

Sebészeti célokra alkalmazott 3D nyomtató anyagok mechanikai jellemzőinek vizsgálata és az eredmények alapján open access adatbázis létrehozása

Investigation of the mechanical properties of 3D printing materials for surgical applications and creation of an open access database based on the results

MANÓ Sándor PhD¹, LE Cuong Phong², CSÁMER Loránd MSc³

¹Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.

²Debreceni Egyetem Általános Orvostudományi Kar, 4032 Debrecen, Nagyerdei krt. 98.

³Debreceni Egyetem Innovációs Ökoszisztéma Központ, Biomechanikai Laboratórium
manos@unideb.hu

Abstract

The aim of the research presented in this paper was to investigate the mechanical properties (tensile, flexural, and compressive strength) of sterilized and non-sterilized plastics produced using different printing technologies, and to create a freely accessible, expandable online database based on the measured data.

During the investigations, two 3D printing technologies were used: the most common extrusion-based FDM and a resin-based method known as PolyJet. For both technologies, we produced test specimens from five different material types in three different orientations, and determined their tensile, flexural, and compressive properties both before and after hydrogen peroxide plasma sterilization.

Our measurement results confirmed that the direction of layering is a significant factor for FDM technology, but it has no substantial effect on the materials produced by the PolyJet process. Furthermore, we found that the influence of sterilization must be considered in the design of surgical instruments made with 3D printing for certain materials.

Keywords: medical 3D printing, additive manufacturing, sterilisation, mechanical tests, 3D printing materials

Kivonat

A jelen közleményben bemutatott kutatásunk célja a különböző nyomtatási technológiával készült, sterilizált és sterilizálatlan műanyagok mechanikai tulajdonságainak (húzó-, hajlító- és nyomószilárdság) vizsgálata, valamint a mért adatokra alapozva egy szabadon elérhető, bővíthető online adatbázis létrehozása volt.

A vizsgálatok során két 3D nyomtatási technológiát alkalmaztunk: a legelterjedtebb extrúziós, vagy FDM és egy gyanta alapú, ún. Polyjet módszerrel készítettük a mintákat. Mindkét technológiával 5-5 anyagtípussal, három különböző orientációban állítottuk elő a próbatesteket, amelyeknek a húzó-, hajlító- és nyomó tulajdonságait határoztuk meg sterilizálatlan és hidrogén-perioxidos plazma sterilizálást követően.

Mérési eredményeink alapján igazoltuk, hogy a rétegződés iránya az FDM technológia esetén lényeges tényező, azonban a Polyjet eljárás anyagaira vonatkozóan nincs érdemi hatása. Megállapítottuk továbbá, hogy 3D nyomtatással készült műtői eszközök tervezése során egyes anyagoknál figyelembe kell venni a sterilizálás befolyásoló hatását.

Kulcsszavak: orvosi 3D nyomtatás, additive manufacturing, sterilizálás, mechanikai vizsgálatok, 3D nyomtató alapanyagok

1. BEVEZETÉS

A kezdetben csak geometriai prototípusok előállítására alkalmazott additív gyártástechnológiákat ma már egyre inkább késztermékek és egyedi használati eszközök gyártására is alkalmazzák. Ennek megfelelően a gyártott modelleknek számos területen (például a repülő- és űrparban, autópárhban, fogászatban és orvosi alkalmazásokban) meg kell felelniük a végtermék méretpontossági, anyagi és mechanikai követelményeinek.

Ezek a technológiák egy előzetesen megalkotott digitális modell alapján, egymásra épülő anyagrétegekből hozzák létre a kvázi tömör (vagy sok esetben csak egy külső tömör héjból és különféle kitöltöttségű belső szerkezetből álló) alkatrészeket, melyek így anizotróp tulajdonságokkal bírnak. Ezek az anyagtulajdonságok nem azonosak a teljesen tömör, öntött, vagy forgácsolt alapanyagéval, azonban ezen jellemzők pontos ismerete elengedhetetlen a megfelelő pontosságú szilárdsági számítások, végeselemes szimulációk elvégzéséhez, így a rétegződési irány mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásának ismerete alapvető fontosságú [1-3].

A 3D nyomtatás technológia rohamos fejlődésével megnőtt azoknak az anyagoknak a száma is, amelyeket különböző orvosi/sebészeti célra is alkalmazzák (pl. különféle egyedi célzók, fűró- és vágósablonok, és implantátumok). Ezeknél az anyagoknál a fentiekben túl felmerül még az a kérdés is, hogy az eszközök konkrét alkalmazását megelőző sterilizálás milyen hatással van a mechanikai jellemzőkre (1. ábra).



1. ábra. A3D nyomtatással készült egyedi célzó modellje a műtőben

Számos forrás foglalkozik a rétegződési irány mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával [4-9], azonban kevés referencia található a Polyjet eljárással és a sterilizálással kapcsolatban. Az tapasztalható továbbá, hogy az egyes szerzők eredményei elkülönülten jelennek meg, nincs egy igazán egységes felület, ahol ezek össze lennének gyűjtve.

Az előzőekben ismertetettre alapozva kutatásaink során az alábbi célokat határoztuk meg:

- A nyomtatási orientációnak a mechanikai jellemzőkre való hatásának meghatározása különféle Polyjet és FDM alapanyagok esetén;
- A sterilizálás hatásának vizsgálata ugyanezen anyagok mechanikai tulajdonságaira;
- Egy open access adatbázis létrehozása a különböző 3D nyomtatási eljárásokkal előállított anyagok orientációfüggő mechanikai tulajdonságainak összegyűjtésére.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

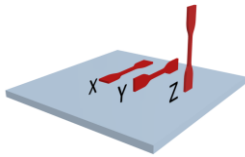
A kutatás során két 3D nyomtatási technológiát alkalmaztunk a gyakorlatban is alkalmazott egyedi sebészi segédeszközök alapanyagait alapul véve. Egyrészt a gyanta alapú Polyjet módszerrel, másrészt a legelterjedtebb extrúziós, vagy FDM (Fused Deposition Modeling) eljárással készítettük a mintákat. Mindkét technológiával 5-5 anyagtípussal, három különböző orientációban (X, Y, Z) állítottuk elő a próbatesteket, amelyeknek a húzó-, hajlító- és nyomó tulajdonságait határoztuk meg sterilizálatlan és hidrogén-perioxidos plazma sterilizálást követően.

A vizsgálatokat az 1. táblázatnak megfelelő eljárások alapján végeztük a Debreceni Egyetem Biomechanikai Laboratóriumában üzemelő Instron 8874 (Instron, High Wycombe, Egyesült Királyság) anyagvizsgáló berendezéssel. A 3D nyomtatásokat egy Stratasys F270 (Stratasys, Eden Prairie, Egyesült Államok), és egy Connex 260 (Stratasys, Eden Prairie, Egyesült Államok) berendezéssel végeztük. Mivel

minden mérést 5 próbatesten végeztünk el, 3 orientációban, sterilizálva és anélkül, végül mérési típusonként 10x3x2x5, mindösszesen 600 próbatestet kellett legyártani és lemérni.

A kutatás során alkalmazott szabványos vizsgálatok és irányok

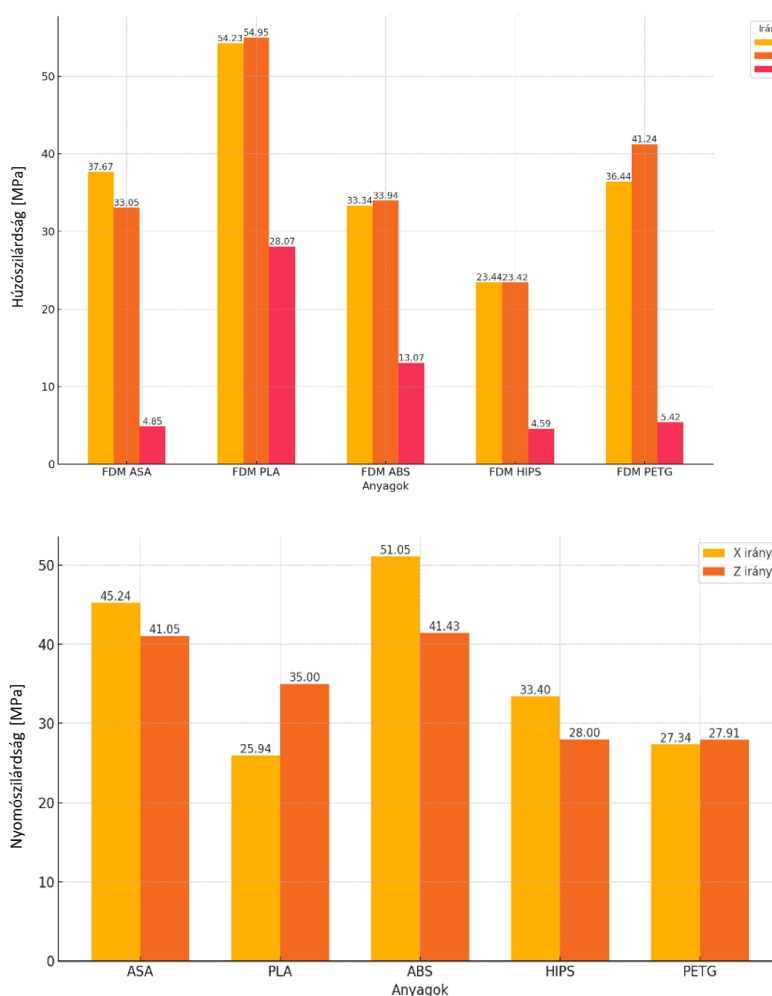
1. táblázat

Vizsgálat típusa	Húzóvizsgálat	Nyomóvizsgálat	Hajlítóvizsgálat	Irányok
Szabványok	ASTM D638 EN ISO 527	ASTM D695 EN ISO 604	ASTM D790 EN ISO 178	
Alkalmazott próbatestek száma anyagonként és orientációként	5	5	5	
Vizsgált nyomtatási orientációk	X, Y, Z	XY, Z	X, Y, Z	
Anyagok	FDM: ABS, ASA, HIPS, PETG, PLA Polyjet: VeroWhite, DM8505, DM8510, DM8520, DM8530			

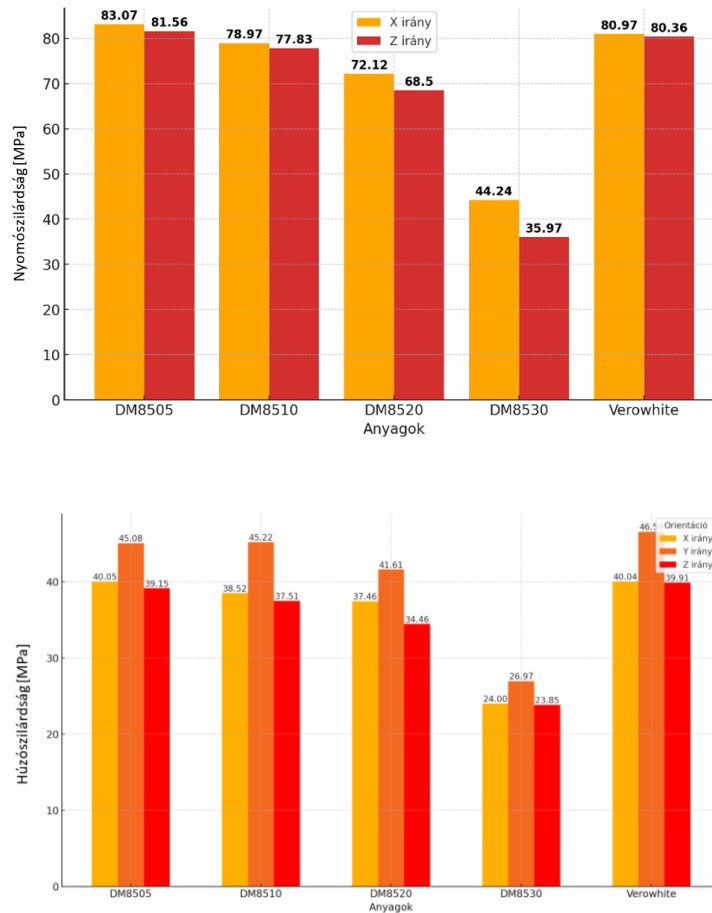
3. EREDMÉNYEK

A vizsgálat sorozatunk még jelenleg is folyik. A következőkben csupán a már most is rendelkezésre álló eredményeket foglaljuk össze.

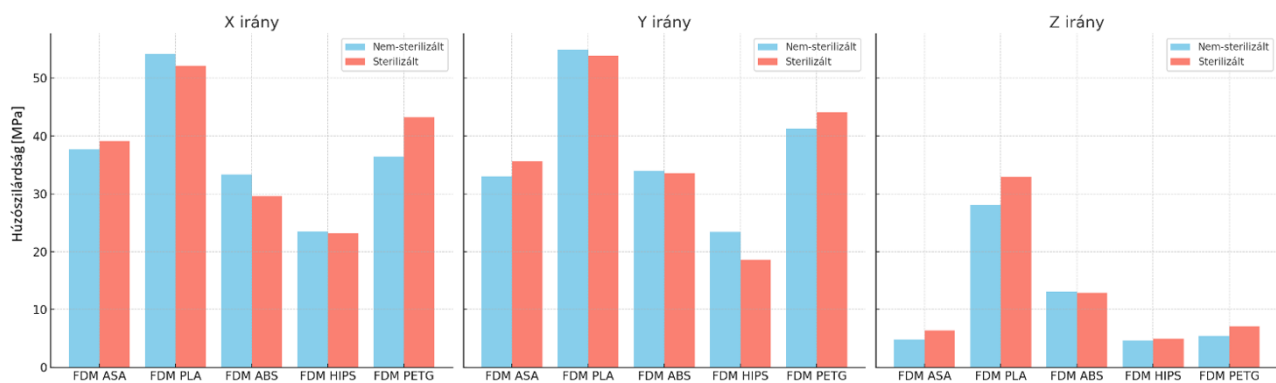
A nem sterilizált anyagokra vonatkozó részeredményeket a 2. és 3. ábra összegzi, míg a 4. ábrán a sterilizált mérésekkel való összevetés látható. Az ábrákon a vonatkozó öt próbatestes minta átlagértékeit tüntettük fel.



2. ábra. A sterilizálatlan FDM anyagok húzó- és nyomószilárdsága különböző orientációkban



3. ábra. A sterilizálatlan Polyjet anyagok húzó- és nyomószilárdsága különböző orientációkban



4. ábra. A sterilizált FDM anyagok húzószilárdsága különböző orientációkban összehasonlítva a sterilizálatlan mérésekkel

A projekt keretében gyűjtött adataink kapcsán tett kezdeményezésünk eredményeképpen egy bővíthető, mindenki számára elérhető open access adatbázist hoztunk létre a <https://3dprintmaterials.unideb.hu/> címen [10]. Az adatforrás elsősorban abból a célból jött létre, hogy egy közös gyűjtőhelye legyen a 3D nyomtatásban használt anyagok mechanikai és egyéb jellemzőinek, támogatva ezzel a kapcsolódó kutatásokat.

4. KIÉRTÉKELÉS ÉS ÖSSZEFOGLALÁS

Az FDM anyagok húzóvizsgálati eredményei alapján megállapítottuk, hogy az X és Y irányban rétegzett próbatestek húzószilárdsága nem tért el lényegesen, azonban ezekhez képest a Z irányú próbatestek jellemzői jóval elmaradtak, anyagtól függően mintegy 25-65%-kal (2. ábra). Nagyon hasonló eredményeket kaptunk a hajlítóvizsgálatok esetén is, azzal a különbséggel, hogy itt az Y irányú rétegződés esetén a legkedvezőbbek a szilárdsági tulajdonságok. A nyomóvizsgálatok alapján az PLA és a PETG anyagoknál kedvezőbb szilárdsági jellemzők adódtak Z irányban. A Polyjet anyagoknál az orientáció lényegében nincs hatással a nyomószilárdságra, a húzószilárdság esetén pedig az Y irány a legkedvezőbb, mintegy 12-15%-al (3. ábra). A sterilizálás hatására három anyag esetén (PETG, ASA, PLA) az anyag kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat mutatott, míg a másik két FDM rendszerben használatos anyag (ABS és PETG) gyengült (4. ábra).

Összefoglalva megállapítható, hogy az általunk mért értékek egyező tendenciákat mutattak a kapcsolódó irodalmakkal [1-3]. A mérések egyértelműen megmutatták, hogy a 3D nyomtatási eljárásokkal előállított modellek szilárdsági számításainál, végeeselemes szimulációjánál nem használható izotróp anyagmodell. A megfelelő pontosságú végeeselemes szimulációkhoz elengedhetetlen a rétegződési irány hatását is figyelembe vevő ortotróp anyagmodellek alkalmazása. Ehhez szándékaink szerint segítséget nyújthat a projekt keretében létrehozott adatbázis [10].

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak Dr. Janka Eszter statisztikus áldozatos munkájáért. A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal OTKA PD 135124 projektje támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Dong BK, In HL, Hae YC. *A Study on Mechanical Properties of Additive Manufactured Polymer Materials*. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers 2015; 39(6):773-80.
- [2] Vega V, Clements J, Lam T, Abad A. *The Effect of Layer Orientation on the Mechanical Properties and Microstructure of a Polymer*. Journal of Materials Engineering and Performance 2011; 20(6):978–88.
- [3] Barclift MW, Williams CB. *Examining Variability in the Mechanical Properties of Parts Manufactured via Polyjet Direct 3D Printing*. 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference 2012; 876-90.
- [4] Kaiahara FH, Pizi ECG, Straioto FG, Galvani LD, Kuga MC, Arrué TA, Junior AR, Só MVR, Pereira JR, Vidotti H. *Influence of Printing Orientation on the Mechanical Properties of Provisional Polymeric Materials Produced by 3D Printing*. Polymers. 2025; 17(3):265.
- [5] Farzadi A, Solati-Hashjin M, Asadi-Eydivand M, Abu Osman NA. *Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering*. PLoS ONE. 2014; 9(9): e108252.
- [6] Araújo LV, de Siqueira FSF, de Macedo RFC, Gomes FS, Castro GG, Dibai DB, Maia Filho EM, Tavares RRJ. *Analysis of Mechanical Properties and Printing Orientation Influence of Composite Resin for 3D Printing Compared to Conventional Resin*. Materials. 2024; 17(22):5626.
- [7] Alharbi N, Osman R, Wismeijer D. *Effects of build direction on the mechanical properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations*. J Prosthet Dent. 2016;115:760–7.
- [8] Unkovskiy A, Bui PH, Schille C, Geis-Gerstorfer J, Huettig F, Spintzyk S. *Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin*. Dent Mater. 2018; 34:e324–e33.
- [9] Vayrynen VO, Tanner J, Vallittu PK. *The anisotropy of the flexural properties of an occlusal device material processed by stereolithography*. J Prosthet Dent. 2016;116:811–7.
- [10] Manó S. *3Dprint Materials Database*. [Internet]. Available from: <https://3dprintmaterials.unideb.hu/>.