



A technológiai paraméterek hatása PolyJet eljárással előállított próbatestek mechanikai tulajdonságaira

Effect of Technological Parameters on the Mechanical Properties of Test Specimens Produced by PolyJet Technology

Bognár Adrián,¹ Kun Krisztián,² Zsidai László³

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország, bognar.adrian@nje.hu

² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, Kecskemét, Magyarország.

³ Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Szent István Campus, Gépészeti Technológiák Központ, Anyagtudományi és Gépipari Folyamatok Tanszék, Gödöllő, Magyarország.

Abstract

The expansion of additive manufacturing technologies enables the rapid and efficient production of parts with complex geometries, making them increasingly important in the production of functional prototypes and finished products. To ensure the reliable performance of these parts, it is essential to optimize the printing parameters and analyze the material properties of the printed parts. In this study, the thermomechanical properties of 3D printed test specimens produced by PolyJet technology were analysed, with a particular focus on the glass transition temperature and the loss factor. The investigation concentrated on the influence of printing orientation and layer thickness, as these key parameters affect the mechanical behaviour of the finished parts.

Keywords: *additive manufacturing, PolyJet technology, thermomechanical properties, layer thickness.*

Összefoglalás

Az additív gyártási technológiák elterjedése lehetővé teszi a komplex geometriájú alkatrészek gyors és hatékony előállítását, így egyre nagyobb szerepet kap a funkcionális prototípusok és végeredmékek gyártásában. Az így gyártott alkatrészek megbízható alkalmazhatóságának biztosítása érdekében elengedhetetlen a nyomtatási paraméterek optimalizálása és a nyomtatott darabok anyagszerkezeti vizsgálata. A kutatásban PolyJet rendszerű 3D-s nyomtatással készült próbatestek termomechanikai tulajdonságainak elemzése történt, különös tekintettel az üvegesedési hőmérséklet és a veszteségi tényező alakulására. A vizsgálatok során a nyomtatási orientációra és a rétegvastagság hatására helyeződött a hangsúly, mivel ezek az alapvető paraméterek befolyásolják az elkészült alkatrészek mechanikai viselkedését.

Kulcsszavak: *additív gyártás, PolyJet eljárás, termomechanikai tulajdonságok, rétegvastagság.*

1. Bevezetés

A PolyJet technológia alkalmazásával készült próbatestek mechanikai tulajdonságai, mint a szakítószilárdság, szakadási nyúlás és rugalmassági modulus, jelentős mértékben függenek a nyomtatási orientációtól és rétegvastagságtól. A szakítóvizsgálatok alapján a nyomtatási irányok

és a rétegvastagság változása alapvetően befolyásolják a próbatestek mechanikai viselkedését. Eltérő orientációk esetén különböző eredmények figyelhetők meg a szakítószilárdság, rugalmassági modulus és szakadási nyúlás tekintetében. A nyomtatási orientáció emellett hatással van a keménységre és az üvegesedési hőmérsékletre is. A dinamikus termomechanikai analízis (DMTA)

vizsgálatok [1] során a komplex rugalmassági modulus és a veszteségi tényező értékei orientációfüggők. Ezen túlmenően, különböző anyagok között is kimutathatók mechanikai eltérések, amelyek a nyomtatási paraméterek függvényében módosulnak, elősegítve a specifikus alkalmazásokhoz szükséges tulajdonságok finomhangolását.

1.1. A nyomtatási orientáció hatása a mechanikai tulajdonságokra

A PolyJet eljárással készült próbatestek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata során a szerzők megállapították, hogy az anyag anizotrop viselkedést mutat. Vizsgálataik szerint egy síkon belüli orientációváltás esetén a rugalmassági modulusban nem jelentkezett szignifikáns eltérés, azonban eltérő építési síkokban a szakítószilárdság és a szakadási nyúlás jelentős különbségeket mutatott. Kimutatták, hogy az álló helyzetben nyomtatott próbatestek esetében a szakítószilárdság növekedett, míg a szakadási nyúlás csökkent, ezzel szemben a fekvő helyzetben készült próbatesteknél fordított tendencia volt megfigyelhető. A rétegvastagság változtatása a fekvő próbatestek esetében nem befolyásolta az eredményeket, míg az álló próbatesteknél hatással volt a mechanikai tulajdonságokra. Az építési iránnyal párhuzamos próbatesteknél a szakítószilárdság jelentősen csökkent a többi orientációhoz képest, ami megerősítette az anyag anizotrop jellegét [2].

Egy másik tanulmány hajlítóvizsgálattal hasonló következtetésre jutott, ahol különböző nyomtatási orientációkban készült próbatesteket hasonlítottak össze. A vizsgálatok során megállapították, hogy az Y irányban gyártott próbatestek rendelkeznek a legnagyobb hajlítószilárdsággal, míg a merev anyagok esetében a legkisebb értéket a Z, a rugalmasabb anyagoknál pedig az X irányú próbatestek mutatták. A hajlító rugalmassági modulus vizsgálata során az Y orientáció kedvezőbb eredményeket mutatott az X irányhoz képest, míg a Z irányban a modulus csökkenése figyelhető meg az anyag növekvő rugalmasságával [3].

1.2. A nyomtatási orientáció és rétegvastagság hatása az üvegesedési hőmérsékletre

A kutatások célja a PolyJet technológiával nyomtatott próbadarabok viszkoelasztikus és termomechanikai tulajdonságainak vizsgálata volt különböző nyomtatási paraméterek mellett. Az első kísérletben a kutatók a rétegvastagság és a nyomtatási orientáció hatását vizsgálták az üve-

gesedési hőmérsékletre. A vizsgálatok alapján az X orientációban volt a legmagasabb, Y orientációban pedig a legalacsonyabb, mintegy 20 °C különbséggel. A nagyobb rétegvastagságú nyomtatás nagyobb üvegesedési hőmérsékletet eredményezett [4].

1.3. Az anyagminőség és a nyomtatási orientáció hatása a komplex rugalmassági modulusra és a veszteségi tényezőre

Jelen kutatásban a PolyJet technológiával készült próbatestek komplex rugalmassági modulusának változását vizsgálták a síkon belüli orientáció és a vizsgálati konfiguráció függvényében. Az eredmények szerint a vízszintes és függőleges nyomtatás között nem volt lényeges különbség, azonban a húzóvizsgálat nagyobb dinamikus-modulus-értékeket mutatott, míg a hajlítóvizsgálatnál nagyobb veszteségi tényezőt mértek. Megvizsgálták továbbá anyagok komplex modulusát és veszteségi tényezőjét is. A merevebb anyagok rugalmassági modulusának értéke három nagyságrenddel változott a frekvencia növekedésével, míg a rugalmasabb anyagok esetében ez a változás csak négyszeres volt [5, 6].

A feldolgozott irodalmi források alapján meghatározhatók azok a paraméterek, amelyek hatással vannak a gyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságaira. A vizsgálatok egyértelműen rámutattak, hogy a különböző nyomtatási orientációk és a rétegvastagság befolyásolják a próbatestek mechanikai jellemzőit, emellett az alkalmazott anyagminőség is kulcsszerepet játszik a kapott eredményekben.

2. A kísérlet módszertana

Jelen kutatásban a cél a PolyJet eljárással nyomtatott próbatestek üvegesedési hőmérsékletének vizsgálata, különböző rétegvastagságok és nyomtatási orientációk figyelembevételével. A kísérlet során az anyagminőség változatlan, ennek hatását a cikk nem vizsgálja.

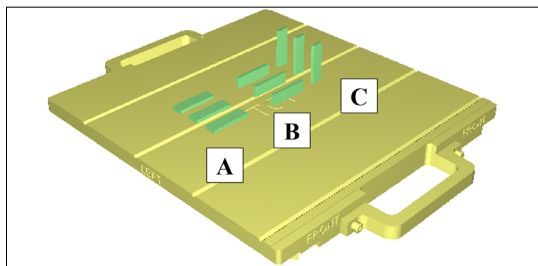
2.1. A vizsgálati próbatestek

A próbatestek három különböző orientációt vettek fel: XYZ (A), XZY fekvő (B), valamint ZXY (C) építési irányt (1. ábra).

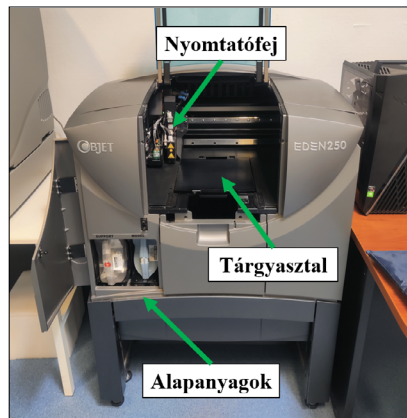
Az anyagvizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a nyomtatási orientáció is hatással volt a mechanikai tulajdonságokra, azonban a síkon belüli további elrendezések hatása elhanyagolható. A próbatestek csoportosítása és elnevezése az 1. táblázatban látható. A rétegvastagság a nyomtatási sebességgel párhuzamban változtatható,

1. táblázat. A próbatetek csoportosítása és elnevezésük

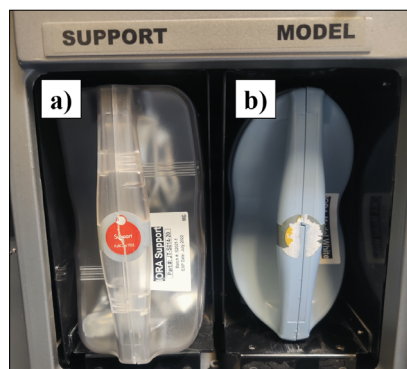
Orientáció	Nagy sebesség (HS)	Kiváló minőség (HQ)
XYZ (A)	HSA	HQA
XZY (B)	HSB	HQB
ZXY (C)	HSC	HQC



1. ábra. A próbatetek elrendezése az Objet Studio szeletelő szoftverben



2. ábra. Objet Eden 250 PolyJet 3D nyomtató



3. ábra. Az alapanyagok a PolyJet nyomtatóban: a) támaszanyag és b) modellanyag

így a választott üzemmód a nagy sebesség (HS), valamint a kiváló minőség (HQ) volt.

A DMTA-vizsgálatokhoz hasáb alakú próbatestre van szükség, ennek méretét az általunk használt mérőfelfűtőhöz választottuk meg. A meghatározott méret ezek alapján 35×10×3 mm. A próbatetek modellezése és STL-fájlformátumba való exportálása Autodesk Fusion 360 szoftverrel történt.

2.2. A PolyJet rendszerű 3D-s nyomtató

A próbateteket Stratasys Eden 250 típusú PolyJet 3D nyomtatón (2. ábra) gyártottuk. A kutatásban használt 3D-s nyomtató két eltérő tulajdonságú alapanyagot tud kezelni, esetünkben egy modellt, valamint egy támaszt. A nyomtató tárgyasztala 250×250 mm, Z irányban 200 mm a legnagyobb használható nyomtatási méret. Felbontása az X tengely mentén 600 dpi, az Y tengely mentén 300 dpi, a Z tengely mentén pedig 1600 dpi [7].

2.3. A felhasznált anyagok

A nyomtatás alapanyaga IORA Support 705 támaszanyag, valamint IORA Model White RGD835 modellanyag (3. ábra) [8, 9].

Az IORA Support 705 támaszanyag kiváló stabilitást biztosít annak érdekében, hogy a modellek megőrizze formájukat és integritásukat a teljes nyomtatás alatt. A támaszanyag segítségével könnyedén készíthetünk bonyolult és összetett testeket. A nyomtatás befejezését követően vízsugár segítségével könnyedén eltávolítható a nyomtatott alkatrészről, így tiszta és hibátlan végeredményt biztosítva [8].

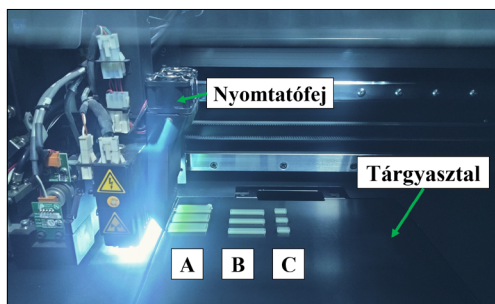
Az IORA Model RGD835 anyagok sokoldalú és megbízható 3D-s nyomtatási alapanyagok, amelyek a PolyJet fotopolimerek családjába tartoznak, és széles körben alkalmazhatók különböző iparágakban. Nagy opacitással és szakítószilárdsággal rendelkeznek, így ideálisak olyan modellek készítésére, amelyek finom részleteket igényelnek, mint például a különféle burkolatok, rögzítők és prototípusok. A PolyJet eljárás nagy felbontása biztosítja, hogy a nyomtatott alkatrészek rendkívül pontosak és kiváló felületi minőségűek, ami különösen fontos a végfelhasználói termékek és a precíziós alkatrészek előállításakor. A modellanyag legfontosabb tulajdonságait a 2. táblázat összegzi [9].

2.4. Próbatelemek gyártása

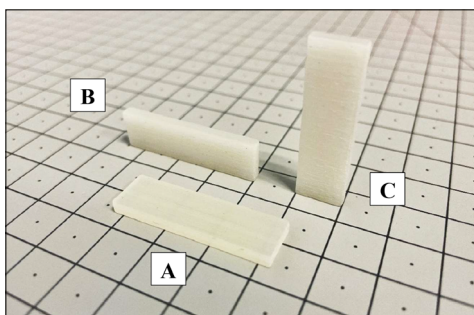
A kiváló minőségű (HS) módban nyomtatott próbatetek esetében a rétegvastagság 16 µm. A próbateteket minden irányból támaszanyag vette körbe. A nyomtatási idő 4 óra 40 perc volt.

2. táblázat. IORA Model White RGD835 modellanyag mechanikai tulajdonságai [1]

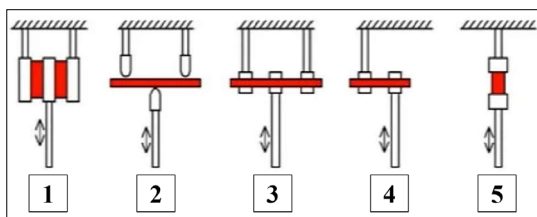
Megnevezés	Érték	Szabvány
Young-modulus	2000–3000 MPa	ASTM D638
Szakitószilárdság	50–65 MPa	ASTM D638
Szakadási nyúlás	13–24%	ASTM D638
Izod-féle ütőszilárdság bemetszett, A 23 °C)	20–30 J/mm ²	ASTM D256
Hajlítószilárdság	75–110 MPa	ASTM D790
Hajlítási modulus	2200–3200 MPa	ASTM D790
Behajlási hőmérséklet (HDT) @ 0,45 MPa	46–51 °C	ASTM D648
Behajlási hőmérséklet (HDT) @ 1,82 MPa	46–51 °C	ASTM D648
Üvegesedési hőmér- séklet (Tg)	52–54 °C	ASTM D4065



4. ábra. Objet Eden 250 a nyomtatási folyamat közben



5. ábra. Az elkészült próbatetek tisztítás után



6. ábra. DMTA-vizsgálati módok: 1. nyírás; 2. hárompontos hajlítás; 3. kétoldali megfogás; 4. egyoldali megfogás; 5. húzás/összenyomás [10]

A kiváló minőségű (HQ) üzemmód esetén a rétegvastagság 29 μm , így a program a teljes nyomtatást 1215 rétegre bontotta, melynek gyártása 2 óra 40 percet vett igénybe (**4. ábra**).

Az elkészült próbatetek könnyedén eltávolíthatók a tárgyasztalról egy célszerszám segítségével, majd az ezeket körülvevő támaszanyag vízcsap alatt leoldható. A legyártott próbatetek az **5. ábrán** láthatók.

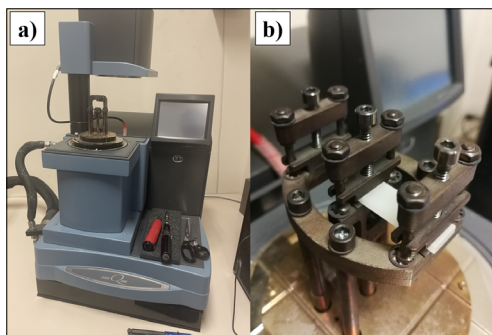
A nyomtatást követően a PolyJet eljárás esetében nincs szükség a próbatetek utólagos levilágítására, szemben a hagyományos fotopolimerizációs eljárásokkal.

3. Vizsgálati módszer

A műanyag alkatrészek gyakran vannak dinamikus igénybevételeknek kitéve. Ezért fontos, hogy megismerjük a viselkedésüket periodikus ismétlődő terhelés esetén is. A DMTA-vizsgálatok során a próbatestre ható feszültséget és annak frekvenciáját állandó értéken tartjuk. A hőmérsékletet meghatározott módon változtatjuk, és mérjük a kialakuló deformációt. Ezek alapján a nyomtatott termék anyagának mechanikai jellemzői meghatározhatók. Az anyagvizsgálat TA DMTA Q800-as berendezésen, egyoldali megfogással történt (**6. ábra**)/4) [1, 10].

A próbatestet, melynek mérete 35×10×3 mm, két csavaros megfogóban rögzítettük ~1 Nm nyomatékkal (**7. ábra**). A munkadarab két rögzítése közötti távolság 17,2 mm.

A DMTA-mérés során a próbatest egyik vége rögzített helyzetben van, míg a másikat különböző frekvenciákon állandó amplitúdóval rezgetjük, eközben a hőmérsékletet lépcsőzetesen emeljük. A vizsgálat megkezdése előtt próbamérések segítségével határoztuk meg a kísérlethez legalkalmasabb beállítási paraméterek (amplitúdó, frekvenciatartomány, hőmérséklet-tartomány).



7. ábra. Vizsgálóberendezés: a) TA DMTA Q800 b) rögzített próbatest

Esetünkben az ideális rezgetési amplitúdó $10\ \mu\text{m}$. A hőmérsékleti tartomány $40\text{--}90\ ^\circ\text{C}$, a melegítés $2\ ^\circ\text{C}$ -os lépésekben történt, 1 perces hűn tartással. A próbatest minden egyes hőmérsékleten, 11 frekvencián rezgett $1\text{--}21\ \text{Hz}$ között, lineáris $2\ \text{Hz}$ -es lépésekben.

4. Eredmények

A hat különféle próbatestet (A, B, C, valamint HS és HQ üzemmód) egyesével megmértük a fentiekben leírtaknak megfelelően. Jelen kutatás az üvegesedési hőmérsékletre és a veszteségi tényezőre koncentrált, így elsősorban ezeket az adatokat ábráztuk.

4.1. Az üvegesedési hőmérséklet frekvenciafüggése

A mérési adatok alapján minden egyes frekvenciánál meg kell keresni a maximális $\tan(\delta)$ értéket és az ahhoz tartozó hőmérsékletet. Ezeket a hőmérsékleti értékeket táblázatban rögzítettem minden próbatest és frekvencia esetén, majd azokat frekvenciánként átlagoltam a három különböző orientációjú próbatestre. Az analízist mindkét nyomtatási üzemmód (HS és HQ) esetében el kellett végezni. Az eredmények a 8. ábrán láthatók.

A diagramon megfigyelhető, hogy az üvegesedési hőmérséklet (T_g) a gerjesztési frekvencia függvényében változik. A frekvencia növekedésével az anyag üvegesedési hőmérséklete emelkedett, ami mindkét nyomtatási üzemmódnál észlelhető volt, akár nagy sebesség (HS), akár kiváló minőség (HQ) esetén. Továbbá, a nagy sebességgel gyártott próbatestek üvegesedési hőmérséklete körülbelül $2\ ^\circ\text{C}$ -kal nagyobb, mint a növelt minőségű próbatesteké.

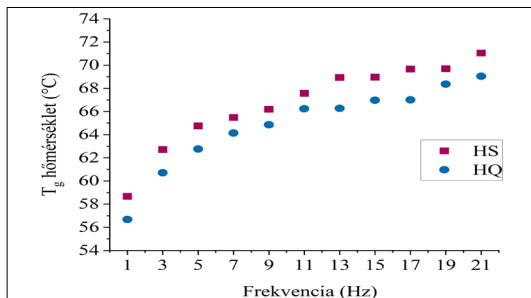
4.2. A nyomtatási irányok hatása az üvegesedési hőmérsékletre

A mérési adatokból kirajzolható az egyes próbadarabok $\tan(\delta)$ görbéje az $1\ \text{Hz}$ -es frekvenciához. A 9. és a 10. ábrán látható, hogy mindkét üzemmód esetén kismértékben, de eltérnek a $\tan(\delta)$ csúcsok a különböző építési irányú próbatesteknél, ezzel az üvegesedési hőmérsékletek is eltolódnak. Legkisebb értékek nagy sebességű nyomtatás esetén az A építési irányú próbatestnél tapasztalhatók, a legnagyobbak pedig C irányú próbatesteknél.

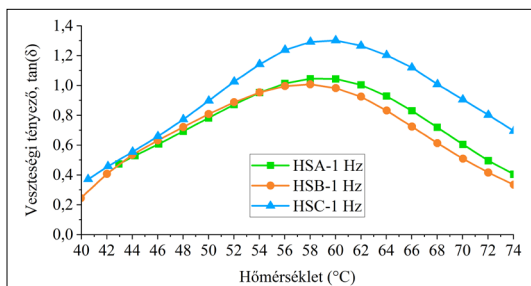
A kiváló minőségű (HQ) üzemmód esetén ezzel ellentétes hatás tapasztalható, azaz az A jelű próbatest mutatja a legnagyobb T_g hőmérsékletet, míg a B és C próbatestek a kisebb értékeket (10. ábra).

4.3. A nyomtatási minőség hatása az üvegesedési hőmérsékletre

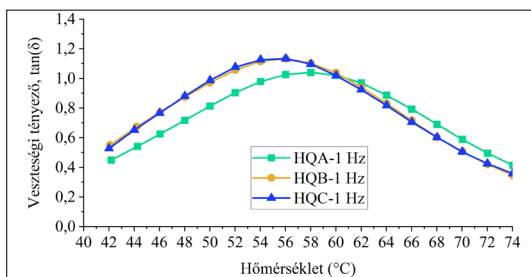
A nyomtatási üzemmódok hatását vizsgálva az üvegesedési hőmérsékletből az olvasható le, hogy az „A” jelű próbatest esetében nincs hatása a nyomtatási üzemmódnak (11. ábra).



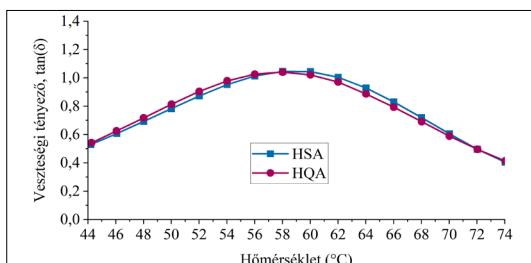
8. ábra. Az üvegesedési hőmérséklet frekvenciafüggése



9. ábra. A veszteségi tényező változása a hőmérséklet függvényében, HS üzemmódban



10. ábra. A veszteségi tényező változása a hőmérséklet függvényében, HQ üzemmódban



11. ábra. A veszteségi tényező alakulása $1\ \text{Hz}$ frekvencián: „A” jelű próbatest

Ugyanakkor a „B” jelű próbatestnél már látható eltérés a két üzemmód között. A kiváló minőségű (HQ) próbatest Tg hőmérséklete 2 °C fokkal kisebb (12. ábra).

Hasonló, de valamivel nagyobb eltérés látható a „C” jelű próbatest esetében, ahol 4 °C-kal nagyobb Tg hőmérséklet jellemzi a kiváló minőségű (HQ) üzemmódban nyomtatott próbatestet (13. ábra).

Az értékekben a fenti tendencia a kisebb, illetve a nagyobb frekvenciákon is látható.

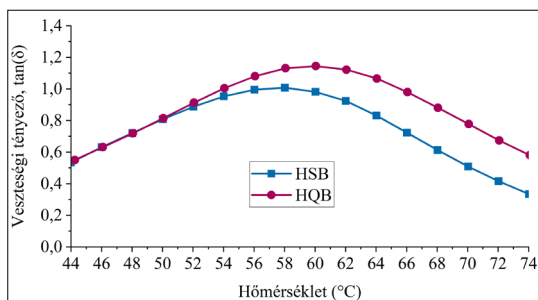
4.4. Nyomatatási üzemmód és építési irányok hatása a veszteségi tényezőre

A hőmérséklet-veszteségi tényező diagramokból látható, hogy a $\tan(\delta)$ görbék nemcsak a hőmérsékleti tengely mentén, hanem maximális értékeikben is eltérnek egymástól. A veszteségi tényező az elvesztett és a rugalmasan tárolt energiának a hányadosa. Az alábbi diagramokról leolvasható, hogy a $\tan(\delta)$ csúcserkéi között az építési irány és nyomatatási üzemmódok függvényében egyaránt különbség van (14. és 15. ábra).

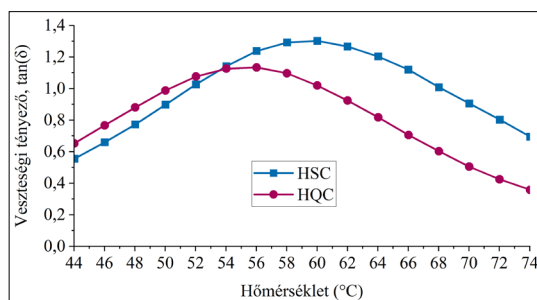
A „C” jelű próbatestek bírnak a legnagyobb $\tan(\delta)$ csúcserkéekkel (legkevésbé rugalmas),

míg az „A” jelűek a legkisebbel (legrugalmasabb). A $\tan(\delta)$ csúcserkéit a frekvencia befolyásolja. A nyomatatási üzemmódokat összevetve az látható, hogy a kiváló minőségű (HQ) próbatestek értékeinek kisebb a szórása. A mérések alapján megállapítható, hogy a nyomatatási orientáció és a rétegvastagság kihat a próbatestek termomechanikai tulajdonságaira.

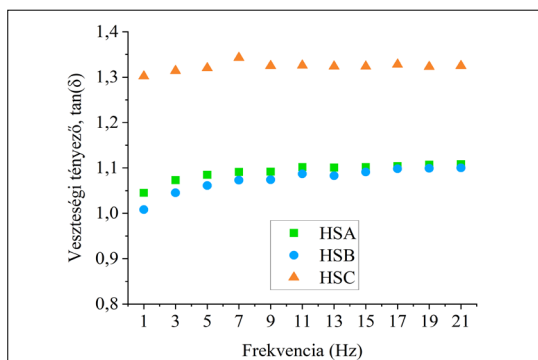
A vizsgálati frekvencia hatására az üvegesedési hőmérséklet eltolódik a nagyobb hőmérsékletek irányába. A nyomatatási orientáció hatása kismértékben, de befolyásolja az üvegesedési hőmérsékletet, azonban nem látható tendencia az eredményekben. A nyomatatási üzemmódok összehasonlítása során az „A” jelű próbatestek kivételével az látható, hogy a kiváló minőségű (HQ) próbatestek esetében kisebb volt az üvegesedési hőmérséklet. A veszteségi tényezők csúcserkéit vizsgálva megfigyelhető, hogy a legkisebb értékek az „A”, a legnagyobbak pedig a „C” jelű próbatestek esetén tapasztalhatók. A kapott eredmények alapján kimondható, hogy a termékek anizotrop tulajdonságokkal bírnak.



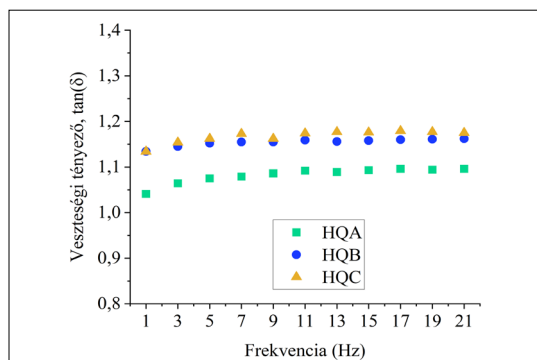
12. ábra. A veszteségi tényező alakulása Hz frekvencián: „B” jelű próbatest



13. ábra. A veszteségi tényező eloszlása 1 Hz frekvencián: „C” jelű próbatest



14. ábra. Maximális veszteségi tényező értékek a HS üzemmódban nyomtatott próbatesteknél



15. ábra. Maximális veszteségi tényező értékek a HQ üzemmódban nyomtatott próbatesteknél

5. Következtetések

A kutatás a PolyJet 3D nyomtatási eljárással készült próbatestek mechanikai tulajdonságait vizsgálta, különös figyelmet fordítva a nyomtatási orientációra és a rétegvastagság hatására. A vizsgálatok során megállapították, hogy az orientáció és a rétegvastagság jelentős hatással van az üvegesedési hőmérsékletre és a veszteségi tényezőre, amelyek az anyag mechanikai viselkedését befolyásolják. A kiváló sebességgel (HQ) készült próbatesteknél magasabb üvegesedési hőmérsékletet figyeltek meg. A kutatás hozzájárulhat a gyártási paraméterek finomhangolásához, lehetővé téve a PolyJet technológia szélesebb körű ipari alkalmazását.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] ISO 14692-1:2018. (letöltve: 2025. március 13.)
<https://www.iso.org/standard/62256.html>
- [2] Ficzer Péter: *Gyors prototípus numerikus és kísérleti szilárdsági analízise* (letöltve: 2025. március 13.)
<https://repozitorium.omikk.bme.hu/items/a8911f7c-6529-465d-b544-0f50cd7db8cb>
- [3] Sanders, J., Wei, X. & Pei, Z.: *Experimental investigation of polyjet 3D printing process: Effects of orientation and layer thickness on thermal glass transition temperature*. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 59377. (2019) V02AT02A064.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11999>
- [4] Márk, P. & Sándor, M.: *3D nyomtatási anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározása különböző nyomtatási irányokban*. Biomechanica Hungarica, 11/1. (2018)
- [5] Liu, M. L., Reichl, K. K. & Inman, D. J.: *Complex modulus variation by manipulation of mechanical test method and print direction*. In: Mechanics of Additive and Advanced Manufacturing: Proceedings of the 2017 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Springer International Publishing, 9. (2017) 5–11.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-62834-9_2
- [6] Reichl, K. K. & Inman, D. J.: *Dynamic mechanical and thermal analyses of Objet Connex 3D printed materials*. Experimental Techniques, 42/1. (2018) 19–25.
<https://doi.org/10.1007/s40799-017-0223-0>
- [7] Falk György: PolyJet a Rapid Prototyping új dimenziója (letöltve: 2025. március 13.)
<http://www.sasovits.hu/cnc/irodalom/3d/PolyJet.pdf>
- [8] Stratasys Eden250 3D Printer Support. (letöltve: 2025. március 13.)
<https://support.stratasys.com/en/printers/polyjet-legacy/eden250>
- [9] iSQUARED Stratasys Refill – IORA Model White – 1kg (letöltve: 2025. március 13.)
<https://www.am-material-marketplace.com/product/iora-model-white-1-kg/>
- [10] Polimerek dinamikus mechanikai vizsgálata (DMTA) (letöltve: 2025. március 13.)
<https://docplayer.hu/93271637-3-polimerek-dinamikus-mechanikai-vizsgalata-dmta.html>
- [11] Dr. Molnár Kolos: Anyagismereti alapok (letöltve: 2025. március 13.)
http://www.pt.bme.hu/futotargyak/97_BMEGEPTBM01_2021oszi/M0T0-Anyagismere-ti%20alapok%20101.pdf
- [12] Singh, R.: Process capability study of polyjet printing for plastic components. Journal of Mechanical Science and Technology, 25. (2011) 1011–1015.
<https://doi.org/10.1007/s12206-011-0203-8>
- [13] Mueller, J., Shea, K. & Daraio, C.: *Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design*. Materials & Design, 86. (2015) 902–912.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.129>