

PET-G ALAPANYAGÚ FDM-ELJÁRÁSSAL NYOMTATOTT ALKATRÉSZEK KITÖLTÉSI GEOMETRIÁINAK MECHANIKAI VIZSGÁLATA

MECHANICAL INVESTIGATION OF INFILL GEOMETRIES IN FDM PRINTED PET-G COMPONENTS

Béres Máté*, Dr. Bihari Zoltán**

ABSTRACT

The mechanical properties of FDM-manufactured components are influenced by several printing parameters, including infill geometry. This study investigates 24 different infill geometries in PET-G specimens. Impact and tensile tests were performed on 240 specimens, with approximately constant infill mass.

The Lateral Honeycomb geometry exhibited the highest average impact energy (18.6 J), while Gyroid provided the highest average tensile force (1622 N). Impact tests showed considerably higher relative standard deviations than tensile tests. Thus, high impact energy was not necessarily associated with good repeatability, whereas Gyroid combined high tensile force with low variability.

The results demonstrate that infill geometry affects both the mechanical load-bearing capacity and the variability of measurement results, which should be considered when selecting a geometry for a specific application.

Keywords: FDM, PET-G, infill geometry, tensile testing, impact testing

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártás napjainkra az ipar számos területén alkalmazott gyártástechnológiává vált. Az FDM (Fused Deposition Modeling) eljárás egyik legfontosabb előnye, hogy összetett geometriájú alkatrészek állíthatók elő hagyományos gyártóeszközök nélkül [3]. A technológiával készült alkatrészek mechanikai tulajdonságait számos gyártási paraméter befolyásolja, többek között a nyomtatási hőmérséklet, a rétegvastagság, a falvastagság és a kitöltési geometria [5, 6]. A szakirodalomban számos kutatás foglalkozik a különböző kitöltési mintázatok mechanikai tulajdonságainak vizsgálatával. Ugyanakkor korlátozott számban állnak rendelkezésre olyan összehasonlító vizsgálatok, amelyek nagyszámú kitöltési geometriát azonos gyártási feltételek mellett értékelnek [5, 9].

A kitöltési geometria megválasztása az alkatrész mechanikai viselkedése mellett az anyagfelhasználást és

a gyártási időt is befolyásolja. Ezért a megfelelő geometria kiválasztása fontos tervezési szempont, különösen a mechanikai igénybevételnek kitett funkcionális alkatrészek esetében.

Jelen kutatás célja 24 különböző kitöltési geometria mechanikai viselkedésének vizsgálata PET-G alapanyagú [4], FDM-eljárással gyártott próbatesteken. A kitöltések tömegét közel azonos értéken tartottuk, így lehetőség nyílt a különböző geometriák mechanikai tulajdonságainak összehasonlítására. A kutatás kiterjedt a mérési eredmények szórásának elemzésére is, különös tekintettel az üté- és szakítóvizsgálatok eredményeinek változékonyságára.

2. VIZSGÁLATI MÓDSZER

A próbatestek Creality Ender-3 V2 típusú FDM nyomtatóval, PET-G alapanyagból készültek. A nyomtatás során alkalmazott paramétereket a kitöltési geometria és az ahhoz tartozó kitöltési százalék kivételével állandó értéken tartottuk.

A próbatestek 240 °C-os fűvóka- és 70 °C-os tárgyasztal-hőmérséklettel készültek. A rétegvastagság 0,2 mm, a falak száma 2, az alsó és felső rétegek vastagsága egyaránt 0,4 mm volt.

A vizsgált kitöltési geometriákat öt csoportba soroltuk: **kétdimenziós, háromdimenziós, méhsejt jellegű, TPMS-alapú és spirális** mintázatu geometriák. A kétdimenziós kitöltések síkbeli vonal- és görbeszerkezetekből épülnek fel. A háromdimenziós mintázatok térbeli, több irányban összekapcsolódó szerkezetet alkotnak. A méhsejt jellegű kitöltéseket cellás felépítés jellemzi. A TPMS-geometriák (triplý periodic minimal surfaces) folytonos, periodikusan ismétlődő térbeli felületekből állnak. A spirális csoportba a spirális vagy ahhoz hasonló, folytonos görbevezetésű mintázatok kerültek.

A vizsgálat során 24 különböző kitöltési geometriát alkalmaztunk. A vizsgált geometriák megnevezését és csoportosítását az 1. táblázat tartalmazza.

* IV. évf. BSc gépészmérnök hallgató, Miskolci Egyetem

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

1. táblázat. A kitöltési geometriák csoportosítása

Sorszám	Kitöltés megnevezése	Geometriai csoport
1.	Lines	Kétdimenziós
2.	Aligned Lines	Kétdimenziós
3.	Locked Zag	Kétdimenziós
4.	Cross Zag	Kétdimenziós
5.	Zig Zag	Kétdimenziós
6.	Line	Kétdimenziós
7.	Grid	Kétdimenziós
8.	Triangles	Kétdimenziós
9.	Tri-Hexagon	Kétdimenziós
10.	Cubic	Háromdimenziós
11.	Adaptive Cubic	Háromdimenziós
12.	Quarter Cubic	Háromdimenziós
13.	Honeycomb	Méhsejt jellegű
14.	3D Honeycomb	Méhsejt jellegű
15.	Lateral Honeycomb	Méhsejt jellegű
16.	Lateral Lattice	Méhsejt jellegű
17.	Cross Hatch	Háromdimenziós
18.	TPMS-D	TPMS
19.	TPMS-FK	TPMS
20.	Gyroid	TPMS
21.	Concentric	Kétdimenziós
22.	Hilbert Curve	Kétdimenziós
23.	Archimedean Chords	Spirális
24.	Octagram Spiral	Spirális

Mind a 24 kitöltési geometriához öt-öt ütő- és szakítópróbatestet készítettünk [8] szerint. A mérések száma mindkét esetben 120, összesen tehát 240 volt.

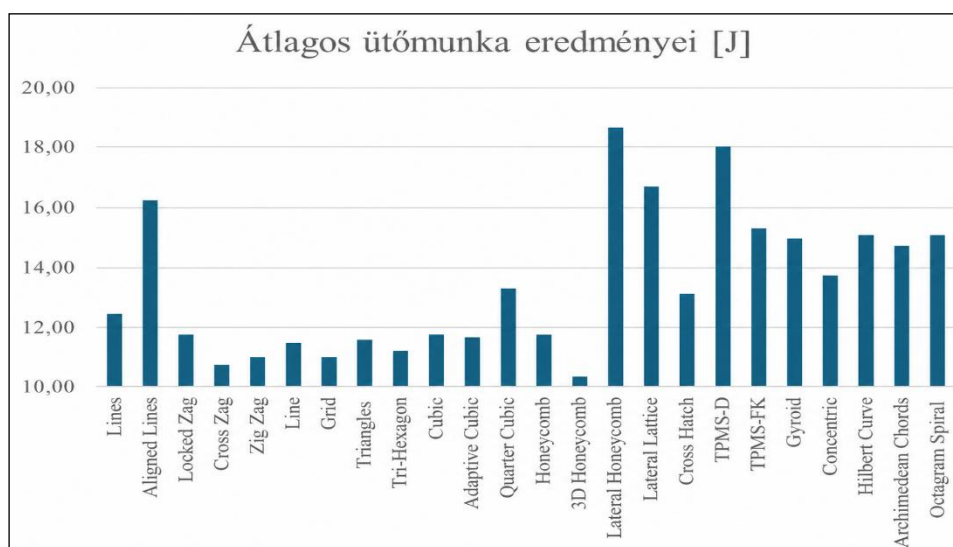
Az ütővizsgálatokhoz az ISO 179, a szakítóvizsgálatokhoz az ISO 527 szabvány figyelembevételével kialakított próbatesteket alkalmaztuk [1, 2].

3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKEKELÉS

3.1. Ütővizsgálatok

Az ütővizsgálatok eredményei alapján az egyes kitöltési geometriák között jelentős különbségek mutatkoztak az átlagos ütőmunka tekintetében. A legnagyobb átlagos értéket a **Lateral Honeycomb** kitöltés érte el (18,6 J), amelyet a **TPMS-D** (18,0 J), majd a **Lateral Lattice** (16,6 J) követett.

A 24 vizsgált geometria átlagos ütőmunka-értékei az 1. ábrán láthatók. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kitöltési geometria jelentősen befolyásolta a próbatestek ütővizsgálat során mutatott viselkedését.



1. ábra. Az egyes kitöltések átlagos ütőmunka értékei

A legnagyobb és a legkisebb átlagos ütőmunka közötti különbség jól szemlélteti, hogy a kitöltés geometriája meghatározó szerepet játszhat a próbatestek ütésterheléssel szembeni viselkedésében.

Az ábrán látható értékek alapján ugyanakkor nem állapítható meg egyértelmű összefüggés a geometriák síkbeli vagy térbeli kialakítása és az elért ütőmunka között. Egyes síkbeli mintázatok is viszonylag magas

értéket mutattak, míg a térbeli geometriák között is jelentős eltérések figyelhetők meg. Ez arra utal, hogy az ütőmunka alakulását nem önmagában a geometriai csoport, hanem az adott kitöltési mintázat sajátosságai is befolyásolják.

3.2. Szakítóvizsgálatok

A szakítóvizsgálatok során a legnagyobb átlagos szakítóerőt a **Gyroid** kitöltés érte el (1622 N), amelyet a

Cubic (1592 N) és az **Adaptive Cubic** (1580 N) követett. A 24 vizsgált kitöltési geometria átlagos szakítóerő-értékeit a 2. ábra mutatja be.

Az eredmények alapján az egyes kitöltési geometriák között jelentős különbségek figyelhetők meg.



2. ábra. A vizsgált kitöltési geometriák átlagos szakítóerő-értékei

A vizsgálati eredmények arra utalnak, hogy a kitöltési geometria számottevő hatással van a próbatestek húzóterheléssel szembeni viselkedésére. A különböző térbeli és síkbeli mintázatok eredményei közötti eltérések alapján azonban önmagában a geometriai csoportosítás nem elegendő a szakítóerő alakulásának magyarázatára; az egyes mintázatok sajátos szerkezeti jellemzőit is figyelembe kell venni.

3.3. A mérési eredmények szórásának vizsgálata

A mérési eredmények szórásának vizsgálata azért fontos, mert az átlagérték önmagában nem mutatja meg, hogy az ismételt mérések mennyire térnek el egymástól, így nem jellemzi teljes körűen az eredmények megbízhatóságát.

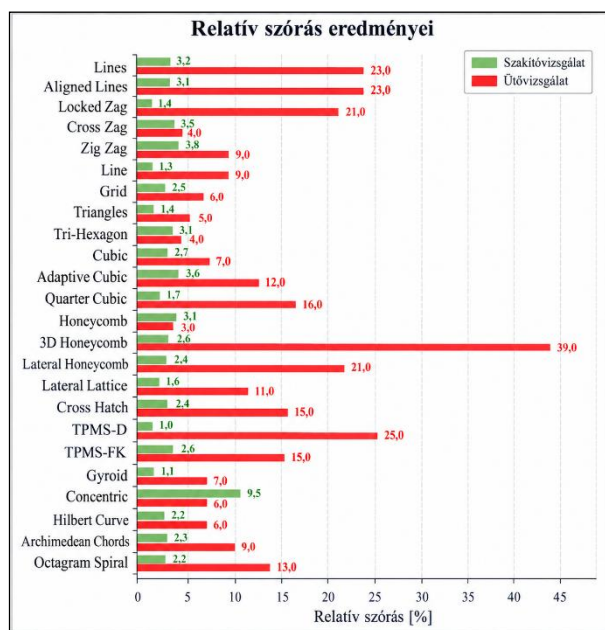
Ütővizsgálatok szórása. Az ütővizsgálatok során az egyes kitöltési geometriákhoz tartozó öt mérés relatív szórása jelentős eltéréseket mutatott. Különösen figyelemre méltó, hogy a nagy átlagos ütőmunkát elérő geometriák közül a **Lateral Honeycomb** és a **TPMS-D** relatív szórása kifejezetten magas volt. A diagram alapján előbbi értéke megközelítőleg 21%, utóbbié 25%. A Lateral Lattice esetében ennél kisebb, de szintén számottevő szórás [7] figyelhető meg.

A legnagyobb relatív szórást a **3D Honeycomb** mutatta, közel 39%-os értékkel. Ez azt jelzi, hogy az ehhez a geometriához tartozó ismételt mérések eredményei között jelentős eltérések voltak. Ezzel szemben több kitöltés, például a **Honeycomb**, a **Cross Zag**, a **Triangles** és a **Tri-Hexagon** esetében a relatív szórás alacsony maradt (3. ábra).

A nagy relatív szórás a mérési eredmények jelentős bizonytalanságára utal. Dinamikus igénybevétel esetén ezért a nagy átlagos ütőmunka önmagában nem elegendő a kitöltési geometria megbízható jellemzéséhez. A szórás figyelembevétele is kiemelten fontos, mivel a nagy eltérések megnehezítik a várható mechanikai viselkedés precíz előrejelzését.

Szakítóvizsgálatok szórása. A szakítóvizsgálatok során lényegesen kisebb relatív szórásértékek adódtak, mint az ütővizsgálatok esetében. A geometriák többségénél a relatív szórás [7] jellemzően 4% alatt maradt, ami a reprodukálhatóság szempontjából elfogadható. A legkisebb szórást a **TPMS-D** kitöltés mutatta (0,93%), míg a legnagyobb érték a **Concentric** geometriához tartozott (9,46%). Ez utóbbi a többi mintázathoz képest jelentősen nagyobb mérési bizonytalanságot jelez (3. ábra).

A szakítóvizsgálatok esetében tehát a kisebb relatív szórású geometriák eredményei megbízhatóbban reprodukálhatók, míg a nagyobb szórású mintázatoknál az átlagérték bizonytalansága is nagyobb. Fontos azonban, hogy a kisebb szórás a mérési eredmények egyenletességét jelzi, nem pedig önmagában a nagyobb szakítószilárdságot.



3. ábra. Az ütővizsgálatok és a szakítóvizsgálatok szórása

ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok alapján a kitöltési geometria jelentősen befolyásolta a nyomtatott próbatestek mechanikai viselkedését. A szakítóvizsgálatok során a **Gyroid** kitöltés érte el a legnagyobb átlagos szakítóerőt (1622 N), miközben a relatív szórása mindössze 1,06% volt. Ez a nagy teherbírás és a mérési eredmények megbízhatóságának kedvező kombinációját jelenti, így a vizsgált geometriák közül húzóterhelés esetén ez tekinthető a legkedvezőbb választásnak.

Az ütővizsgálatok során a **Lateral Honeycomb** mutatta a legnagyobb átlagos ütmunkát (18,6 J), azonban a 21%-os relatív szórás jelentős bizonytalanságot jelez. A **TPMS-D** szintén nagy ütmunkát ért el (18,0 J), de a 25%-os relatív szórása még nagyobb. Ezeknél a geometriáknál tehát a nagy energiaelnyelő képességhez számottevő mérési bizonytalanság társul.

A vizsgálatok alapján nem jelölhető ki egyetlen, minden terhelési mód esetén egyértelműen legkedvezőbb kitöltési geometria. Szakítóterhelésre a **Gyroid** nagy teherbírása és kis szórása miatt kedvező választás, míg ütésterhelés esetén a **Lateral Honeycomb** nagy átlagos ütmunkája mellett a jelentős szórást is figyelembe kell venni. A megfelelő kitöltés kiválasztása ezért az adott igénybevételtől és a terhelhetőség, illetve a mérési eredmények megbízhatósága közötti elvárt kompromisszumtól függ.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk köszönetünket kifejezni a Terplán Zénó Szakkollégiumnak a kutatás megvalósításához szükséges támogatásáért, valamint a Miskolci SZC Andrásy Gyula Gépipari Technikumnak, hogy a vizsgálatok elvégzéséhez szükséges vizsgáló-berendezéseket rendelkezésre bocsátották.

IRODALOM

- [1] MSZ EN ISO 179-1: *Műanyagok. Charpy-féle ütési jellemzők meghatározása*, 2023.
- [2] MSZ EN ISO 527-1: *Műanyagok. Szakítószilárdság meghatározása*, 2019.
- [3] I. GIBSON, D. W. ROSEN ÉS B. STUCKER: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, New York: Springer, 2010.
- [4] SUNLU GROUP, *PETG Product Information. Technical Data Sheet*, 2024.
- [5] N. SA'UDE ÉS N. A. N. AB LATIB: *A Study On the Mechanical Properties of PLA, ABS and PETG Filament Printed by Various Type of Infill Design Using 3D Printing Machine*, Research Progress in Mechanical and Manufacturing Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 162–167, 2023.
- [6] W. SHEHBAZ ÉS Q. PENG: *Multi-Objective Optimization of FDM Infill Patterns Using Design of Experiments Considering Load-Path Alignment*, Eng. (ISSN: 2673-4117) vol. 7, no. 4, p. 175, 2026.
- [7] A. FIELD: *Discovering Statistics Using SPSS*, 3 szerk., London: SAGE Publications, 2009.
- [8] D. C. MONTGOMERY: *Design and Analysis of Experiments*, 8. kiadás, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [9] I. MASKERY et al.: *Insights into the Mechanical Properties of Several Triply Periodic Minimal Surface Lattice Structures Made by Polymer Additive Manufacturing*, Polymer, vol. 152, pp. 62–71, 2018.