

EFFEKTÍV MECHANIKAI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA RÖGZÍTETT PARAMÉTEREKSEL NYOMTATOTT FDM STRUKTÚRÁKHOZ

DETERMINATION OF EFFECTIVE MECHANICAL PROPERTIES FOR FDM STRUCTURES PRINTED WITH FIXED PARAMETERS

Técsi Máté*, Nemes Dániel**

ABSTRACT

In engineering practice, one of the most important questions in design and analysis is how a given material will behave under different loads. This is predicted using material models, or effective mechanical properties. In reality, the physical properties of materials are extremely complex, and many factors – such as material structure, temperature, loading rate or pre-stressing – can affect their mechanical response. Choosing the right material model, or effective mechanical property is crucial during the engineering design process, as the accuracy of the model directly affects the reliability of simulations, the safety of structures, and the cost-effectiveness of manufacturing. In this research, we created a transversely isotropic effective material model for FDM 3D printed specimens with given technological and geometric parameters.

A mérnöki gyakorlatban, a tervezés és elemzés egyik legfontosabb kérdése, hogy egy adott anyag miként viselkedik különböző terhelések hatására. Ennek előrejelzése az anyagmodellek, vagy effektív mechanikai jellemzők segítségével valósul meg. A valóságban az anyagok fizikai tulajdonságai rendkívül összetettek, számos tényező – például az anyagszerkezet, a hőmérséklet, a terhelés sebessége vagy az előzetes igénybevétel – befolyásolhatja azok mechanikai válaszát. A megfelelő anyagmodell, vagy effektív mechanikai jellemző kiválasztása kulcsfontosságú a mérnöki tervezési folyamatok során, mivel a modell pontossága közvetlenül befolyásolja a szimulációk megbízhatóságát, a szerkezetek biztonságát, valamint a gyártás költséghatékonyságát. Jelen kutatásban FDM 3D nyomtatott próbatestek transzverzálisan izotróp effektív anyagmodellt határoztuk meg adott technológiai és geometriai paraméterek mellett.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt években az FDM 3D nyomtatási technológia alkalmazási köre jelentősen kibővült,

manapság az iparban és az orvostudományban is előszeretettel alkalmazzák főként gyors prototípus gyártásra. Azonban az ezzel az eljárással előállított tárgyak anyagtulajdonságai az irányfüggő tulajdonságok és a gyártási paraméterek (mint például a rétegvastagság, nyomtatási hőmérséklet vagy a nyomtatási sebesség) miatt jelentősen eltérnek egymástól. Ez hangsúlyozza annak fontosságát, hogy rögzített gyártási paraméterek mellett is elengedhetetlen a pontos és megbízható anyagmodell meghatározása, amely megalapozza a numerikus szimulációk és modellezések hitelességét.

Ezen cikk témája a szakdolgozatomat dolgozza fel, amely a Debreceni Egyetem Gépészmérnöki Tanszékéről származik, melyet a 3D nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata ihletett. A kutatómunka végső célja egy transzverzálisan izotróp effektív anyagmodell meghatározása volt, FDM 3D nyomtatási eljárás alkalmazásakor. Ezen felül a kutatás során tömeg, valamint geometriai pontosság mérés is sorra került, amely elősegíti a kapott eredmények megértését, valamint a mérési anomáliák elkerülését. A kutatásban cél volt szűkebb körű, de alapos vizsgálat volt. Ennek köszönhetően több limitáció volt szükséges, mely részletesen később lesz tárgyalva. A témában alapműnek számító [5-7] könyvek részletesen tárgyalják az anyagok különböző karakterizációs lehetőségeit, az azokhoz szükséges mérési elveket, valamint azok előnyeit és hátrányait. Ezekben megtalálható a kutatás alapjául szolgáló transzverzálisan izotróp anyagmodell általános Hook törvénye is, mely az alábbi formában néz ki.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{yz}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

* BSc hallgató, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

** tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék

2. EFFEKTÍV ANYAGMODELL MEGHATÁROZÁSA

2.1. Kísérletterv

A 1. táblázatban szereplő adatok definiálják a kísérlettervet. Ennek meghatározása során részben hasonló tanulmányok eredményei [1-3] is figyelembe lett véve. Továbbá kiemelten fontos volt az eredmények összehasonlíthatósága más nyomtatókkal, ezért a paramétereket úgy kellett meghatározni, hogy egy másik tanszéki FDM 3D nyomtatóval is reprodukálható legyen a próbatestek előállítása. Ez azért kulcsfontosságú, mert a Markforged Mark Two nyomtató zárt rendszerű szeletelőjének (Eiger) javasolt beállításait szerettük volna reprodukálni. Mivel a Cura szeletelőszoftver kiterjedt paraméterbeállításokat tesz lehetővé, így könnyen össze lehetett hangolni a szoftvereket.

A kutatásban három orientációban kerültek a próbatestek kinyomtatásra. A laposan nyomtatott próbatesteket XY irányú, az élén nyomtatottakat YZ, míg a függőleges irányban legyártott próbatesteket ZX irányú próbatesteknek lettek elnevezve. A próbatestek csak a nyomtatási irányokban térnek el egymástól, a többi paraméter kivétel nélkül megegyezik minden próbatestnél. A kísérletterv részleteit az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: Kísérletterv

Szabvány	ISO 527-2_1A		
Alapanyag	Ultimaker Nylon		
Próbatestek	XY (lapján)	YZ (élén)	ZX (állítva)
Darabszám	5	5	5
Húzási sebesség	50 mm/perc		
Nyomtatási paraméterek			
Rétegvastagság	0,1 mm		
Kitöltöttség	37%		
Nyomtatási hőmérséklet	250 °C		
Ágy hőmérséklete	40 °C		
Nyomtatási irány	XY	YZ	ZX
Nyomtatási sebesség	70 mm/s		
Kitöltés mintázata	Háromszög		
Fúvóka átmérő	0,4 mm		
Felhasznált eszközök			
Nyomtató	Ultimaker 3		
Mérleg	Ohaus Navigator NV622		
Mikrométer	Mitutoyo 0-25		
Vizsgáló gép	INSTRON 68TM-10 egytengetű anyagvizsgáló gép		
Kiértékelő szoftver	Bluehill Universal		
Nyúlásmérő	Ave 2		

2.2. Mérések és limitációk

A PA higroszkóp tulajdonsága miatt hajlamos felvenni a levegő páratartalmát és a molekulalánckokba beépülve ez rontja a szilárdságát. Ez a próbatestek eltérő gyártási időpontja, de azonos szakítóvizsgálat időpontja miatt a levegő expozíciója eltérő, ami nagy nedvességfelvétel esetén expozíció indukált eltéréseket okozhat a próbatesteken. A nedvességfelvétel mértékét egy gyakorlatban bevett egyszerűsített mérési eljárással, a tömegméréssel követtük nyomon.

Ezt követően, az egyes próbatestek szélessége és vastagsága lett lemerve. A mérések egyetlen alkalommal lettek elvégezve, és minden próbatest vastagsága és szélessége három helyen lett lemerve. Ezzel a méréssel a nyomtatási pontosság vizsgálata volt a cél.

Végezetül, a szakítóvizsgálati mérések elvégzése következtet, melynek körülményeit a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A szakítóvizsgálat körülményei

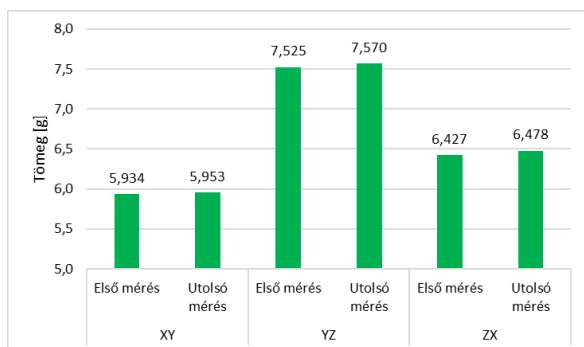
Vizsgáló gép	Instron 68TM-10
Vizsgálati mód	Húzó
Próbatest rögzítése	30 kN-os ékpályás szorítású befogó
Húzási sebesség	50 mm/perc
Adatrögzítési frekvencia	10 N és 0,01/mm
Nyúlásmérő	Ave 2
Kiértékelő szoftver	Bluehill Universal
Hőmérséklet	24±2 °C
Páratartalom	53 %

A kutatómunka témájának komplexitásából adódóan a mérések bizonyos korlátok között valósultak meg. Ugyanazon nyomtatási beállítások mellett történt a próbatestek nyomtatása, ugyanazon nyomtatóval, valamint csak szobahőmérsékleten történt a szakítóvizsgálat elvégzése. Ennek oka egyfelől, hogy a technológia jellemzően nagy szórásából adódóan a vizsgálat során a hangsúlyt inkább a mérések statisztikai kiértékelhetőségére lett helyezve, mintsem az átfogóbb, de szűrőpróbaszerű vizsgálatokra, másfelől cél volt, hogy első körben a fő jelenségeket azonosítsuk, ezzel még célzottabbá téve későbbi vizsgálatainkat. Továbbá, mivel a próbatestek gyártása jelentős időt vesz igénybe, így nem csak a nyomtatási paramétereket rögzítettük, hanem az elvégzett mechanikai vizsgálatokban is meg kellett hoznunk több kompromisszumot. Először is csak egytengelyű húzó vizsgálatokat végeztünk el, mely során csak a hosszirányú nyúlások voltak mérve. A keresztirányú nyúlásoknak a stabil mérését Aramis DIC (Digital Image Correlation) méréssel lehetett volna meghatározni. Ez hozzávetőlegesen tízszeresére növelte volna a méréselőkészítési, mérési és kiértékelési időt. A transzverzálisan izotróp modell teljes definiálásához 5 független paraméter szükséges (E_{xy} , E_z , ν_{xy} , ν_{xz} , G_z). Mivel a kutatás keretein belül a keresztirányú nyírási modulus (G_z) közvetlen mérésére (45°-os off-axis

húzóvizsgálat) nem volt lehetőség a korlátozott próbatetszám miatt, a nyírási paraméterek hiányában a felállított effektív modell tisztán tengelyirányú terhelési szimulációk esetén alkalmazható megbízhatóan. A teljeskörű térbeli feszültségállapotok (pl. csavarás, hajlítás) modellezéséhez elengedhetetlen a nyírási modulusok jövőbeli kísérleti meghatározása. Ahhoz, hogy egy végeselemes szoftverben ki lehessen alakítani egy olyan tesztszimulációt, mely egyfelől anyagmodell szinten transzverzálisan izotróp a hiányzó értékeket irodalmi adatokból próbáltuk közelíteni

2.3. Tömeg mérés eredményei

A kapott eredmények az 1. ábrán összességében azt mutatják, hogy a nyomtatást követően minimálisan nőtt a próbatetek tömege. Ezen értéknövekedések 0,01 és 0,04 gramm közötti növekedést jelentettek. Ezt a jelenséget az okozza, hogy a Nylon hajlamos nedvességet felvenni a levegőből, így a nyomtatási utáni vízfelvétel tömegnövekedést okozott. A próbatetek első és utolsó mérése között 185 és 290 óra közti idő telt el, ami egy és két hét közti időnek felel meg. Ez jól reprezentálja azt, hogy az alkatrész anyagparaméterei sokkal inkább relevánsak a nyomtatás után napokkal vagy hetekkel később, mint frissen nyomtatás után. Fontos megjegyezni, hogy a tömegnövekedés olyan csekély mértékű volt, hogy a szakirodalom alapján itt még nem jelentkezik érdemi szilárdságsökkenés.

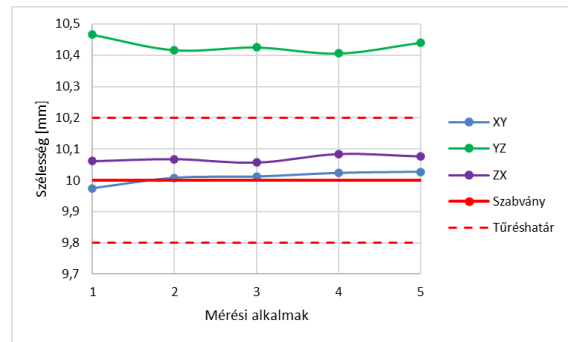


1. ábra: Próbatet tömegeinek átlaga

2.4. Geometriai pontosság mérés eredményei

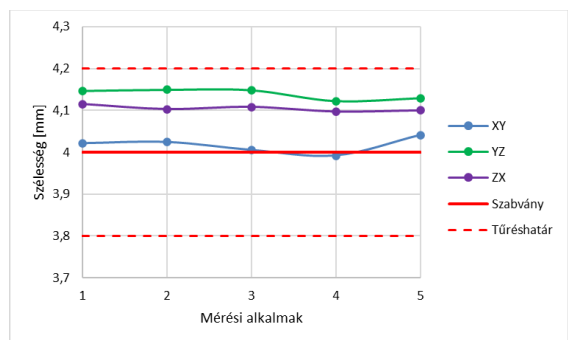
A 2. ábra a próbatetek szélesség, míg a 3. ábra a vastagság mérés eredményeit szemlélteti. A folytonos vonalak csak a tendencia szemléltetéséért szerepelnek a diagramokon. A diagramok nyomtatási irányként eltérő eredményeket mutatnak.

A 2. ábra alapján az YZ próbatetek rendelkeztek a legpontatlanabb nyomtatással. Ez a jelenség a támaszanyag maradványnak tudható be.



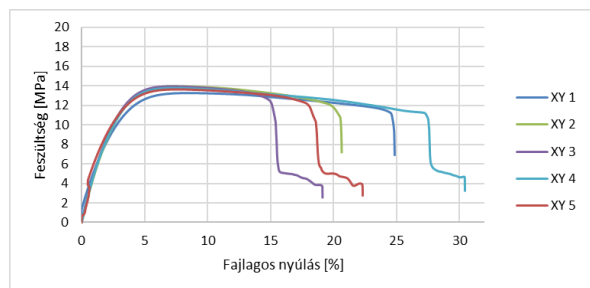
2. ábra: A próbatetek szélesség mérésének eredményei

A 3. ábrán látható vastagság mérés eredményeinek esetében is a legpontatlanabbnak az YZ próbatetek bizonyultak. Ennek oka, hogy a nyomtatófejnek nagy távokat kellett megtennie egyszerre, ami a rétegek minimális elmozdulását okozta, és ez rétegről-rétegre összeadódott.

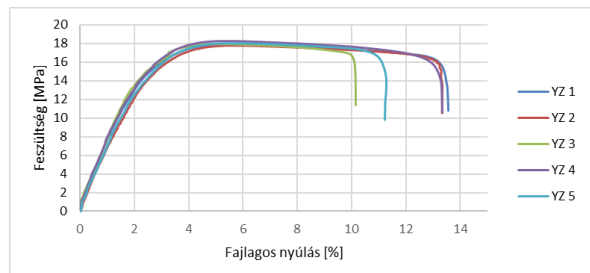


3. ábra: A próbatetek vastagság mérésének eredményei

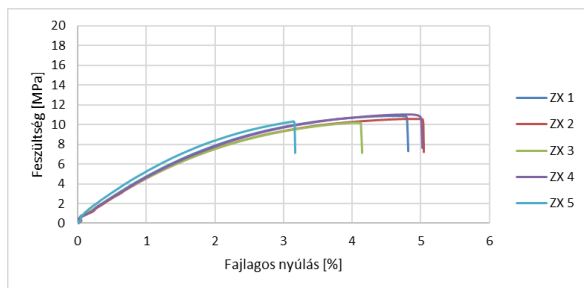
2.5. Szakítóvizsgálat eredményei



4. ábra: XY próbatetek feszültség-nyúlás diagramjai



5. ábra: YZ próbatetek feszültség-nyúlás diagramjai



6. ábra: ZX próbatestek feszültség-nyúlás diagramjai

A 4-6. ábrák alapján megállapítható, hogy a legnagyobb nyúlás értékeket a tönkremenetel előtt a XY irányú próbatestek érték el, a legkisebb nyúlási értékeket a ZX irányú próbatestek mutatták. A legnagyobb szakítószilárdság értékeket az YZ irányban nyomtatott próbatestek produkálták, míg a legkisebb értékeket ZX irányú próbatestek mutatták újfent.

2.6. Effektív anyagmodell definiálása

A lineárisan rugalmas anizotróp anyagmodellek definiálásához három különböző bemenő paraméterre van szükség. Ezek a Young-féle rugalmassági modulus, a Poisson-tényező, és a nyírási rugalmassági modulus.

Az FDM nyomtatási eljárás esetében a fűvóka a nyomtatás során az XY síkban mozog, így a rétegeken belül a szomszédos szálak között a kötés viszonylag egyenletesnek tekinthető. Ezzel a struktúra mechanikai válasza megegyezőnek feltételezhető az X és Y irányban. Ennek következtében meghatározható egy olyan transzverzálisan izotróp anyagmodell, ahol az X és Y irány izotróp anyagtulajdonságokat mutat, míg az Z irány pedig ezektől eltérő viselkedést.

A korábban elkészített feszültség-nyúlás diagramok alapján lehetett vonalillesztéssel meghatározni a Young-modulust. A diagramokon vizsgált, szabvány által előírt százalékos nyúlás tartományokra felvételre került egy lineáris trendvonal, amely egyenlet meredeksége adta meg a rugalmassági modulus. Itt fontos megjegyezni, hogy a szabvány által előírt nyúlási tartomány bizonyos esetekben zajjal terheltbbek, mint a későbbi szakaszok, így előállhat az, hogy a szabvány által definiált Young-modulus egyenese nagyobb nyúlási tartományokon, már jobban eltér a mért értékektől. Ezzel magyarázható, hogy az egymáshoz közel lévő diagramok miért produkálnak mégis nagy szórást a rugalmassági modulusok kiértékelésekor.

3. táblázat: A rugalmassági modulus kapott értékei

Próbatest száma	Young-modulus [MPa]		
	XY	YZ	ZX
1	442,8	813,24	436,39
2	525,8	775,15	331,1
3	572,3	724,98	397,75
4	556,7	716,61	350,68
5	149,8	752,72	592,54
Átlag	449,5	756,54	421,69
Szórás	174,8	39,26	103,96
Medián	525,8	752,72	397,75

A bemenő rugalmassági modulus értékek megadásakor az egyes irányok medián értékei lettek felhasználva, amelyekkel szimuláció a leghitelesebben adja vissza a mérési eredményeket.

A transzverzálisan izotróp effektív anyagmodellhez egy hosszirányú és egy keresztirányú rugalmassági modulus volt kimérve. A hosszirányú rugalmassági modulusként az YZ 5 próbatest, míg a keresztirányú rugalmassági modulusként az ZX 3 próbatest értékeit használtam fel. Azért a YZ irány rugalmassági modulus értékei lettek felhasználva, az XY irány rugalmassági modulus értéke helyett, mivel hogyha olyan alkatrészt akarunk nyomtatni, ahol az adott nyomtatási orientációban nagyobbak az oldalfal elemek felülete, mint a kezdő és záró rétegek felülete akkor ezt az YZ elrendezés jobban reprezentálja.

Általános esetben az XY irányú próbatestek rendelkeznek a legmagasabb rugalmassági modulus, azonban érdekes módon jelen esetben az YZ próbatestek magasabb értékekkel rendelkeznek. Ez az érdekes jelenség forrása a nyomtatási beállításokban rejlik. A falak számának kettő, és a vastagságuknak 0,8 mm lett beállítva. A felső és alsó rétegek számának négy, és ezek vastagságának 0,4 mm lett beállítva. Ezért az YZ próbatesteknél nagyobbak az oldalfal elemek felülete, mint az XY próbatesteknek. Mivel minkét esetben a húzási iránnyal megegyező irányban futnak a szálak, valamint mivel a falak viselik a terhelést ezért ez megmagyarázza, hogy miért lettek magasabbak az YZ próbatest rugalmassági modulus értékei. Ez is jól szemlélteti, hogy az FDM eljárással nyomtatott szerkezetek szilárdsága mennyire érzékeny a gyártási paraméterekre. Ez tovább indokolja azon törekvésünket, hogy a megszokott gyakorlattal szemben – mely szerint minden, az anyagmodellt leíró paramétert mérjünk ki – célravezetőbb elsőként a fő jelenségeket azonosítani és adott esetben a hiányzó paramétereket szükségszerűen irodalmi adatokból pótolni.

A Poisson-tényező meghatározása esetében, mért értékek hiányában, egy olyan korábbi tanulmány értéke lett felhasználva [4] ahol szintén FDM eljárással nyomtatott, PA6 alapanyagú próbatesteket alkalmaztak.

A hosszirányú nyírási rugalmassági modulus az egyszerűsített Hooke-törvénnyel meghatározható, így az nem független változó:

$$G_{xy} = \frac{E_{xy}}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

Mivel az XZ és YZ síkokban az anyag anizotróp, a G_z keresztirányú nyírási modulus független paraméter, így nem számítható ki az izotróp összefüggésből. Ennek mérése (45°-os próbatestekkel) a jövőbeli kutatások tárgyát képezi. A jelenlegi paraméterek tisztán tengelyirányú sík feszültségállapotok becslésére alkalmasak.

4. táblázat: Az effektív anyagmodellhez szükséges értékek

Megnevezés	Jelölés	Érték	Forrás/ megjegyzés
Síkbeli (hosszirányú) rugalmassági modulus [MPa]	E_{xy}	753	Saját mérés
Keresztirányú rugalmassági modulus [MPa]	E_z	398	Saját mérés
Síkbeli Poisson-tényező [-]	ν_{xy}	0,42	Irodalmi becslés [4] alapján
Keresztirányú Poisson-tényező [-]	ν_{xz}	-	További mérést igényel
Síkbeli (hosszirányú) nyírási modulus [MPa]	G_{xy}	265	Számított
Keresztirányú nyírási modulus [MPa]	G_z	-	További mérést igényel

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A szakdolgozat alapvető célja egy transzverzálisan izotróp effektív anyagmodell létrehozása, valamint az egyes nyomtatási irányok vizsgálata volt azonos nyomtatási paraméterek biztosítása mellett FDM 3D nyomtatási eljárás esetében.

A három különböző irányban nyomtatott próbatestek felhasználásával tömeg és geometriai pontosság vizsgálatra került sor. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a laposan nyomtatott próbatesteket lehet a legpontosabban reprodukálni, míg a legnehezebben a függőlegesen nyomtatott próbatesteket lehet.

A szakítóvizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a legnagyobb nyúlás értékeket a tönkremenetel előtt a XY irányú próbatestek érték el. A legkisebb nyúlási értékeket

a ZX irányú próbatestek mutatták, tehát ezek voltak a legtürekenyebbek.

A kutatómunka számos limitációval rendelkezik, melyek kiküszöbölése még pontosabb eredményeket tenne lehetővé ezen felül a kutatási lehetőségeket is jelentősen kibővítené.

A 3D nyomtatás és az anyagmodellezési eljárások egy sokrétű, komplex témakör. Az elvégzett kutatómunka egy nagyszerű alapot ad arra, hogy a mért eredményekre alapozva további vizsgálatokat lehessen elvégezni.

További lehetőségek közé tartozik például, hogy más alapanyagból is kielehetne nyomtatni a próbatesteket, ezáltal a használt anyagok mechanikai tulajdonságokra való hatását lehetne vizsgálni. További érdekes vizsgálati témakör lenne, ezeket a próbatesteket más technológiával működő nyomtatókkal is kinyomtatni a nyomtatási technológiák összehasonlítása érdekében. További fontos irány lenne a próbatestek számát és a vizsgált paraméterek bővítése egy teljes mértékben határozott, és saját mért adatokra támaszkodó transzverzálisan izotróp effektív anyagmodell létrehozásához.

4. SUMMARY

The primary objective of this thesis was to making a transversely isotropic material model and to investigate the effects of different printing directions while maintaining consistent printing parameters in the FDM 3D printing process.

Mass and geometric accuracy were tested using test specimens printed in three different orientations. The results show that flat-printed test specimens can be reproduced most accurately, while vertically printed test specimens are the most difficult to reproduce.

The tensile test results showed that the specimens oriented in the XY direction exhibited the highest elongation values prior to failure. The specimens oriented in the ZX direction exhibited the lowest elongation values, meaning they were the most brittle.

This research has several limitations; overcoming them would not only yield more accurate results but also significantly expand the scope of future research.

3D printing and material modeling techniques constitute a multifaceted and complex field. The research conducted provides an excellent foundation for further studies based on the measured results.

Other possibilities include, for example, printing the test specimens from different materials, thereby allowing the effect of the materials used on the mechanical properties to be investigated. Another interesting area of research would be to print these test specimens using printers that employ different technologies, in order to compare the various printing technologies. Another important direction would be to expand the number of test specimens and the parameters examined to create a fully deterministic and transversally isotropic effective material model based on our own measured data.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Nemes Dánielnek a szakdolgozat téma biztosításáért, a szakmai iránymutatásért és támogatásért, a hasznos tanácsokért.

Debreceni Attilának a témavezetésért és a szakmai támogatásért.

File Máténak a konzulensi tevékenységért és a szakmai támogatásért.

A Debreceni Egyetem Gépészmérnöki Tanszékének az alapanyag és a laboratóriumi berendezések biztosítását.

6. IRODALOM

- [1] J.-W. Kim, H. Kim, és J. Ko, „Effect of changing printing parameters on mechanical properties of printed PLA and Nylon 645”, *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, kötet. 14, sz. 4, o. JAMDSM0056–JAMDSM0056, 2020, doi: 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0056.
- [2] S. Terekhina, I. Skorniyakov, T. Tarasova, és S. Egorov, „Effects of the Infill Density on the Mechanical Properties of Nylon Specimens Made by Filament Fused Fabrication”, *Technologies*, kötet. 7, sz. 3, o. 57, aug. 2019, doi: 10.3390/technologies7030057.
- [3] A. Yankin és mtsai., „Optimization of Printing Parameters to Enhance Tensile Properties of ABS and Nylon Produced by Fused Filament Fabrication”, *Polymers*, kötet. 15, sz. 14, o. 3043, júl. 2023, doi: 10.3390/polym15143043.
- [4] Z. Eren, C. A. Burnett, D. Wright, és Z. Kazancı, „Compressive characterisation of 3D printed composite materials using continuous fibre fabrication”, *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, kötet. 6, sz. 4, o. 494–507, dec. 2023, doi: 10.1016/j.ijlmm.2023.05.002.
- [5] Bergstrom, J. (2015) *Mechanics of solid polymers: Theory and computational modeling*. Amsterdam: William Andrew is an imprint of Elsevier.
- [6] Fish, J. (2014) *Practical multiscale modeling*. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons Inc.
- [7] *Micromechanics of composite materials* (2012). Oxford: Elsevier Science & Technology.