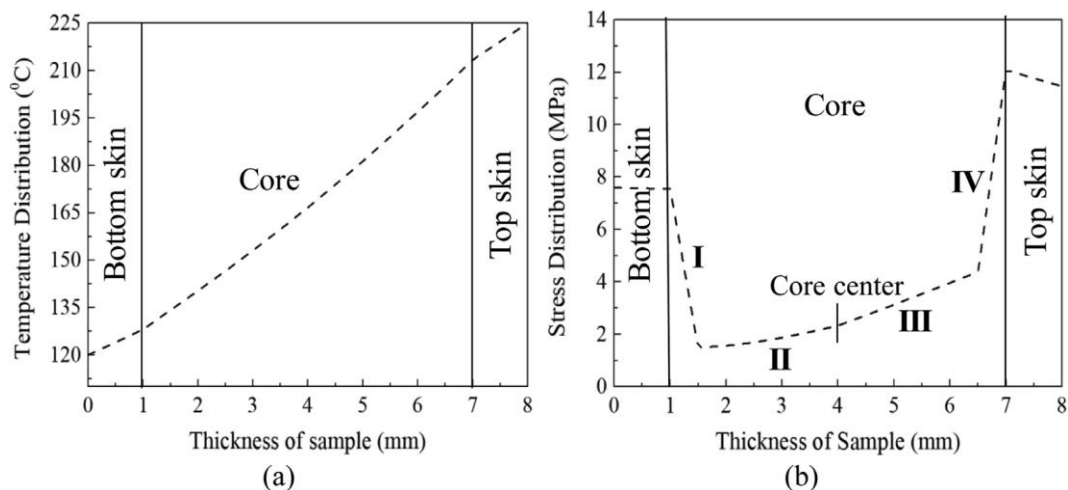
A magszerkezetek gyártását egy Objet Connex 260 berendezéssel gyártották le. A héjszerkezet nem 3D nyomtatott volt, ezek alapanyagául unidirekcionális erősítésű szénszálalamezek szolgálták. A nyomtatott struktúrák és a héjszerkezet illesztésére 3M Scotch-Weld DP420 ragasztót használtak. Az elkészült minták dinamikus hajlításnak vetették alá: egy 3,2 mm-es rádiusszal rendelkező fejjel lóttak a próbatestekre, a rádiusz megakadályozta, hogy a próbatest felülete átszakadjon, az tisztán hajlítói igénybevétel szenvedett. Az eredmények alapján a „visszatérő” méhsejtszerkezet gyengébb energiaelnyelő képességgel rendelkezett a másik két mintához képest, de a szívóssága felülmúlja azokat.

Az additív gyártástechnológiák fejlődésével ma már lehetőség nyílt a szendvicsszerkezeteket 3D nyomtatással, utólagos megmunkálás és emberi interakció nélkül legyártani. Az extrúzió alapú technológiákkal többnyire úgynevezett vágott, rövid szálal tartalmazó alapanyagok dolgozhatók fel, de egyes esetekben lehetőség nyílik az extrudált műanyaghoz folytonos szálal adagolni. Ilyen technológia felhasználásával dolgoztak Zhenzhu és társai is [4], akik egy Anisoprint A3 kétféjes nyomtató segítségével gyártottak szendvicsszerkezeteket. A nyomtató egyik feje alkalmas 1,5k-s szénszál adagolására a lefektetett polimerbe, amely ebben az esetben Polymaker PLA alapanyag volt. Az így kialakított héjszerkezet egy habosodó PLA-LW alapanyag volt. A habosodó PLA a nyomtatási hőmérséklet függvényében különböző mértékben habosodhat, a maximum, körülbelül 140%-os térfogatnövekedést 230°C-on érte el. Megállapították, hogy a habszerkezetek alkalmazása nagy mértékben növeli a kompozit alapanyagok energiaelnyelő képességét, valamint jelentős mértékű súlycsökkentés elérését teszi lehetővé. A különböző kitöltés minták közül a rombusz szerkezet adta a legnagyobb hajlítószilárdságot és energiaelnyelő képességet. A speciális re-entrant (visszatérő) méhsejtszerkezet ugyan nem rendelkezik a legnagyobb energiaelnyelő képességgel, de nagy deformációk esetében sem szenvedett tönkremenetelt a vizsgált mérési tartományon.



4. ábra A különböző kiegészítési minták hatása a hajlítószilárdságra [4]

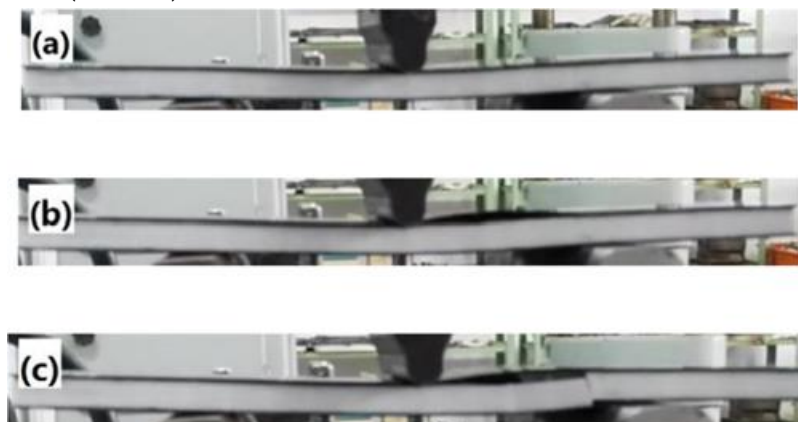
Az extrúzió alapú technológiák használata során számos hibalehetőség van jelen, például a nyomtatott tárgyak vetemedése, amely a kritikus esetben a nyomtatott tárgynak tárgyasztaltól való elválását okozhatja nyomtatás közben ezzel meghíúsítva a gyártást. Ennek a problémának a kiküszöbölésére a 3D nyomtatott in-situ habszerkezetek megoldást jelenthetnek. Dileep és társai [9] HDPE alapanyag felhasználásával állítottak elő szintaktikus hab maggal rendelkező szendvicsszerkezeteket 3D nyomtatással. Kutatásukhoz saját maguk állították elő a filamentet. A héjszerkezethez töltetlen HDPE alapanyagból készült filamentet használtak, míg a magszerkezet 20-40-60 tömegszázalék üveg mikrogöngyöt tartalmazó HDPE filament felhasználásával készült. A HDPE alapanyag a nagy vetemedése és a tárgyasztalhoz való elégtelen tapadása miatt FDM technológiával nem használatos, a kutatás során is problémát okozott a nyomtatás közbeni deformáció. Ennek megoldására a nagy hőmérsékletű nyomtatóágy (120°C) jelentett részleges megoldást. Az üveggyöngyök jelenléte miatt a HDPE alapanyag egyébként szignifikáns vetemedése csökkent a nyomtatás során, amely tulajdonság más nagy vetemedésre hajlamos alapanyagoknál is felhasználható lehet. Dileep és társai szerint a vetemedést nagy részben a HDPE alapanyagban a nyomtatás során fellépő termikus feszültség okozta. A termikus feszültség a fúvóka folyamatos mozgása miatt kialakuló ingadozó hőterhelés miatt alakul ki, amely az FDM technológia velejárója. A habosított HDPE alapanyag hővezetése gyengébb, mint a töltetlen anyagé, így a magszerkezet nyomtatása során a termikus feszültségek alacsonyabbak, a vetemedés kisebb mértékű (5. ábra).



5. ábra A nyomtatás során kialakuló hőmérséklet és termikus feszültség eloszlás [9]

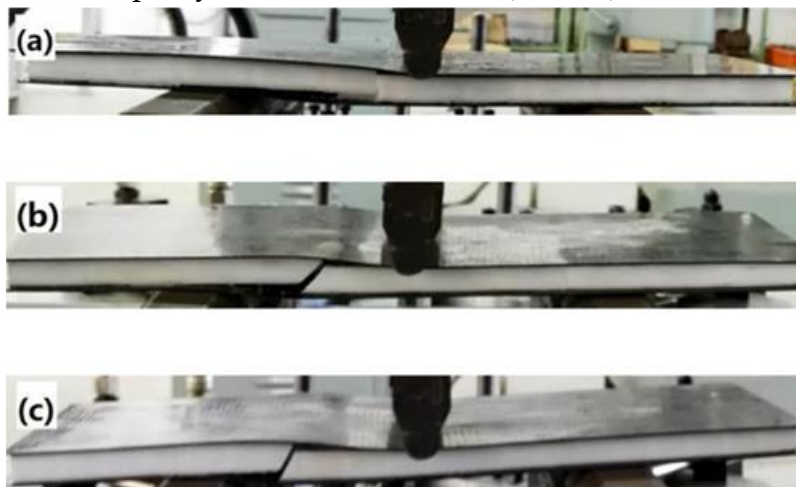
A kutatásban elkészített próbatetek esetén az is bebizonyosodott, hogy 3D nyomtatással előállítható olyan szendvicsszerkezet, amely esetén az egyes rétegeket nem szükséges ragasztani, mert azok egybeolvadnak [9].

A 3D nyomtatott szendvicsszerkezetek egyik előnye lehet, hogy a korábban nem, vagy csak bonyolultan gyártható magszerkezetek előállítását nagyban megkönnyíti az additív gyártás. A bonyolultabb formák néhány esetben nagyobb fajlagos energiale nyelő képességet jelenthetnek, így olyan tömegérzékeny felhasználási területeken, mint a repülés nagy előnyt jelenthet a felhasználásuk. Chun és társai [10] 3D nyomtatott, 8 mm vastag magszerkezettel és 0,6 mm vastag szénszál-epoxi héjszerkezettel gyártottak szendvicsszerkezeteket. A két fázis illesztése Di-Glycidil Ether alapú ragasztóanyaggal történt. A magszerkezetek térkitöltése minden esetben azonos volt, de a kitöltési minta változtatása került: bi-, tri-, quadri-, valamint kagome rácsszerkezetek kerültek vizsgálatra. A hárompontos hajlítóvizsgálatok során a héjszerkezet csak közvetlen a hajlítóberendezés nyomófeje alatt adja át a terhelést a magszerkezetnek, ezáltal ezen a területen nagy igénybevételek érik. A Bi-rács próbatetek esetén a tönkremenetel formája a héj és magszerkezetek közötti delaminálódás volt (6. ábra).



6. ábra A Bi-rács tönkremenetel a) elasztikus deformáció, b)delaminálódás, c)magban fellépő nyírás [10]

A Tri-, Quadri-, valamint Kagome-rács próbatetek tönkremenetele a magszerkezetekben fellépő nyírás hatására történt (7. ábra).

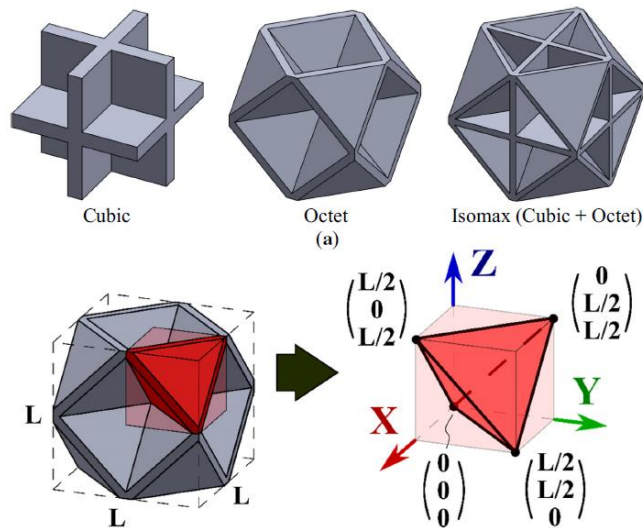


7. ábra Hajlító igénybevétel esetén a tönkremenetel az a) Tri-rács, b) Quadri-rács, c) Kagome-rács próbatetek esetén [10]

A legnagyobb fajlagos terhelhetőséggel a Quadri-rács próbatetek rendelkeztek.

Yazdani és társai [11] 3D nyomtatott meta-szendvics struktúrák hajlítóigénybevételre adott válaszát, valamint energiaelnyelő képességét vizsgálták. Az általuk meta-szendvics struktúráknak elnevezett struktúrák olyan könnyű, ismétlődő 3D cellás szerkezetből álló, nagy merevség-tömeg aránnyal rendelkező struktúrák, amelyekben az egyes cellák elérhetik a Hashin-Shtrikman korlát felső határát a maximális rugalmas alakváltozásra nézve. A Hashin-Shtrikman korlátok elméleti határértékeket jelentenek egy olyan összetett anyag esetében, ami két különböző fázist tartalmaz. Egy kétfázisú összetett anyag esetén a Hashin-Shtrikman korlátok lehetővé teszik az effektív tulajdonságok, például a rugalmassági modulus felső és alsó határainak meghatározását az egyedi fázistulajdonságok alapján. Az általuk használt szendvicsstruktúrák fő ismertetőjegye a háromdimenziós magszerkezet, melyek közül a „cubic”, „octet” és „isomax” formákat vizsgálták mind végelelemes szimulációval, mind pedig hagyományos mechanikai vizsgálatokkal (8. ábra).

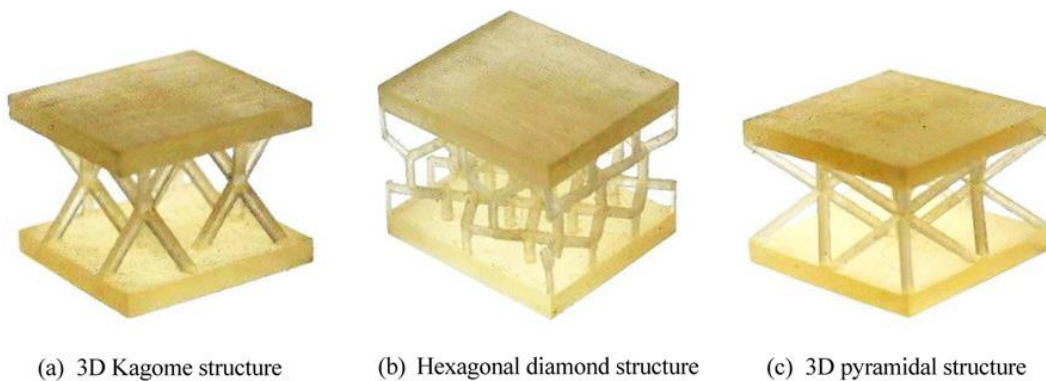




8. ábra A vizsgált kitöltési minták [11]

Eredményeik alapján a magszerkezet topológiájának nagy hatása van a minták mechanikai tulajdonságaira. Kvázistatikus vizsgálat esetén – ebben az esetben három pontos hajlítás – a legnagyobb energiaelnyelő képességgel az „octet” maggal rendelkező minták rendelkeztek. Alacsony energiájú dinamikus vizsgálatok esetén, mint az alacsony sebességű ütvehajlító vizsgálat a minták energiaelnyelő képességében nem volt szignifikáns különbség, azonban nagyobb erők esetén az „octet” minta ismét nagyobb energiaelnyelést mutattak. A nyomtatás iránya szintén meghatározza az egyes minták energiaelnyelő képességét.

Seung és társai [12] könnyű, additív gyártással előállított szárnyszerkezetekhez vizsgáltak több különböző térkitöltést. Az általuk vizsgált harcászati drónok esetében az egyik legfontosabb szempont a kis tömeg melletti nagy teherviselő és ellenállóképesség. A szárnyszerkezet magán viseli az egész jármű súlyát, azonban ennek továbbra is könnyűnek kell maradnia. Seung és társai [12] három térkitöltés mintát vizsgáltak: 3D Kagome, 3D piramis és 3D gyémánt struktúrát (9. ábra). A szárnyelemek elkészítéséhez egy a polipropilén anyagtulajdonságait jól szimuláló fotopolimert, a Stratasys által gyártott Objet DurusWhite RGD430 alapanyagot használták fel.



9. ábra Seung és társai által vizsgált térkitöltés minták [12]

Eredményeik alapján a három struktúra közül a 3D Kagome struktúra képes a legnagyobb terhelést felvenni nagy mértékű deformáció előtt, azonban a gyengébb gyémánt struktúra sokkal nagyobb deformáció ellenére sem törik el – bár a felvett terhelés jelentősen elmarad a Kagome-tól.

A 3D nyomtatott szendvicsszerkezetek és struktúrák nagy súlycsökkentés mellett képesek kielégítő mechanikai tulajdonságokat biztosítani. Legnagyobb előnyük a kis tömegük, jó hőszigetelésük és gyors, olcsó előállításuk. A hadiipar fellendülésével a gyorsan előállítható, speciális igényeknek megfelelő járműalkatrészek és eszközök gyártása 3D nyomtatással jóval olcsóbb és egyszerűbb lehet, mint más, hagyományos eljárásokkal. Az FDM technológia térnyerésével a 3D nyomtatott szendvicsszerkezetekről is több és több szakirodalom érhető el, azonban ezek száma még elhanyagolható a hagyományos szendvicsszerkezeteké mellett.

### 2.3. Összefoglalás, célkitűzés

Irodalomkutatásom alapján arra jutottam, hogy az additív gyártással előállítható szendvicsszerkezetekről még nagyon kevés szakirodalom áll rendelkezésre, azonban ezek alapján az ilyen szerkezetek sok meglévő problémát oldhatnak meg: a különböző fázisok határfelületére nem szükséges ragasztóanyag elhelyezése, az FDM technológia lehetőségei miatt mind erősítőszálakat tartalmazó, mind in-situ habosodó alapanyagok is feldolgozhatók. TDK dolgozatomban az egyik legújabb FDM technológiát alkalmazó berendezéssel gyártok olyan próbatesteket, amelyek mind kompozit, mind habosodó alapanyagot is tartalmaznak. Fő célom olyan szendvicsszerkezetek előállítása, melyek jelentős tömegcsökkenés mellett nem rendelkeznek szignifikánsan gyengébb mechanikai tulajdonságokkal, mint a referencia alapanyagok.

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben a munkám során felhasznált alapanyagokat és berendezéseket ismertetem.

#### 3.1. Felhasznált alapanyagok

##### 3.1.1. *Colorabb LW-PLA*

Munkám során egy, a kereskedelmi forgalomban is elérhető, a nyomtatási paraméterektől függően habosodó alapanyagot használtam. A Colorfabb (Belfeld, Hollandia) által gyártott, nyomtatási hőmérséklet függvényében habosodó LW-PLA alapanyag 750 grammos kiszerezésű, 230°C-on nyomtatva az eredeti térfogata körülbelül 300%-ára duzzad, így akár 65%-os súlycsökkentést is elérhetünk vele a gyártó szerint. Az alapanyag a legtöbb esetben repülőmodellezők által kerül felhasználásra [13].

##### 3.1.2. *Amorf politejsav*

TDK dolgozatomhoz saját magam is készítettem filamentet. Ezek alapanyagául a NatureWorks (Minneapolis, Minnesota, Egyesült Államok) által gyártott Ingeo 4060D alapanyag szolgált. A PLA alapanyag 12,0% D-laktid tartalommal rendelkezik, amorf, megjelenése sárgás-áttetsző. Az alapanyag ideális filament készítéséhez, mivel kis MFI értékkel, valamint alacsony feldolgozási hőmérséklettel és zsugorodással rendelkezik.

##### 3.1.3. *Vágott szénszál*

A szénszálalás filament készítéséhez 10 m%, a Zoltek által gyártott PX35 Type 48 vágott szálal adagoltam, melyek hossza 8 mm volt, az egyes szálal átmérője 7,2  $\mu\text{m}$ .

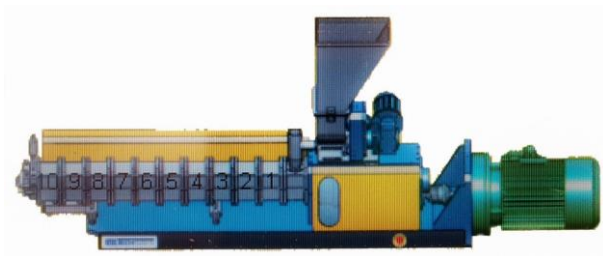
#### 3.2. Alkalmazott berendezések

Ebben a fejezetben a felhasznált berendezéseket mutatom be.

##### 3.2.1. *Ikercsigás extruder*

A polimer granulátumot, valamint a vágott szálal a LabTech Engineering Co., Ltd-től származó LTE 26-44 típusú ikercsigás extruder segítségével dolgoztam fel. A csiga L/D aránya konfigurációtól függően 24-30:1, míg a kompressziós szakasz aránya 2-3:1.





10. ábra Az ikercsigás extruder vázlata

### 3.2.2. Granulálás

Az ikercsigás extruderrel kompaundált zsinór terméket egy Labtech Engineering (Samutprakarn, Thaiföld) LZ-120/VS granulálóval granuláltam. A granulátum választott átmérője körülbelül 2,5-3 mm, hossza 3-4 mm, amely értékeket tapasztalati úton határoztam meg a korábbi projektjeim során.

### 3.2.3. Filament extruder

A saját gyártású filamenteket a 3Devo B. V. (Utrecht, Hollandia) által gyártott Precision 450 készüléken készítettem el. A filament extruder maximális gyártási hőmérséklete 450°C, az elérhető legnagyobb átmérőpontosság 0,05 mm. A berendezés az alapanyagok egyes komponenseinek keverésére nem alkalmas, ezért az extruderrel csak kompaundált majd granulált alapanyagot tudtam felhasználni.

### 3.2.4. 3D nyomtató

A próbatestek nyomtatásához egy Original Prusa I3 MK3S+ (Prusa Research, Prága, Csehország) nyomtatót használtam fel, amelyhez az alapanyagcserékhez szükséges MMU3 (Multi Material Unit 3) berendezést is csatlakoztattam. A 3D nyomtató maximális nyomtatási hőmérséklete 300°C, maximális asztal hőmérséklete 120°C. Az MMU3 egy nyomtatás során öt alapanyagot tud kezelni egyszerre. Az erősen abrazív tulajdonságokkal rendelkező szénszálas alapanyagok miatt a nyomtatót egy 0,6 mm átmérőjű Brozzl edzett acél fúvókával szereltem fel.



11. ábra Original Prusa I3 MK3S+ [14]

### 3.2.5. Zwick Z050 szakítógép – hajlító befogóval

A hajlítóvizsgálatokat egy Zwick Z050 szakítógépén végeztem, melyre egy speciális, a négypontos hajlítóvizsgálatokra alkalmas befogópofát szereltem.



12. ábra Zwick Z050 [15]

### 3.2.6. Ejtődárdás ütőmű – Ceast Fractovis 9350

A próbatestek energiaelnyelő képességének tesztelésére a Ceast Fractovis 9350 (Instron/Ceast, Torino, Olaszország) berendezést használtam. A berendezés 2-70 kg-os változtatható vizsgálati tömeget tud használni, míg a rugós előterhelésnek köszönhetően az egy méteres ejtési magasság tovább növelhető. Az ejtődárda átmérője 20 mm volt [16].

### 3.2.7. Digitális tolómérő

A próbatetek falvastagságának meghatározására egy Mitutoyo Absolute Digimatic tolómérőt használtam fel, melynek mérési pontossága 0,01 mm, maximális mérési hossza 150 mm.



13. ábra Mitutoyo Absolute Digimatic

### 3.3. Felhasznált szeletelő és CAD szoftverek

A próbatetek szeleteléséhez a PrusaSlicer 2.6.1-es verzióját használtam fel. A szoftver lehetővé teszi egyszerre akár öt alapanyag kezelését is, így kényelmesen szeletelhetők és gyárthatók voltak a próbatetek.

Az egyszerű próbatetek modellezéséhez az Autodesk Fusion 360-as CAD szoftvert használtam fel.

### 3.4. Vizsgálati módszerek

Ebben a fejezetben az általam alkalmazott mérési módszereket ismertetem.

#### 3.4.1. Hajlítóvizsgálat

A szendvicsszerkezetek vizsgálatát egy Zwick Z050-es szakítógépen és az ehhez tartozó négyponos hajlítóvizsgálat elvégzéséhez alkalmas speciális befogón végeztem el. A gyártott hajlító próbatetek megfeleltek az ISO/R 178 szabványnak, befoglaló méretei 80x10x4 mm, a próbatetek alátámasztási távolsága 66 mm volt, a felső nyomófejek távolsága pedig 22 mm. A hajlítószilárdság értéket az (1) képlettel számolhatjuk:

$$\sigma_{bh} = \frac{FL}{bh^2} [MPa] \quad (1)$$

Ahol:

- $\sigma_{bh}$ : hajlító szilárdság [MPa]
- $F$ : töréshez tartozó erő [N]
- $L$ : alátámasztási távolság [mm]
- $b$ : a próbatest szélessége [mm]
- $h$ : a próbatest magassága [mm]

Amennyiben a próbatest az alátámasztási távolság 10%-ának megfelelő lehajlás esetén sem törik el, akkor az ehhez a lehajláshoz tartozó feszültséget határhajlító feszültségnek nevezzük.

A rugalmassági modulus a (2) képlettel számolható:

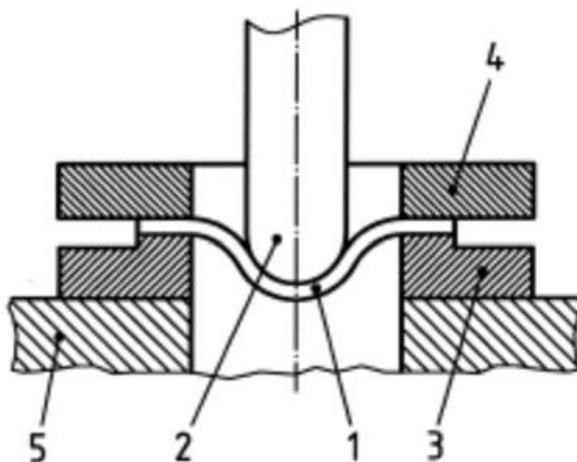
$$E_h = \frac{L^3}{bh^3} \frac{\Delta F}{\Delta f} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Ahol:

- $E_h$ : rugalmassági modulus [MPa]
- $L$ : alátámasztási távolság [mm]
- $b$ : a próbatest szélessége [mm]
- $h$ : a próbatest magassága [mm]
- $\frac{\Delta F}{\Delta f}$ : az erő-lehajlás görbe meredeksége [17].

### 3.4.2. Ejtődárdás vizsgálat

„A vizsgálat során egy beállított magasságból adott átmérőjű, a berendezéstől és a megkívánt terheléstől függő súlyokkal felszerelt „dárdát” ejtünk a kör alakú feltámasztást adó felületre helyezett lapszerű próbatestre, amelyet szükség esetén egy szorítógyűrűvel le is fogatunk” [18].



14. ábra Ejtődárdás vizsgálat elvi elrendezését az MSZ EN ISO 6603 szabvány írja le (1. próbatest; 2. ejtődárda; 3. próbatest tartó; 4. leszorító gyűrű; 5. alaplap) [18]

A vizsgálat eredménye egy erő-idő vagy erő-deformáció görbe. Az erő-idő görbe alatti területből meg lehet határozni a minták által elnyelt energiát (3) (4) [19].

$$A_{total} = \int_0^{\infty} F(t) dt \quad (3)$$

Ahol:

- $A_{total}$ : erő-idő görbe alatti terület,
- $F$ : az erőmérő cella által rögzített erőérték [N].

$$E_{total} = v \cdot A_{total} \cdot \left(1 - \frac{v \cdot A_{total}}{4 \cdot E_s}\right) \quad (4)$$

Ahol:

- $E_{\text{total}}$ : a teljes elnyelt energia [J],
- $v$ : becsapódás sebessége [mm/s],
- $E_s$ : dárda energiája [J].

Az ejtődárdás vizsgálattal a próbatestek energialenyelő képességét határozhatjuk meg. A méréshez 80x80x4 mm-es próbatesteket használtam, az alkalmazott dárda terhelhetősége 22 kN volt. A dárdavég átmérője 20 mm volt. Az elnyelt energiát a (5) összefüggéssel számolhatjuk.

$$E_p = \frac{E}{v_0} \quad (5)$$

Ahol:

- $E_p$ : perforációs energia [J/mm],
- $E$ : elnyelt energia [J],
- $v_0$ : a próbatest vastagsága [mm].

A próbatestek összehasonlíthatóságához az egyes perforációs energiákat elosztottam a próbatestek tömegével, majd az eredményeket a referencia alapanyaggal (4060D) normáltam.

$$E_{p,fajlagos} = \frac{E_p}{m_{\text{próbatetest}}} \quad (6)$$

Ahol:

- $E_{p,fajlagos}$ : fajlagos perforációs energia [J/mm\*g]
- $m_{\text{próbatetest}}$ : a próbatestek tömege [g]

## 4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Ebben a fejezetben az elvégzett önálló munkát mutatom be.

### 4.1. Habosodó filamentek expanziós tulajdonságainak vizsgálata

#### 4.1.1. Habosodás vizsgálata

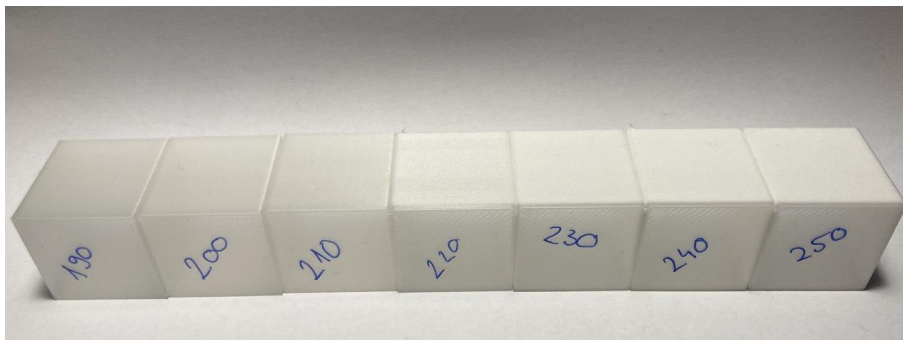
Az LW-PLA filament habosodási jellemzőinek vizsgálata azért fontos, mert a habosodással járó térfogatváltozást a szeletelőszoftverben kompenzálni kell. Ehhez a habosodásvizsgálathoz szakirodalom nem áll rendelkezésre, azonban a 3D nyomtatás folyamatosan növekvő közösségén belül több módszer is megtalálható. Az általam kiválasztott módszer egy német mérnök, Stefan Herrman által került bemutatásra [20]. A módszer lényege, hogy 20x20x20 mm-es, egyetlen fallal nyomtatott kockákat nyomtatunk különböző hőmérsékleten, majd ezek falvastagságának összehasonlításával megkapjuk a töltetlen filamenttől való eltérést. A filament habosodásának kompenzáció az „extrusion multiplier” (extrúziós együttható) beállítás módosításával történik, melynek gyári értéke 1.00. Ez a technológiai paraméter megadja, hogy egyes esetekben a gyári kalibrált értéknél mennyivel szükséges több vagy kevesebb anyagot adagolnia a nyomtató extruderének. A (7) képlet segítségével az extrúziós tényező (extrusion multiplier) a habosodás függvényében a következő képen alakul:

$$\text{extrusion multiplier} = \frac{w_0}{w_i} [-] \quad (7)$$

Ahol:

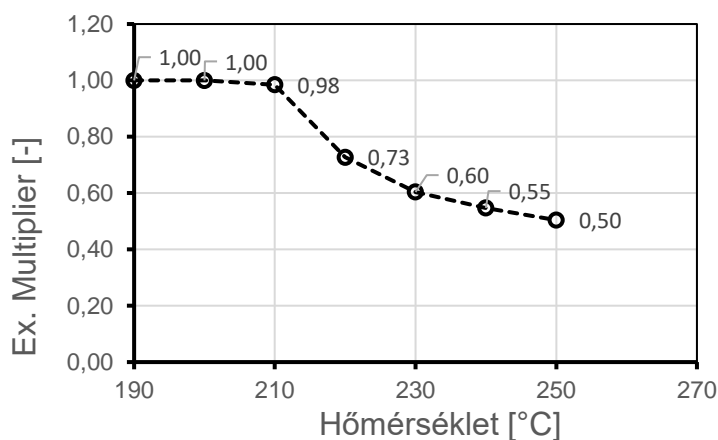
- $w_0$  = a nem habosodó filamenttel nyomtatott kalibrációs kocka falvastagsága
- $w_i$  = a habosodó filamenttel nyomtatott kalibrációs kocka falvastagsága

A filament habosodásának tulajdonságait 190-250°C-on vizsgáltam 10°C-os lépésközönként. A minták falvastagságát digitális tolómérővel minden oldalon ellenőriztem majd a mért értékek átlagát használtam fel. Az egyes próbatesteket a 15. ábra mutatja be: a próbatestek színe a habosodás hatására megváltozott, a szürkés áttetsző szín matt fehér felületté változott.



15. ábra A habosodás vizsgálatához készült próbatestek

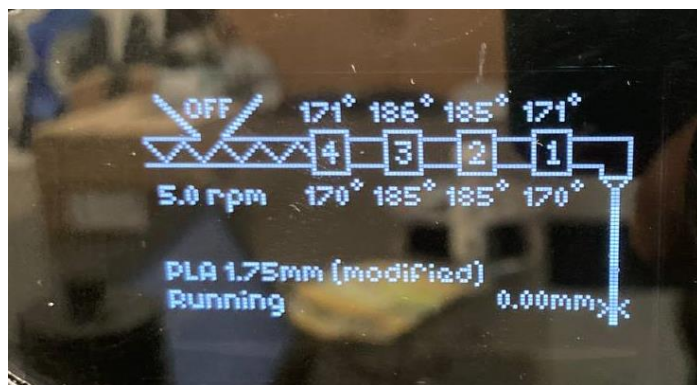
Az egyes hőmérsékleteken a filamenthez tartozó „extrusion multiplier” értékeket a 16. ábra mutatja be. Az alapanyag habosodása körülbelül 210-220°C-on indult be, ahonnan a próbatestek falvastagsága folyamatosan növekedett.



16. ábra Extrusion multiplier értékek az egyes hőmérsékleteken

## 4.2. Szénszálalás filament gyártása

A filamentek elkészítéséhez a 3Devo Precision 450 filamentextrudert alkalmaztam. Az extruder hőmérsékletbeállításait a 17. ábra mutatja be. Az előkísérletek során szerzett tapasztalatok alapján az extrudercsiga fordulatszámát alacsonyra, 5 fordulat/perc-re választottam meg, melynek oka a PLA kis lágyulási hőmérséklete volt. Nagyobb sebességű gyártás esetén a filament nem kör keresztmetszetet, hanem lapított-ovális alakot vett fel.



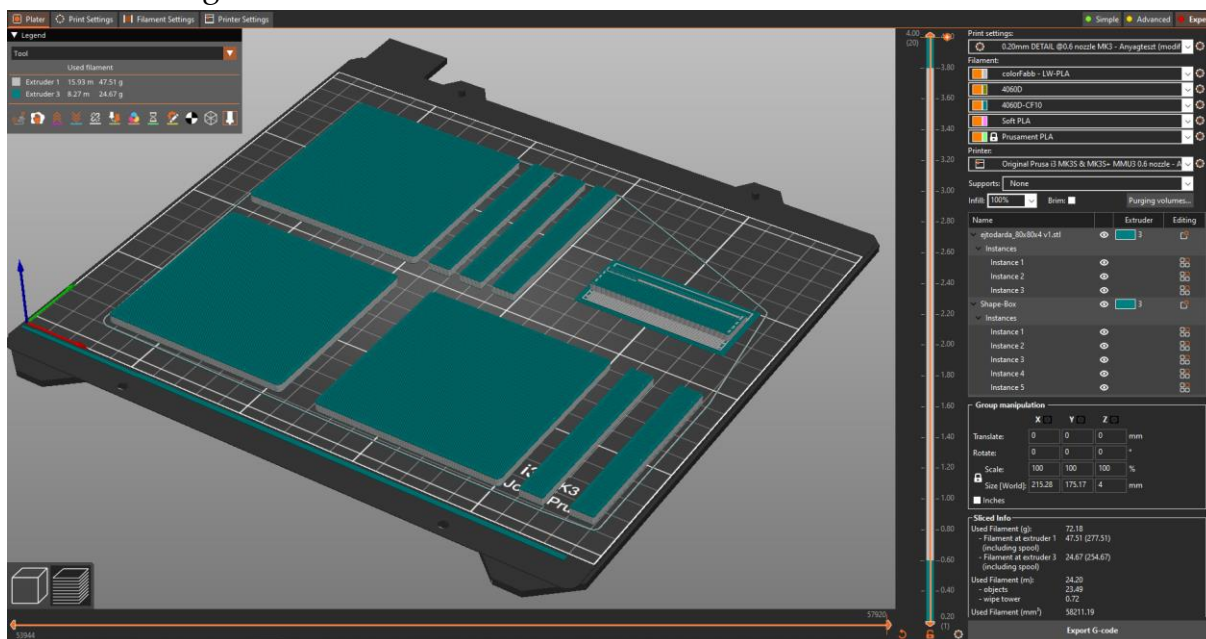
17. ábra A 3Devo filament extruder hőmérsékletprofilja

A filamentgyártást a 3Devo berendezés DevoVision nevű szoftverével monitorozni tudtam. A szoftver egyéb számos paraméter mellett méri a filament átmérőingadozását, az extruder által felvett áramot (amely közvetlenül utal az extruderben fellépő nyomásokra) és az egyes zónák hőmérsékletét is. A filament átmérője a teljes gyártás során  $1,75 \pm 0,1$  mm-en belül volt, mely megfelelőnek mondható az alapanyag teszteléséhez.



### 4.3. Próbatestek nyomtatása

A próbatestek nyomtatásához a gyári „Original Prusa i3 MK3S&MK3S+ + MMU 0.6 nozzle” beállításokat, valamint a gyári „0.2mm DETAIL” profilt használtam, azonban a kitöltöttség értékét 100%-ra és „Rectilinear” mintára állítottam, ahol a kitöltési minta  $\pm 45^\circ$  volt. A körvonalak száma 2 volt, míg a rétegmagasság minden réteg esetében 0,2 mm volt. A felhasznált filamentek nyomtatási paramétereit a 4.1-es fejezet alapján választottam meg.








18. ábra A próbatestek előnézeti képe a PrusaSlicer 2.6.1-es verziójában

Egy nyomtatáson belül egyszerre 5 hajlító próbatest és 3 ejtődárdás vizsgálathoz való próbatest készült el. Egy-egy próbatest típusból összesen két nyomtatás készült. Ahogy azt a 18. ábra is bemutatja, a próbatesteken kívül egy úgynevezett „purge tower”, azaz az alapanyagváltáskor a szín és alapanyag kijáratására használt torony is került, ami a nyomtatás végétével hulladékot jelent. A purge tower mérete a próbatestek számától nem függött, így a legideálisabb eredményt az asztal teljes kihasználásával értem el. Egyes anyagok után, mint például a sötét (fekete) színezékekkel vagy erősítőszálal töltött anyagok után a világosabb anyagra váltás esetén sokkal hosszabb kijáratásra van szükség az új anyaggal, mint ellenkező esetben. Emiatt a világos habosodó alapanyag esetében  $210 \text{ mm}^3$  kijáratást alkalmaztam, míg a szénszálal anyag betöltésénél csak a gyári  $70 \text{ mm}^3$  érték is elég volt (19. ábra).



Volume to purge (mm<sup>3</sup>) when the filament is being

		unloaded	loaded	
	Tool #1:	70	210	LW-PLA
	Tool #2:	70	70	
	Tool #3:	70	70	PLA-CF
	Tool #4:	70	210	
	Tool #5:	70	70	

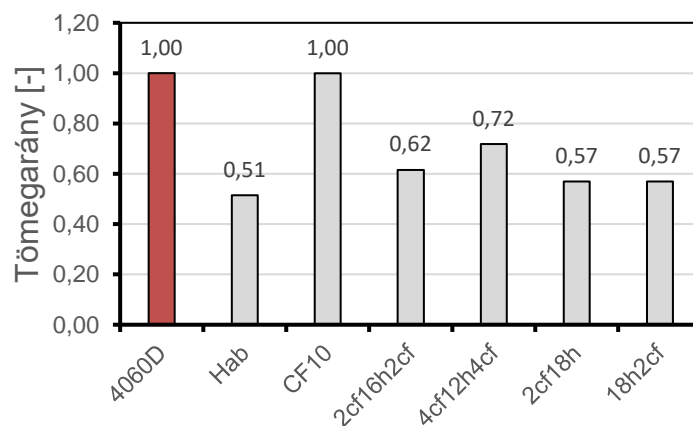
19. ábra Filamentek cseréje nyomtatás közben

A próbatetek nyomtatásánál egy esetet kivéve nem lépett fel hiba: a dolgozatomban eredetileg rugalmas alapanyagokat is alkalmaztam volna, azonban ezeket a 3D nyomtató feje és színcserélője nem tudta feldolgozni, az alapanyag folyamatosan elakadt a berendezésben. A rugalmas alapanyagok felhasználására a jövőben megoldást szeretnék találni.

Az egyes próbatest típusokat a következő módon neveztem el:

- 4060D: a kiinduló (referencia) alapanyag,
- CF10: 10% szénszálat tartalmazó alapanyag,
- Hab: 50%-os kitöltöttségű habszerkezet,
- 2CF16H2CF: 2-2 szénszál as héjréteget és 16 réteg habmagot tartalmazó próbatest,
- 4CF12H4CF: 4-4 szénszál as héjréteget és 12 réteg habmagot tartalmazó próbatest,
- 2CF18H: 2 szénszál as héjréteget és 18 habréteget tartalmazó próbatest,
- 18H2CF: 18 habréteget és 2 réteg szénszál as hátfalréteget tartalmazó próbatest.

Az elkészült próbatetek tömegét megmértem, és a referencia 4060D mintához viszonyítottam (20. ábra).



20. ábra Próbategek tömegaránya

## 4.4. Mechanikai vizsgálatok eredménye

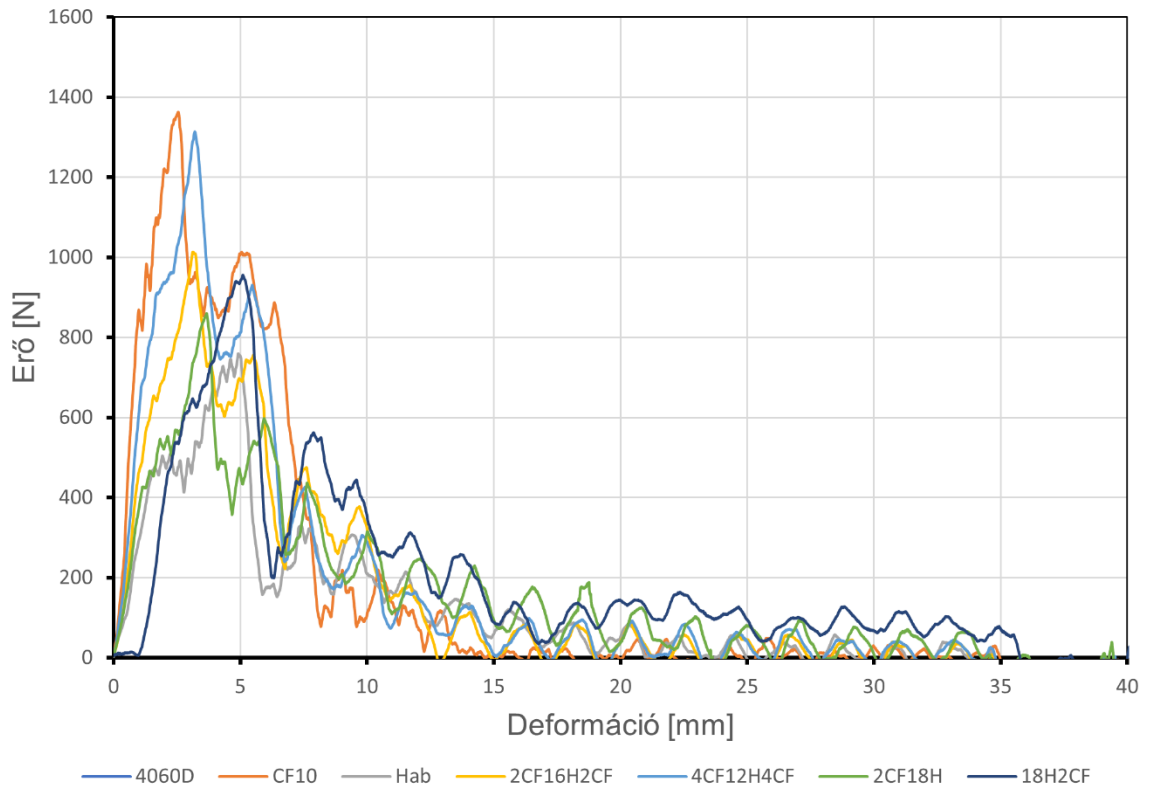
Ebben a fejezetben az általam elvégzett mechanikai vizsgálatok eredményeit ismertetem.

### 4.4.1. Ejtődárdás vizsgálatok

A mért penetrációs energiákat a 1. táblázat, a jellemző penetrációs görbéket a 21. ábra tartalmazza. Látható, hogy tömegre levetítve minden minta jobb eredményt mutatott, mint a kiinduló 4060D alapanyag. A legerősebb alapanyagnak a CF10 bizonyult, azonban a tömege és az eredményeinek szórása is ennek volt az egyik legnagyobb.

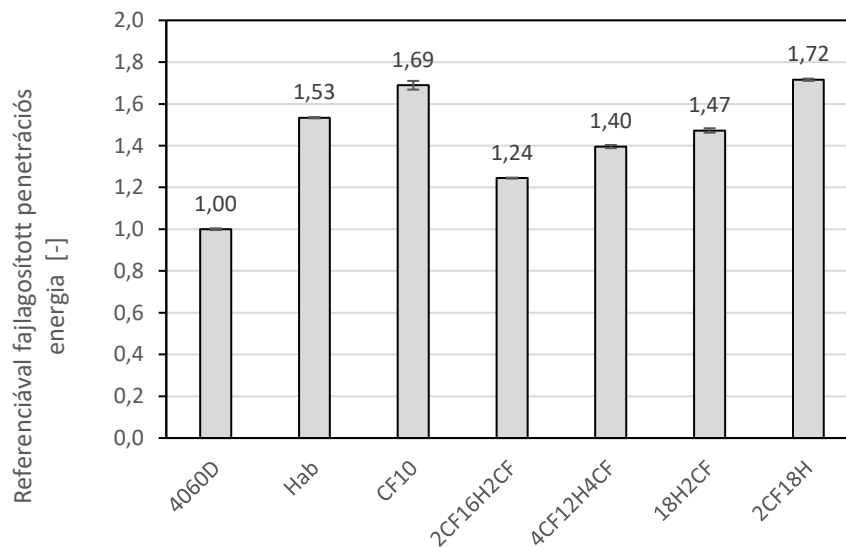
	Tömeg/darab [g]	Penetrációs e./vastagság [J/mm]	Szórás [-]
4060D	36,18	1,616	0,238
Hab	18,14	1,243	0,098
CF10	35,70	2,694	1,203
2CF16H2CF	22,98	1,278	0,095
4CF12H4CF	25,46	1,587	0,306
18H2CF	20,21	1,330	0,344
2CF18H	20,21	1,549	0,177

1. táblázat A jellemző penetrációs energiák



21. ábra Jellemző penetrációs görbék

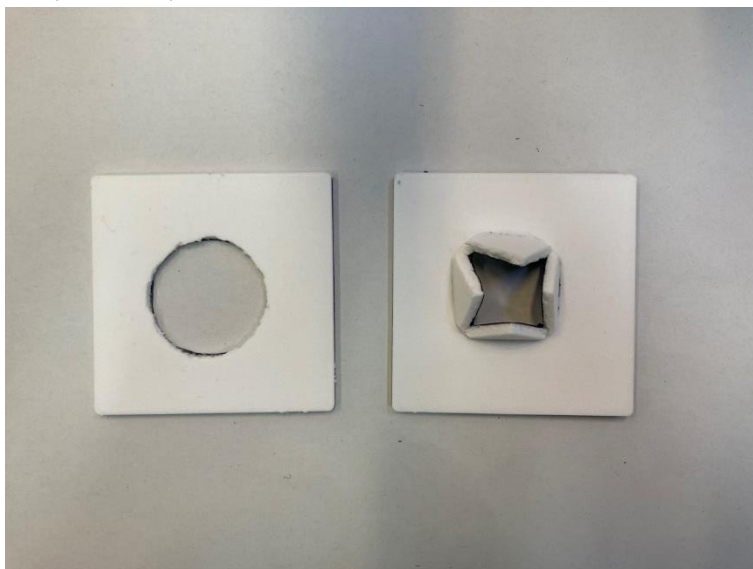
Ha a kapott perforációs energia értékeket elosztjuk az erősítetlen (4060D) minták perforációs energia értékével, akkor megkapjuk, hogy a vizsgált szerkezetek milyen mértékben javították vagy épp rontották az értékeket (22. ábra).



22. ábra A referencia PLA (4060D) eredményeire normált eredmények, fajlagos penetrációs energia

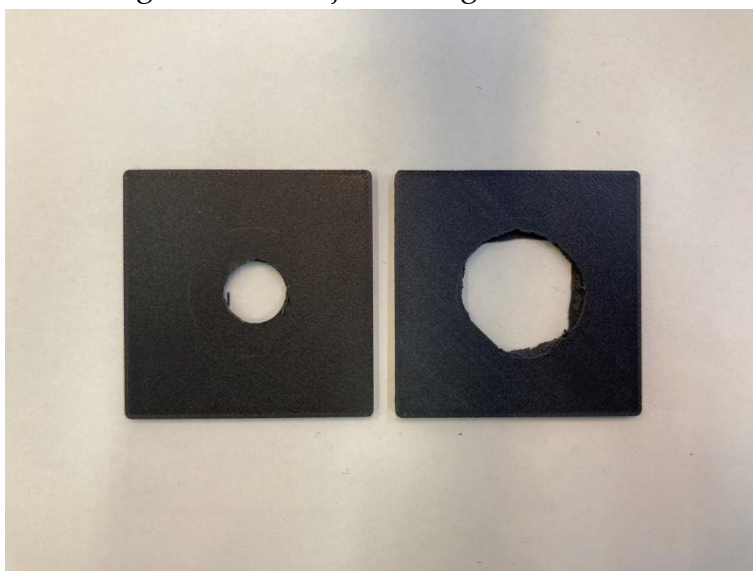
Az eredmények alapján a legjobb fajlagos energiaelnyeléssel a 2CF18H minta rendelkezett, ahol a legfelső két szén szálréteget kivéve csak habrétegek kerültek

alkalmazásra. Ezeknél a mintáknál előfordult, hogy a teljes átszakadást követően a szakadt részek nem váltak le teljesen a próbatestről, azok több réteggel továbbra is kapcsolódtak hozzá (23. ábra).



23. ábra 2CF18H minta tönkremeneteli formája

Hasonló energiaelnyeléssel, de más törési felülettel rendelkeztek a CF10 minták (24. ábra). A tönkremenetelt vizsgálva megállapítható, hogy a CF10 minták esetében az átszakadás minden esetben teljes volt, azonban a töretfelület nem a 2CF18H mintához a felületen nem mutatkoztak a megnyúlás jelei, hanem a rétegről rétegre való, a rétegek közötti rideg kitöredezés jelent meg.



24. ábra CF10 minta törése

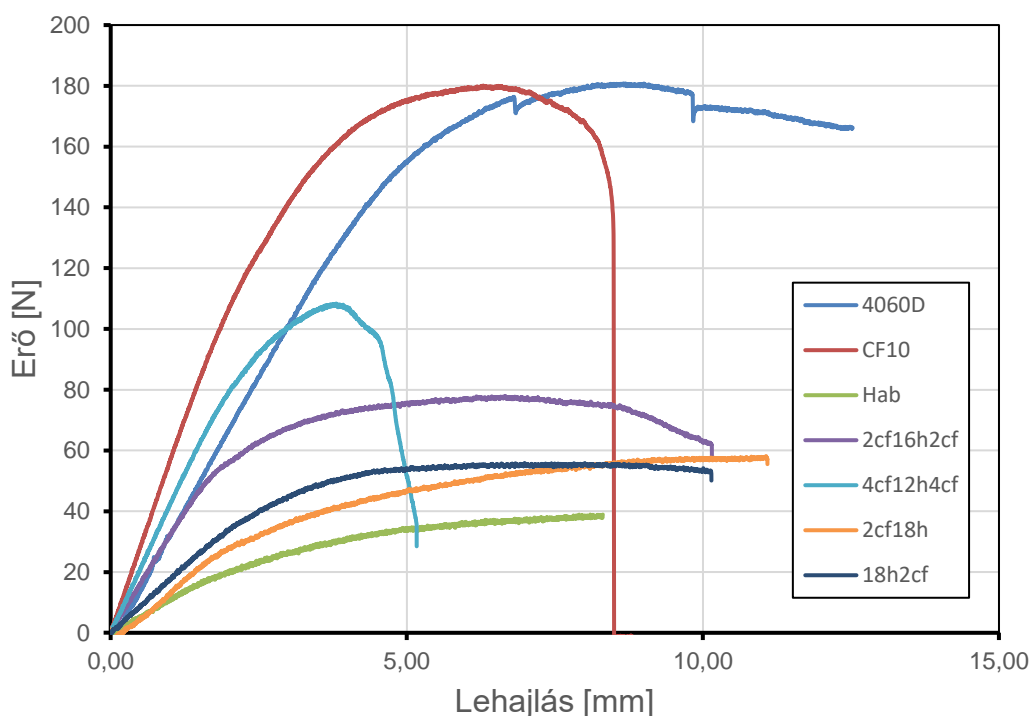
#### 4.4.2. Hajlítóvizsgálatok

A hajlítóvizsgálatokat tönkremenetelig vagy addig végeztük, amíg a hajlító feltét geometriája ezt ütközés nélkül lehetővé tette, azonban az eredmények kiértékelése a

szabványos mérési tartományon történt. A hajlítóvizsgálatok eredményeit a 2. táblázat tartalmazza, az egyes próbatetek reprezentatív hajlítógörbéit a 25. ábra tartalmazza.

	4060D	Hab	CF10	2cf16h2cf	4cf12h4cf	2cf18h	18h2cf
Tömegarány [-]	1,00	0,51	1,00	0,62	0,72	0,57	0,57
Határhajlító f. [Mpa]	70,07	15,29	64,92	31,63	46,16	23,05	23,11
Határhajlító f./tömeg	70,07	29,70	64,92	51,37	64,28	40,51	40,63
Hajlító modulus [MPa]	14,27	4,18	20,78	12,16	16,81	6,69	6,91

2. táblázat A hajlítóvizsgálatok eredményei



25. ábra A próbatetek általános hajlítógörbéi

A referencia minták közül a vizsgált tartományon egyik sem szenvedett katasztrofális tönkremenetet. A tisztán hab minták rendelkeztek a legkisebb hajlítószilárdsággal és tömegarányosan nézve sem volt számottevő a szilárdságuk. A CF10 minták hajlítószilárdsága nem tért el szignifikánsan a referenciaanyagétól, azonban a modulus 13,83 MPa-ról 20,15 MPa-ra növekedett átlagosan, ami körülbelül 45%-os erősítést jelent. A CF10 mintáknál több esetben is előfordult rideg törés, ahol jól elkülöníthető volt a keresztmetszet szívós és rideg törést szenvedett területe (26. ábra).



26. ábra A CF10 minták keresztmetszete

A szendvicsszerkezetek közül a 2cf16h2cf minták egyike sem ment tönkre a vizsgált tartományon (27. ábra), a terheléssel ellentétes, húzott oldalon láthatóak voltak a nyúlás jelei, azonban ez töréshez nem vezetett.



27. ábra A 2cf16h2cf minta húzott oldala

A 4cf12h4cf minták esetében már előfordult teljes tönkremenetel: ebben az esetben a húzott oldalon fellépő, a szénszálak réteget ért szakadás vezetett a tönkremenetelhez, ami a mérés folytatásával a habréteget is elérte (28. ábra). A 2cf16h2cf és 4cf12h4cf mintákat összehasonlítva láthatjuk, hogy bár az utóbbinál végbement a teljes tönkremenetel, azok hajlítószilárdsága 44,76 MPa volt, amely 46%-kal felülmúlja a 2cf16h2cf mintákat (30,67 MPa).

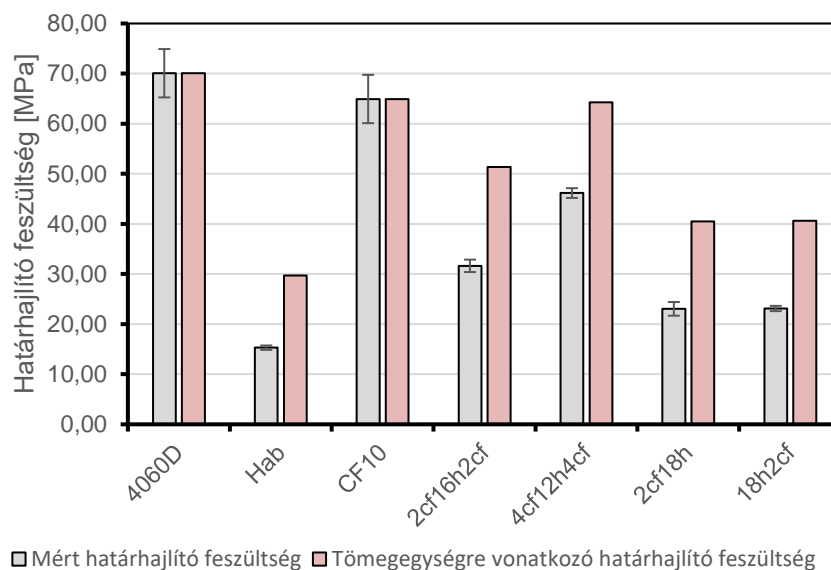


28. ábra A 4cf12h4cf minta tönkremenetele

A 2cf18h és 18h2cf minták esetében szignifikáns különbséget nem találtam, ami azt jelenti, hogy a hajlítás esetén ilyen mechanikai tulajdonságokkal és rétegszámokkal nem fontos, hogy milyen orientációval helyezzük be a mintákat a mérőberendezésbe.

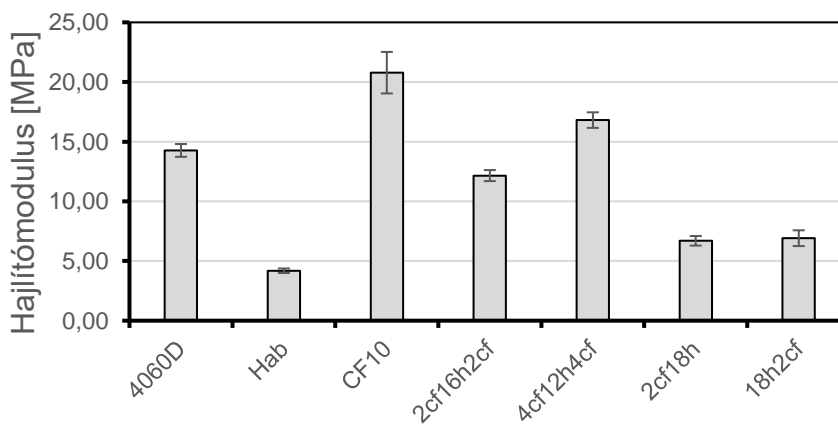
A minták határhajlító feszültségeire vonatkozó adatokat a 29. ábra tartalmazza. Látható, hogy ha a minták határhajlító feszültségét elosztjuk azok tömegarányával,

akkor nagyban megváltozik a diagram jellege. Tömegarányra levetítve a 4cf12h4cf minta megközelíti a 4060D és CF10 anyagok mechanikai tulajdonságait (62,33 MPa), de a minta tömege a referenciaminta tömegének csak a 72%-a.



29. ábra A minták határhajlító feszültsége

Amennyiben megvizsgáljuk a minták hajlítómódulusát láthatjuk, hogy a legnagyobb értékkel a CF10 minta rendelkezik, míg ettől némileg elmarad a 4cf12h4cf minta. A referencia, valamint a nagyobb habarányal rendelkező minták modulus értékei jelentősen elmaradtak ezekétől (30. ábra).



30. ábra A minták hajlítómódulusai

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt években a többkomponensű extrúzió alapú 3D nyomtatás nagy fejlődésen ment keresztül, ma már néhány száz dollártól vásárolhatók olyan berendezések, amik akár 16 színt vagy anyagot is képesek egy gyártáson belül felhasználni. Ezekkel a rendszerekkel helyes tervezési irányelveket követve megoldható az anyagok kombinálása.

Kutatásom célja, hogy a kereskedelmi forgalomban elérhető és az általam létrehozott alapanyagokkal kombinálva megvizsgáljam a több komponensű extrúzió alapú additív gyártásban rejlő lehetőségeket.

TDK dolgozatomban átfogó szakirodalomkutatást végeztem a 3D nyomtatható szendvicsszerkezetek területén. A habszerkezet alkalmazása növeli az energiaelnyelő képességet, amíg a szálerősített kompozit héj merevséget és szilárdságot biztosít; kevés kutatásban készítettek ilyen szendvicsszerkezeteket 1 lépésben. Céлом ennek megvalósítása volt, illetve az 1 lépésben gyártott kompozit szendvicsszerkezetek mechanikai jellemzőinek vizsgálata a rétegrend és a rétegvastagság függvényében.

Megvizsgáltam a piacon elérhető alapanyagokat és a dolgozatomhoz a piacon elérhető, a gyártási paraméterektől függően habosodó alapanyaggal és saját készítésű, 10 m% szénszálat tartalmazó alapanyaggal, valamint az FDM gyártástechnológia legújabb módszereit felhasználva egy fejjel rendelkező 3D nyomtatóval többkomponensű szendvicsszerkezeteket gyártottam. Referenciaanyagként a szénszálas alapanyag mátrixanyagát használtam fel (PLA 4060D), valamint megvizsgáltam a habszerkezet és a szénszálas alapanyag önálló tulajdonságait is. Az elkészült próbatesteket hajlító és ejtdárdás vizsgálatoknak tettem ki. Az eredmények alapján elmondható, hogy az FDM technológia alkalmas lehet könnyű, több komponensű szendvicsszerkezetek gyártására, az egyes alapanyagokat egymás mellett használva azok tulajdonságait a hagyományos kompozitokhoz hasonlóan kombinálhatjuk. Eredményeim alapján részben habosodó filamenttel gyártott modellek esetén akár 30%-os súlycsökkentést is elérhetünk úgy, hogy a fajlagos mechanikai tulajdonságok nem csökkennek számottevően. A többkomponensű extrúzió alapú 3D nyomtatással egyedi tervezésű, tömegcsökkentett energiaelnyelő szerkezetek hozhatók létre, amelyek egy lépésben gyárthatóak és újrahasznosíthatóak vagy lebomló, lebonthatók lehetnek.

A projekt folytatásaként meg szeretném vizsgálni az LW-PLA-ból készült egykomponensű szendvicsszerkezeteknek a lehetőségét, valamint doktori munkám részeként saját fejlesztésű, lebomló alapanyagokkal is szeretnék szendvicsszerkezeteket képezni. További irány lehet folytonos szálas kompozitokkal való társítás, amelyekkel növelhető a merevség és a szilárdság. A technológia lehetőségeinek a kiaknázásához szükség lehet a különböző komponensek rétegek közti kapcsolatának vizsgálatára és analitikus modellek, végeselemes szimulációk alkalmazására a 3D nyomtatott szerkezetek mechanikai jellemzőinek előrejelzésére.



## 6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. <https://www.aircraftsystemstech.com/2021/08/description-of-sandwich-structures.html> (2023.11.03.)
2. Victor Birman, George A. Kardomateas: Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B* 142, 221-240 (2018)
3. Quattroplast Kft.: Könnyebb kompaundok és szendvicsszerkezetek autóipari felhasználásra. *Műanyagipari szemle* 2018. 4. sz.
4. Zhenzu Wang, Yaohui Wang, Jian He, Ke Dong, Gouquan Zhang, Wenhao Li, Yi Xiong: Additive Manufacturing of Continuous Fiber-Reinforced Polymer Composite Sandwich Structures with Multiscale Cellular Cores. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers* 2 (2023)
5. Aneta Krzyzak, Michal Mazur, Mateusz Gajewski, Kaizmierz Drozd, Andrzej Komorek, Pawel Przybylek: Sandwich Structured Composites for Aeronautics: Methods of Manufacturing Affecting Some Mechanical Properties. *International Journal of Aerospace Engineering*, Volume 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7816912>
6. Axel Fink, Constantin Einzmann: Discrete tailored asymmetric sandwich structures. *Composited Structures* 238 (2020) 111990
7. Pengcheng Hu, Yuansheng Cheng, Pan Zhang, Jun Liu, Haifu Yang, Jianyong Chen: A metal/UHMWPE/SiC multi-layered composite armor against ballistic impact of flat-nosed projectile. *Ceramics International* 47 (2021) 22497-22513
8. Shaoyu Hou, Tiantian Li, Zian Jia, Lifeng Wang: Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact. *Materials and Design* 160 (2018) 1305-1321
9. Dileep Bonthu, H.S. Bharath, Suhasini Gururaja, Pavana Prabhakar, Mrityujay Doddamani: 3D printing of syntactic foam cored sandwich composite. *Composites Part C: Open Access* 3 (2020) 100068
10. Chun Lu, Mingxue Qi, Shafiul Islam, Ping Chen, Shuangsheng Gao, Yanrong Xu, Xiangdong Yang: Mechanical Performance of 3D-Printing Plastic Honeycomb Sandwich Structure. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* Vol. 5, No. 1., pp. 47-54 (2018)
11. H. Yazdani Sarvestani, A.H. Akbarzadeh, A. Mirbolghasemi, K. Hermenean: 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials and Design* 160 (2018) 179-193
12. Seung Ki Moon, Yu En Tan, Jihong Hwang, Yong-Jin Yoon: Application of 3D Printing Technology for Designing Light-weight Unmanned Aerial

Vehicle Wing Structures. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology Vol.1 No. 3, pp. 223-228 (2014)

13. <https://colorfabb.com/lw-pla-natural> (2023.11.03.)
14. <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-3d-printer-kit/> (2023.11.03)
15. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=27&l=m> (2023.11.03)
16. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=163&l=m> (2023.11.03)
17. [http://www.pt.bme.hu/segedletek/A2\\_hajl%C3%ADt%C3%A1s%202022.pdf](http://www.pt.bme.hu/segedletek/A2_hajl%C3%ADt%C3%A1s%202022.pdf) (2023.11.03)
18. [https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTNG11/segedletek/Dinamikus%20mechanikai%20tulajdons%C3%A1gok\\_seg%C3%A9dlet%20%C3%A9s%20jkv.pdf](https://www.att.bme.hu/neptuncode/BMEGEMTNG11/segedletek/Dinamikus%20mechanikai%20tulajdons%C3%A1gok_seg%C3%A9dlet%20%C3%A9s%20jkv.pdf) (2023.11.03)
19. Alcock, B.; Cabrera, N. O.; Barkoula, N. M.; Peijs, T.: Low velocity impact performance of recyclable all-polypropylene composites. *Composites Science and Technology*, 66, 1724-1737 (2006).
20. [https://www.youtube.com/watch?v=2tmgzwgi2UI&ab\\_channel=CNCKitchen](https://www.youtube.com/watch?v=2tmgzwgi2UI&ab_channel=CNCKitchen) (2023.11.03)