

# Eltérő elemszám mellett is azonos térfogattal rendelkező fraktál inspirált metaanyagok tervezése és zömítéssel szembeni mechanikai tulajdonságai

Design and mechanical characterization of fractal-inspired metamaterials of the same volume despite the element number

Széles Levente<sup>a</sup>, Horváth Richárd<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, szeles.levente@cl.uni-obuda.hu

<sup>b</sup>Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, egyetemi.docenshorvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

## Kulcsszavak

fraktál-ihletett geometria, lattice szerkezet, végelelemes módszer, additív gyártástechnológia, zömítő vizsgálat

## Keywords

fractal-inspired geometry, fractal-inspired geometry lattice structure, finite element method, additive manufacturing, compression test

## Absztrakt

Ebben a tanulmányban olyan fraktál ihletésű négyzet alapú metaanyagokat hoztunk létre és írtuk le azok létrehozását paraméteres egyenlettel, melyeknek az alapterületük, ezáltal az abból létrehozott térfogatuk és tömegük állandó a cellaszámtól függetlenül. A metaanyagokat kétféle elrendezéssel hoztuk létre, nyomott rudas rendezett kivitelben, valamint eltolt hajlításhoz kitétt elrendezéssel is. Az új metaanyag struktúrák létrehozásán túl célunk volt azok energiaelnyelésének és tönkremenetelének vizsgálata is. Végelelemes és valós zömítő vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatok eredményeként következtetést vontunk le az energiaelnyelés és a cellaszám, valamint a cellák elrendezése közötti kapcsolatra vonatkozóan.

## Abstract

In this study fractal inspired equal volume and mass metamaterials are created. The specimens consist of simple square elements, based on the presented parametric equation. Specimens were created with an ever-increasing element number and in two different layouts. The ordered layout consists solely of compressed rod elements, while the rods in the offset structure are subjected to bending. The equal volume specimens allow us to clearly investigate the effect of element number and geometrical layout via compression testing and finite element method.

## 1. Bevezetés

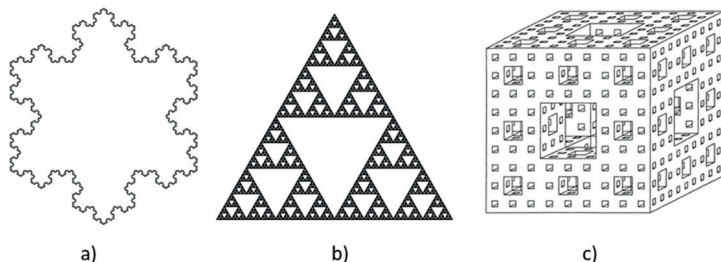
A fraktál geometria és a metaanyagok igen nagy törtelemmel rendelkeznek. A fraktálok történelme (bár nevüket később a XX. században Mandelbrot-tól kapták) a 17. században kezdődött. Már Gottfried Leibniz is elmélkedett a rekurzív önhasonlóságról [1], majd az 1800-as évek végén Henri Poincaré és Felix Klein fedezte fel azokat az alakzatokat, melyeket ma "öninverz fraktálok" nevezünk [2]. 1904-ben Helge von Koch Poincaré ötleteiből kiindulva a geometriából levezethető definíciót javasolt és az első, kézzel rajzolt képeket is elkészítette egy azonos ismétlődő mintáról, amelyet ma a sokak által ismert Koch-hópehelynek nevezünk. Nem sokkal később Waclaw Sierpinski 1915-ben alkotta meg azt a mintát, amit ma Sierpinski-háromszögnek hívunk. Majd Benoit B. Mandelbrot [2] lengyel származású matematikus alkalmazta először a fraktál kifejezést, mely a latin fractus szó alapján "töröttet" vagy "töredezettet" jelent. Néhány jellemző példát ismertet fraktál geometriákra az 1. ábra.

Metaanyagként tekintünk minden olyan anyagot, melyet úgy terveztek, hogy olyan tulajdonságokkal rendelkezzen

melyek ritkán figyelhetők meg természetes anyagokban – ebből adódik alkalmazásuk előnye is. A metaanyagok általában több elemből (például Lattice-okból) felépülő tervezett szerkezetek, tulajdonságaik nem az alkotó alpanyagból, hanem magából a szerkezetből származnak. A metaanyagok viselkedése számos mechanikai [7-10], hőtani [11-12], sőt akár még rezgéstani [13-16] paraméterek mentén jellemezhető, vizsgálható. Természetesen szerkezettől függően, főleg, ha auxetikus anyagok (de nem kizárólag) képzik a vizsgálat tárgyát, akkor a Poisson tényező szerint is lehet jellemezni a metaanyagokat [7].

Már az ezredfordulón Deshpande és tsi. [17] azokat a topológiai kritériumokat tárgyalták, amelyek megszabják, hogy egy metaanyag rácsszerkezetében hajlítás vagy húzás dominál-e, amely befolyásolja a metaanyag deformációs viselkedését. A jelenséget később Chen és tsi. [18] munkájában is megfigyelhetjük, melyben 3 dimenziós Lattice szerkezeteket vizsgálva megállapították, hogy a hajlítás domináns Kelvin szerkezet zömítéssel szembeni ellenállása közel fele akkora, mint az nyolcszög (octet) vagy a kockaktaéder (cuboctahedron) szerkezet esetében mért érték. Általánosan elmondható, hogy kedvezőbb energiafelvevő képességgel a hajlítás-domináns szerkezetek rendelkeznek [19]. Wagner és tsi. [20] azonban a hajlítás és húzás-domináns viselkedések közti hézagot képesek voltak elmosni egy újfajta szerkezettel, mely külső hatásra (hő) képes megváltoztatni viselkedési mechanikáját. Szendvicsszerkezet alapú hierarchikus „stretch-bend-hybrid” (húzás-hajlítás-hibrid) szerkezeteket már korábban 2013-ban is létrehozottak [21], ahol az elemi cella piramis geometriájú volt.

Szintén hierarchikus Lattice szerkezeteket hozott létre Al Nashar M. & Sutradhar [22] azok kedvezőbb energiafelvevő képességük vizsgálata érdekében.



1. ábra: Fraktál geometriák:  
a) Koch hópehely [3]  
b) Sierpinski háromszög [3-4]  
c) Sierpinski szivacs (3. iteráció) [5-6]

A szerzők megállapították, hogy a hierarchia bevezetésével a szerkezet energiafelvevő képessége 4-5-ször nagyobb lett. A hierarchikus szerkezetek mellett jelentős figyelmet kapott a „zömölő-csavarodó” viselkedés. Egy 2019-es publikációban Zhong és tsi. [23] egy egyszerű négyzet kivágásokkal ellátott síklapokból álló szerkezetet vizsgáltak, melyben a négyzetek sarokpontjait ferde rúd elemmel összekötve érték el zömítés hatására a csavarodó viselkedést. Hasonló geometriát alkalmaztak Zheng és tsi. [24]. Az egyszerűbb négyzet kivágások helyett, a vízszintes síkok tetrakirális alapúak. Megállapították, hogy az elemszám növelése csak egy darabig növeli a TTC (tension-torsion coupling (húzó-csavaró kapcsolat)) hatást, mely szerkezettől függően az elemszám növelésével csökkenésnek is indulhat. Az előző két publikációban a vízszintes síkokat a sarokpontokban egy – egy ferde rúddal kötötték össze, így a Liang és tsi. [25] által megalkotott szerkezetben már két-két ferde rúd elemmel valósul meg a kapcsolat. A szerkezet természetesen továbbra is nyomó terhelésre csavarodik, sőt a szerzők a redundáns régiókat eliminálva egy még hatékonyabb szerkezetet is terveztek.

Egy szerkezetet nem csak egy adott irányú nyomó terheléssel szemben lehet optimalizálni, hanem két vagy háromirányú terheléssel szemben is. Ezen gondolatok mentén terjesztették ki a „kihajlás-alapú negatív merevség” Lattice koncepcióját egy irányúból két, illetve három irányúra [28]. A hagyományos és auxetikus szerkezeteket nem szükséges külön kezelni, hiszen megfelelő párosítás mellett a kombináció eredményeként nagyobb energiafelvételt képes szerkezetet kapunk [29]. A hagyományos és auxetikus metaanyagok mellett egy újfajta szerkezet család is megszületett, mely nyomásra és húzó terhelésre is expanzióval válaszol [30].

Három teljesen új, szintén „összenyomásból eredő csavarodás” működési mechanizmusú 3 dimenziós szerkezetet alkottak meg Xiang Li és tsi. [26] a „nyírás-zömülés kapcsolat” hatásból inspirálódva. Az újfajta 3D-s elemi cellák oldalait 2 dimenziós „nyírás-zömülés kapcsolat” hatásalapú geometriák adták. A hagyományos szerkezetek mellett az auxetikus elemi cellákból is hoztak létre „zömülés-csavarodó” viselkedésű szerkezeteket [27].

A mechanikai tulajdonságok egyszerű rúd elemek beépítésével is javíthatók. Zhu és tsi. [31] munkájukban nem kizárólag a merevítés hatását vizsgálták egy adott estre, hanem egy paraméter alapú elemzést is ismertettek. A módosított újszerű szerkezet kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat eredményezett.

A metaanyagok mechanikai tulajdonságának javításának másik módja az elemszám változtatása. Ezt vizsgálták Carneiro és tsi. [32] auxetikus metaanyagok tekintetében. Az elemszám változtatásának legcélszerűbb módja az eredmények összehasonlíthatóságának érdekében az, ha azonos a darabok tömeg/relatív sűrűsége. TPMS (háromszorosán periodikus minimál felületek - triply periodic minimal surface) Lattice szerkezetek esetében készítették összehasonlító vizsgálatokat Hend és tsi. [33]. Az átfogó 18 mintadarabot magába foglaló vizsgálat eredményeként arra a megállapításra jutottak, hogy a mintadarabok

zömítéssel szembeni ellenállására legjobban a szerkezet és az elemi cella mérete van hatással. Az előzőekben bemutatott munkákból is látszik, hogy a relatív sűrűség és az elemi cellák mérete hatással van a mintadarabok mechanikai tulajdonságaira. Xiao Yang és tsi. [34] munkájukban ezt a két hatást párhuzamosan, összehasonlítható módon vizsgálták. Az elemi cellák számának növelése (azonos tömeg mellett) növelte a mintadarabok zömítési ellenállását, elnyelt energia mértékét. A relatív sűrűség növelése pedig azért célszerű, mivel így a vékonyabb régiókban kisebb valószínűséggel, kevésbé jelentős mértékben alakulnak ki a feszültségcsúcsok. Az elemi cellák mérete mellett azok méretarányinak változtatásával is lehet kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat elérni. Például az oktett rácsos lattice (octet struss lattice) elemi cellát a nyomóterhelés irányában megnyújtva kedvezőbb mechanikai és kedvezőtlenebb deformáció viselkedés tapasztalható [36].

A hagyományos geometriai – szerkezeti változtatások mellett eltérő módokon is lehet kedvezőbb tulajdonságú Lattice szerkezeteket megalkotni. Tan és tsi. [37] olyan szerkezetet hoztak létre, mely energiafelvevő képességét nem csak az elasztikus, hanem a plasztikus zónában is lehet értelmezni – ismétlődő terhelés mellett. Változtatlan elemi cellageometria mellett az egyes rétegek eltérő, egyre növekvő térkitöltése mellett (ún. gradiens) is kedvezőbb tulajdonságokat érhetünk el. Hang Zhang és tsi. [38] például jelentősen kedvezőbb energiafelvevő képességet figyeltek meg.

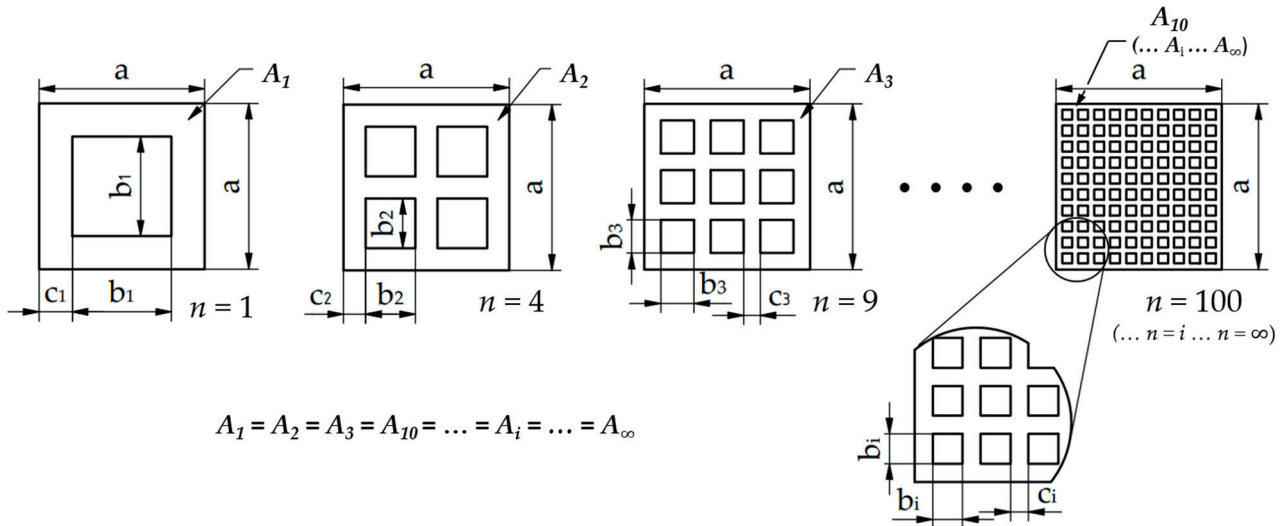
Új lattice szerkezetek korunk két legdinamikusabban fejlődő technológiájának, nevezetesen az additív gyártástechnológiák és a topológia optimalálás kombinálásával is létrehozhatók [39].

Végül fontos megemlíteni, hogy egy adott tervezett geometria csak akkor képes a kívánt viselkedést produkálni, ha az alkotó alapanyag lehetővé teszi, hiszen eltérő alapanyag mellett, a vizsgált szerkezetek viselkedése jelentősen eltér [40].

A szakirodalmak áttekintésénél különböző geometriai alapú módosításokat mutattunk be, de újszerű metaanyagok létrehozásához a tudomány más területeiről is meríthetünk inspirációt. Az általunk vizsgáltba vont geometria inspirációját a fraktálok képezték, melyek végtelenül összetett, önhasonló mintázatok.

A bemutatott kortás irodalmak számos módszert tartalmaznak a metaanyagok merevítésére és kedvező tulajdonságok elérésére, amelyek igen hatékonyan bizonyultak, azonban geometriájuk igen bonyolult.

Ebben a tanulmányban a metaanyagok merevítésére – kedvezőbb mechanikai tulajdonságok elérésére - szolgáló két módszer hatásait elemezzük egy egyszerű szerkezetten. A fraktál ihletés, ebben az esetben a fraktálokra jellemző egyszerű, önhasonló geometriára épül. Négyzetes kivágásokkal rendelkező próbatesteket készítettünk növekvő elemszámmal, így csökkenő kivágott négyzet méretek (ez adja a fraktál jelleget) és azonos tömeg mellett, lehetővé téve az elemszám hatásának egyértelmű elemzését. A másik vizsgált hatás a geometriai elrendezés



$$A_1 = A_2 = A_3 = A_{10} = \dots = A_i = \dots = A_\infty$$

2. ábra: Az azonos befoglaló méretek melletti azonos keresztmetszettel rendelkező metaanyag származtatása

hatása. Minden próbatestet két kivitelben, egy rendezett és egy központosan eltoltt kivitelben készítettünk el. Közleményünk célja az elemszám hatásának és az elrendezés hatásának vizsgálata a mintadarabok mechanikai tulajdonságaira, a felvett energiára és a deformációs viselkedésre, továbbá optimumkeresés.

## 2. Anyagok és módszerek

### 2.1 Metaanyag geometriájának matematikai leírása

A célunk olyan fraktál ihletésű, elemi cellából ismétlődő, egyszerű geometria leírása, melynek az elemszám növelésével – adott befoglaló méretek mentén – nem változik a keresztmetszete, ezáltal a térfogata és a tömege sem. Az elemszámok növelésének a határát makro körülmények között csak az adott additív gyártási technológia határai szabják meg, de a geometriája, mint fraktálok esetében végtelen mintázatoknak tekinthetők.

Az önismétlődő, de azonos keresztmetszettel rendelkező metaanyag származtatásának alapötletét a Sierpinski-szivacs adta, melynek néhány lépése a 2. ábrán látható, ahol:

- $a$  – metaanyag befoglaló mérete,
- $b_1$  – elemi cella kivágott anyagrészének mérete,
- $b_2$  – a négy elemi cellából álló metaanyag kivágott anyagrészének mérete,
- $b_3$  – a kilenc elemi cellából álló metaanyag kivágott anyagrészének mérete,
- $b_i$  –  $i$  kivágott elemszámú metaanyag kivágott méretei, ( $i = \sqrt{n}$ ),
- $c_i$  –  $i$  kivágott elemszámú metaanyag alkotó (megmaradó) anyagrégiók vastagsági méretei,
- $n$  – elemszám,
- $A_1, A_2, A_3 \dots A_i$  – metaanyagok keresztmetszetei,
- $V_1, V_2, V_3 \dots V_i$  – metaanyagok térfogatai.

Az alábbiakban ismertetjük példaként, az 1, a 4 és a 9 elemi cellából felépülő metaanyagok keresztmetszeteinek egymásból való származtatását, majd a származtatás

általános alakját:

$$A_1 = a^2 - b_1^2, \quad (1)$$

$$A_2 = a^2 - 4 \cdot b_2^2, \quad (2)$$

$$A_3 = a^2 - 9 \cdot b_3^2. \quad (3)$$

Feltételezve, hogy  $A_1 = A_2 = A_3 = A_i$ , az elemi cella méreteiből meghatározhatóak a további metaanyagok kivágandó részeinek méretei úgy, hogy a keresztmetszet állandó maradjon. 4 elemű cella esetében például:

$$A_1 = A_2, \quad (4)$$

$$a^2 - b_1^2 = a^2 - 4 \cdot b_2^2, \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{b_1}{2}. \quad (6)$$

Hasonlóan 9 elemi cellából álló metaanyag esetén:

$$A_1 = A_3, \quad (7)$$

$$a^2 - b_1^2 = a^2 - 9 \cdot b_3^2, \quad (8)$$

$$b_3 = \frac{b_1}{3}. \quad (9)$$

Tehát a fentiek alapján bármilyen  $n$  elemű metaanyag előállítható az alábbi módon:

$$A_1 = A_i, \quad (10)$$

$$a^2 - b_1^2 = a^2 - n \cdot b_i^2, \quad (11)$$

$$b_i = \frac{b_1}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

A fentiek alapján az állandó keresztmetszetű metaanyagok térbeli kihúzása során állandó térfogatot kapunk, tehát a cellaszámtól függetlenül fenn áll, hogy:

$$V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_i. \quad (13)$$



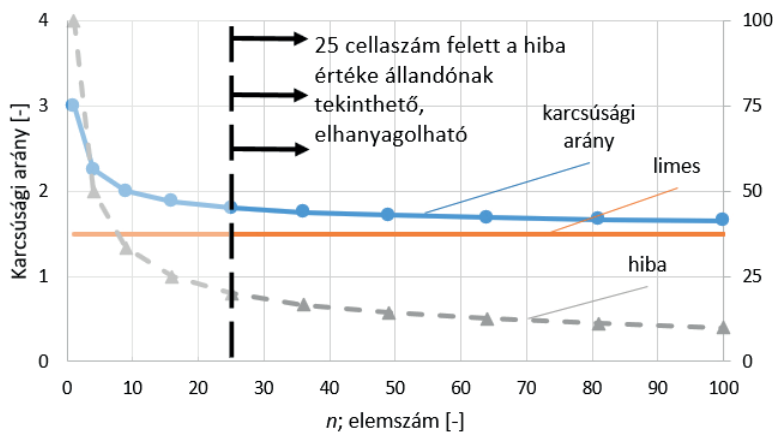
Az eredmények kiértékelése során célszerű lehet figyelembe venni a mintadarabokat alkotó anyagrégiók karcsúságát. Ehhez először az alkotó anyagrészek vastagságát kell meghatározni, mely az alábbi összefüggéssel írható le:

$$c_i = \frac{a - (\sqrt{n} \cdot b_1)}{\sqrt{n} + 1} = \frac{a - \left(\sqrt{n} \cdot \frac{b_1}{\sqrt{n}}\right)}{\sqrt{n} + 1} = \frac{a - b_1}{\sqrt{n} + 1} \quad (14)$$

A karcsúsági arány jelen metaanyagok esetében:

$$\frac{b_i}{c_i} = \frac{\frac{b_1}{\sqrt{n}}}{\frac{a - b_1}{\sqrt{n} + 1}} = \frac{b_1 \cdot (\sqrt{n} + 1)}{\sqrt{n} \cdot (a - b_1)} \quad (15)$$

A karcsúsági arány az elemszám növelésével egy határértékhez tart (lásd. 3. ábra).



3. ábra: Karcsúsági arány az elemszám függvényében

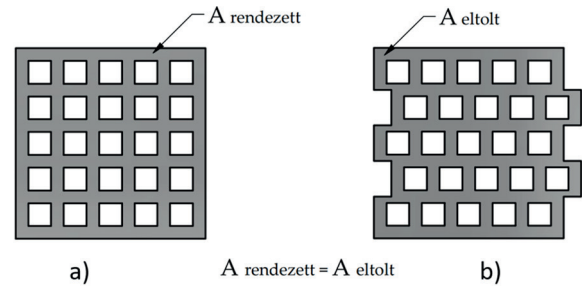
## 2.2 A vizsgált két eltérő struktúrájú mintadarab bemutatása

A bevezető fejezetben áttekintett irodalmak egyrésze különböző struktúra merevítő, viselkedés irányító módszereket vizsgált. Az áttekintett irodalmakban bonyolultabb szerkezetek és modellezési módszerek kerültek bemutatásra, melyek nem minden esetben alkalmazhatók ténylegesen könnyedén.

Jelen publikációban két, a 2.1 fejezetben bemutatott elvek szerint létrehozott (a mintadarabok szempontjából – mikro szinten azonos elemekből felépülő) szerkezetek kerülnek vizsgálatra eltérő elemszám mellett, melyek makroszinten rendezett, illetve központosan eltolt kivitelűek (4. ábra). Ennek oka, hogy terhelés hatására várhatóan a rendezett geometriában a terhelés (első fázisában) csak nyomott rudak jönnek létre, míg az eltolt geometriánál a vízszintes elemek rögtön hajlításnak lesznek kitéve (6. ábra).

A 4.a. ábrán látható rendezett struktúra esetében belátható, hogy a nyomóterhelés hatására a válaszreakció nem kiszámítható, nem irányított. A terhelés előrehaladtával a kivágásokban fellépő deformációk makroszinten kihajlást eredményeznek, a mintadarab „összerogy”.

A nagyteljesítményű térkitöltő struktúrák, metaanyagok irányított – kiszámítható, tervezhető viselkedéssel kell



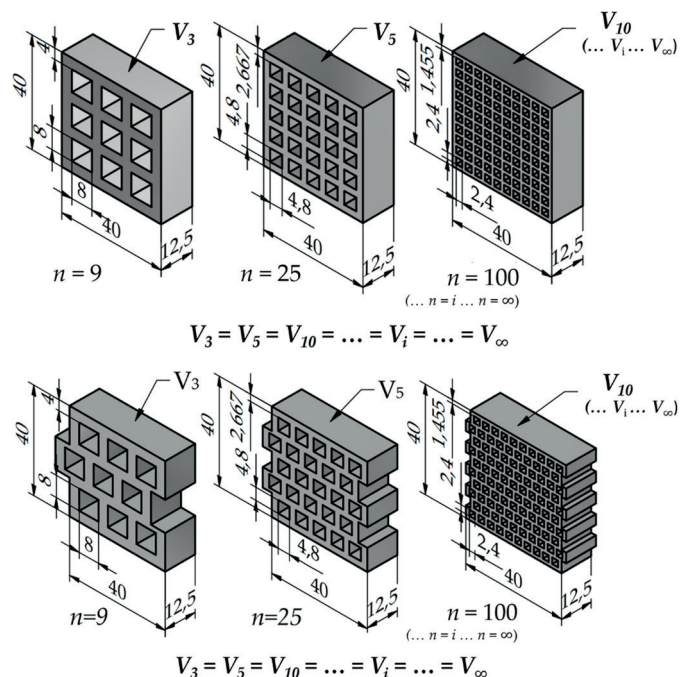
4. ábra: Fraktál geometriák:  
a) Rendezett geometria  
b) Eltolt geometria

rendelkezzenek. Az eltolt elrendezésű mintadarabok megalkotásának alapötlete ezen irányelv volt (4.b ábra).

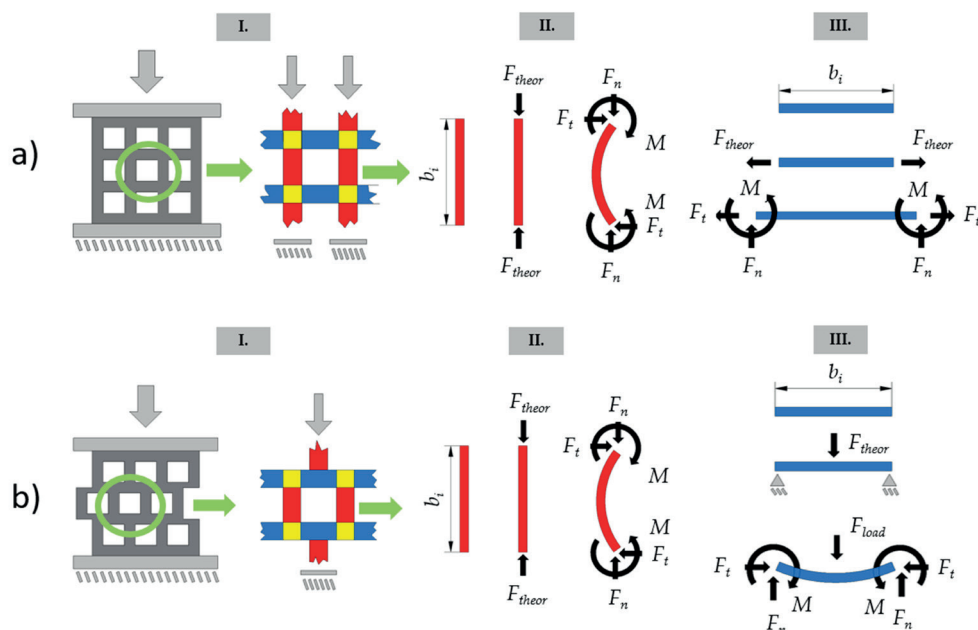
Az újfajta elrendezésnek köszönhetően az erő útvonala megtört, az egyes cellák kölcsönös deformációjának mentén makroszinten a teljes struktúra irányítottan jelentősebb oldalirányú kihajlás nélkül alakváltozhat. A javasolt módosított elrendezés bonyolult geometria átalakítás nélkül, azonos tömeg mellett kíván kedvezőbb viselkedést és paramétereket nyújtani.

A módosított – eltolt – struktúrától fajlagosan kedvezőbb eredményeket várunk az összenyomáshoz szükséges erő, valamint az elnyelt energia tekintetében. A hajlító igénybevétel megjelenése a vízszintes anyagszegmenseken a várakozások alapján egyenletesebb feszültségeloszlást eredményez a geometriában.

A korábban bemutatott egyenletek alapján CAD szoftverben létrehoztuk az alábbi metaanyagokat  $n = 1 - 4 - 9 - 16 - 25 - 36 - 49 - 64 - 81 - 100$  elemszámmal (lásd 5. ábra). A kiinduló értéket úgy vettük fel, hogy  $a = 40$  mm minden geometria



5. ábra: Modellezett metaanyagok:  
a) Rendezett geometriák b) Eltolt geometriák



6. ábra: Alkotókra bontás, az alkotók várható viselkedése;  
a) Rendezett geometria  
b) Eltolt geometria

esetében, valamint a  $b_1 = 24$  mm. (Az elvi tömegük minden esetben 12,2 gramm) A létrehozott metaanyagok néhány jellemző CAD képét ismerteti a 4. ábra.

A vizsgálatra létrehozott modellek méretei alapján a (15) egyenletbe behelyettesítve a konstans "a" valamint "b<sub>1</sub>" értékeket határérték számítást végeztünk, mely szerint a karcsúsági arány ebben az esetben 1,5 értékhez tart:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} (a = 40; b_1 = 24) = \frac{b_1 \cdot (\sqrt{n} + 1)}{\sqrt{n} \cdot (a - b_1)} = 1,5. \quad (16)$$

A függvényt ábrázolva az 5. ábra szerint alakul.

Levonható az a következtetés, hogy ebben az esetben 36 elemszám felett a határértéktől való eltérés mértéke csekély, az elemszám növekedésével mérsékelten csökken. Tehát egy bizonyos elemszám (esetünkben 36) fölött a karcsúsági tényező szinte állandónak tekinthető, mely várakozásaink szerint a zömítésekben is megjelenik.

### 2.3 Makroszerkezeti viselkedés becslése mikroszerkezeti alkotók alapján

Az eltérő felépítés (rendezett – eltolt) makroszerkezeti szintű viselkedését a mintadarabok elemekre bontásával az alábbiak szerint, valamint a 3. ábra segítségével magyarázhatjuk, ahol:

- I. Terhelés előtti állapot,
- II. Teoretikus terhelés – a terhelés megjelenésének pillanatában,
- III. Terhelések a deformált alakon,
- $b_i$  – i kivágott elemszámú metaanyag kivágott méretei,
- $F_{theor}$  – a terhelés megjelenésének pillanatában fellépő elméleti erő,
- $F_{load}$  – a metaanyagot alkotó anyagszegmensekből átadódó terhelés,

- $F_t$  – tangenciális irányú reakcióerő,
- $F_n$  – normál irányú reakcióerő,
- $M$  – terhelő nyomaték.

Az alkotókra bontás határát minden esetben az eltérő elemi terhelésű régiók képezik, mely jelen struktúrák esetében vízszintes (kék) és függőleges (piros), valamint csomóponti (sárga) elemeket eredményez. A várható elméleti deformációs viselkedések egyszerűsítve a 6. ábrán kerülnek megjelenítésre.

A rendezett struktúrában (6. a ábra) a függőleges anyagrégiók tisztán nyomásnak, míg a vízszintes régiók tisztán húzásnak kitettek. Megjegyzendő, hogy főleg a deformáció kezdeti szakaszaiban a nyomott anyagrégiók jelentősebben terheltek a húzottakhoz képest, így a geometria nem egyenletesen kihasznál.

A deformáció előrehaladtával a nyomott régiók kihajlása várható, mely így a csomópontokon keresztül húzó irányú és csavaró terhelést eredményez a vízszintes (kék) elemekre.

Az eltolt rendszerben azonban nem beszélhetünk tisztán húzott régiókról, mivel már a deformációs terhelés kezdeti szakaszában is megjelenik a hajlítás (6. b ábra). A függőleges (piros) anyagrégiók a nyomó terhelés hatását közvetlenül átadják a vízszintes régiók központjában. Eredményül egy kéttámaszú tartót kapunk központi nyomó (hajlító) terheléssel. Természetesen az eltolt rendszer esetében is kijelenthető, hogy a függőleges nyomott régiók kihajlása is fellép a terhelés előrehaladtával. Tehát a 6. ábrán három esetben láthatók a mintarabokat alkotó vízszintes és függőleges anyagrégiók. Az ábrákon a nyugalmi – terhelés előtti egyensúlyi állapotot egy, a terhelés ráadásának pillanatában fellépő terhelési rendszer megjelenítése követi. Végül az ábrák már egy várható alakváltozást mutatnak a fellépő erőkkel, nyomatékokkal.

## 2.4 Metaanyagok létrehozása additív technológiákkal

A mintadarabokat polimer alapanyagból, porágyas, szelektív lézerszintézis (Selective Laser Sintering - SLS) technológiával készítettük. Az additív gyártástechnológiai eljárás során a berendezés apró, finomszemcsésű polimer por rétegeit olvasztja össze egy, a megtervezett geometriai alapján vezérelt lézersugár.

A nyomtatás egy 3D Systems ProX 6100 típusú gépen készültek, DuraForm ProX Pa alapanyagból, vízszintesen elhelyezve a munkatérben. Nyomatás során a polimer por alapanyagot a berendezés hengere vékony, egyenletes rétegben teríti el a munkatérben, melyet a polimer por olvadási pontjának közelébe fűt elő. A lézer így könnyedén az olvadási pontra tudja hevíteni a szükséges szekciókat, melyek magát a mintadarabot alkotják. Egy réteg elkészültét követően a platform lesüllyed (esetükben 50 mikront) és a folyamat megismétlődik.

A nyomtatást követően a mintadarabok üregeiből és felszínéről eltávolításra kerül a polimer por.

## 2.5 Végeelemes (VEM) vizsgálati környezet

Az additív technológiával készült próbatesteket a valós zömítő vizsgálatok mellett végeelemes vizsgálatoknak is alávetettük. Célunk a végeelemes módszer használhatóságának, pontosságának determinálása a fejlesztett metaanyagok esetében.

A valós zömítő, valamint végeelemes módszer eredményeinek összehasonlíthatóságának érdekében először egy, a valós mechanikai körülményeket leíró végeelemes vizsgálatokhoz az ANSYS Workbench 2022 R1 szoftvert használtuk. A zömítés lassú sebességét figyelembe véve az ANSYS Workbench Static Structural modulja került alkalmazásra a vizsgálatok elvégzésére.

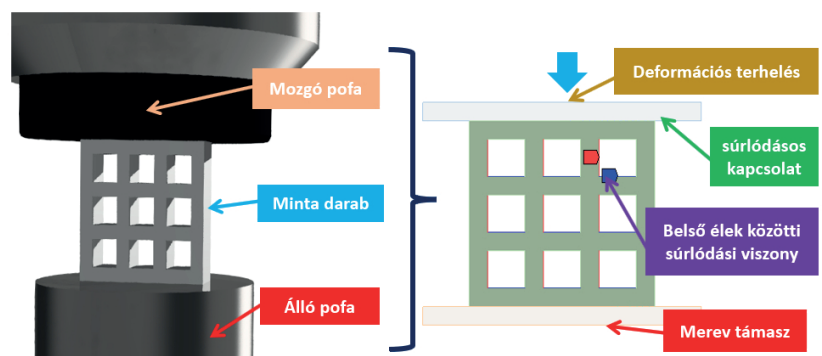
A végeelemes vizsgálatok első lépése a geometria pre-processálása. A mintadarabok felépítését tekintve kétdimenziós (plane stress) szimulációk végzése elegendő, csökkentve így a számítási időt. A mintadarabokat tehát zömítővizsgálatnak vetettük alá, a zömítés során a mintadarab a zömítőgép álló és mozgó pofája közé kerül behelyezésre. A várható viselkedés kellően pontos leképzése érdekében a zömítő berendezés álló és mozgó pofája is a kétdimenziós vizsgálati modell részét képezi. (7. ábra).

## 2.6 Peremfeltételek – terhelések – kontaktok a végeelemes modellben

A valós zömítési körülményeknek megfelelően az álló pofa alsó éle mereven rögzített, transláció és elfordulás nem megengedett. A terhelés deformáció alapú, a szimulációt (a valós zömítéssel ellentétben) a tömörödés pillanatáig vizsgáljuk, ennek oka a metaanyag jellemzése (szemben egy tömör anyag zömítési jellegével). A terhelés a hatását a mozgó pofa felső élén feje ki. A relatív nagy

deformációs terhelés miatt belátható, hogy a vizsgálat a geometriai nemlinearitás problémakörét kimeríti. Az eredmények áttekinthetőbb kiértékelése, valamint a nemlinearitás tekintetében a biztosabb konvergencia érdekében a deformációs terhelés lépésenként (20 lépés – növekményes terhelés) került magadásra.

A geometriai nemlinearitás mellett (lényegében vele párhuzamosan) kontakt nemlinearitás is fellép. A relatív nagy (a mintadarab magassági méretének fele) deformációs terhelés következtében a metaanyag élei egymással kapcsolatba kerülnek, felfekszenek egymáson a deformáció előrehaladtával. Az előzőek értelmében szükséges az egymással potenciálisan kapcsolatba kerülhető él párok kölcsönhatásának valós modellezése. A deformáció előrehaladtával a torzulás következtében az egyes élek egymáson felfekszenek, majd további deformáció hatására sűrűlődvá csúsznak egymáson. A viselkedést végeelemes környezetben sűrűlődasos kontakt párok megadásával lehet közelíteni, 0,35 értékű sűrűlődasos tényezőt [41] beállítva az egymással potenciálisan kapcsolatot létesítő élek, élszegmensek között. A szükséges sűrűlődasos kontakt régiókat, élpárokat vagy esetlegesen él-szegmens párokat mindig az adott mintadarab egyedi viselkedése alapján szükséges egyedileg megadni. A zömítőgép pofái és a mintadarab között szintén sűrűlődasos kapcsolat érvényes. Ebben az esetben a sűrűlődasos tényező értéke (acél-poliamid kapcsolat) 0,2 [42]. Ezt szemlélteti a 7. ábra.



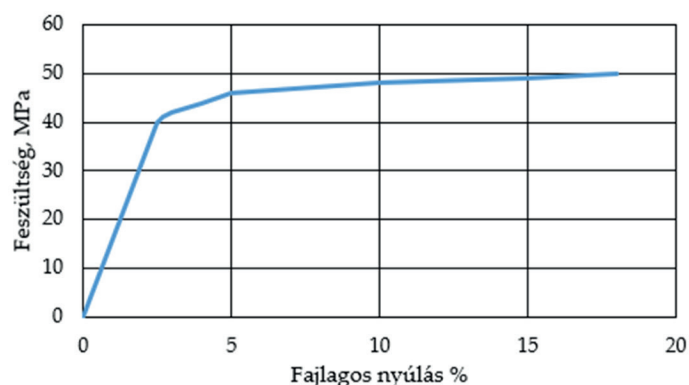
7. ábra: A valós vizsgálati környezet és VEM leképzése

A végeelemes háló kialakításánál fontos volt, hogy minden egyes alkatrész esetében, minden egyes keresztmetszeti vastagság mentén legalább 3 elem kerüljön elhelyezésre. Úgynevezett quadrilateral domináns hálózasi módszert alkalmaztunk lineáris elemrenddel. A deformáció előrehaladtával jelentősen torzul a vizsgálati geometria és a háló is, éppen ezért a mintadarabra adaptív újra-hálózó modult alkalmaztunk. Az analízis beállításánál a geometriai nemlinearitás jegyében a nagy deformációk figyelembevételét is engedélyeztük a megoldó számára.

## 2.7 Használt anyagmodell

Az előző fejezetekben megemlítésre került a probléma nemlineáris jellege, mely az anyagmodell estében is megjelenik. A gyártó által megadott adatok, valamint az előzetesen elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható az anyag nemlineáris viselkedése.





8. ábra: Polimer alapanyag mért feszültség – fajlagos nyúlás értékek [43] alapján

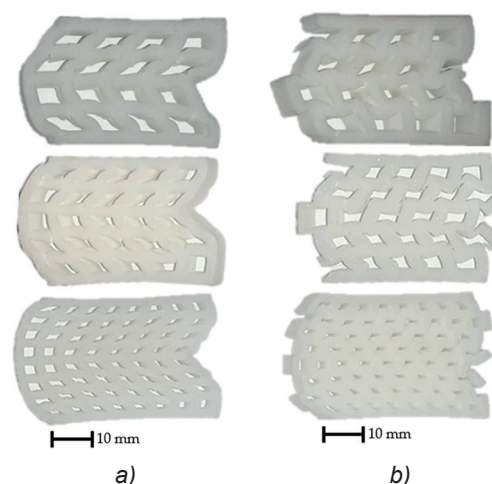
Ezért az anyag viselkedését legjobban egy multilineáris izotrópikus keményedés modellel lehet közelíteni. Az anyagmodell felállításához szükséges sűrűség értéket a gyártó adatlapjából, míg a mért feszültség – elmozdulás értékeket (lásd 8. ábra) korábbi kutatási eredményekből nyertük ki, melyeket átválta definiálható a végeselemes anyagmodell [43]. A zömítő berendezés álló és mozgó pofáira egy, a szimulációs szoftverbe beépített Titán övezet került megválasztásra (rugalmassági modulus  $E = 111,2 \text{ GPa}$ , Poisson tényező:  $\nu = 0,3387$ ).

### 3. Eredmények és diszkusszió

#### 3.1 Zömítési vizsgálatok eredményei

A mintadarabok egy Hegewald & Peschke 40 tonnás mérési határral rendelkező mérőgépen kerültek összezmóltásra. A zömítés sebessége 5 mm/perc volt. A vizsgálat 20 mm deformáció (50 % alakváltozás) eléréséig vagy a teljes tönkremenetelig tartott. Erre mutat néhány jellemző deformációt a 9. ábra. A mintadarabokon a zömítést követően repedések, törések jelentek meg. Megfigyelhető, hogy minél több elemből áll a geometria, annál kisebb a repedések mértéke – jelentősége. Az eltoló és a rendezett struktúra esetében a deformált alakokból egyértelműen megfigyelhető az eltolás hatása, hiszen míg a rendezett geometriák minden esetben oldal irányba „dőlnék” ki (9. a ábra), addig az eltoló geometriák jóval rendezettebben deformálódnak – önmagukba roskadnak (9. b ábra).

A zömítő vizsgálatokkal tehát az egyes mintadarabok erő – elmozdulás viselkedését kívántuk megismerni. A 10. ábrán az erő-elmozdulás diagrammokon látható, hogy a kezdeti – relatív kismértékű rugalmas szakaszt követően megfigyelhető a nemlineáris viselkedés, tönkremenetel. A görbéken megjelenő kiugró feszültségcsúcsok egyértelműen mutatják az egyes régiók – sorok tönkremenetelét. A kezdeti kismértékű rugalmas tartomány a várakozásoknak megfelelő, mivel az alapanyag egy szerkezeti – ridegebb polimer. Megfigyelhető, hogy az eltoló mintadarabok esetében a rugalmas energiatartomány nagyobb mértékű, szemben a rendezett geometriákkal. A jelenség magyarázta a korábban bemutatott, alkotók terhelésére és várható viselkedésére vezethető vissza, a tisztán nyomott rudak rugalmas deformációt nem képesek elszenvedni,



9. ábra: Mintadarabok a vizsgálatot követően ( $n=16-25-64$ ):  
a) Rendezett geometria  
b) Eltoló geometria

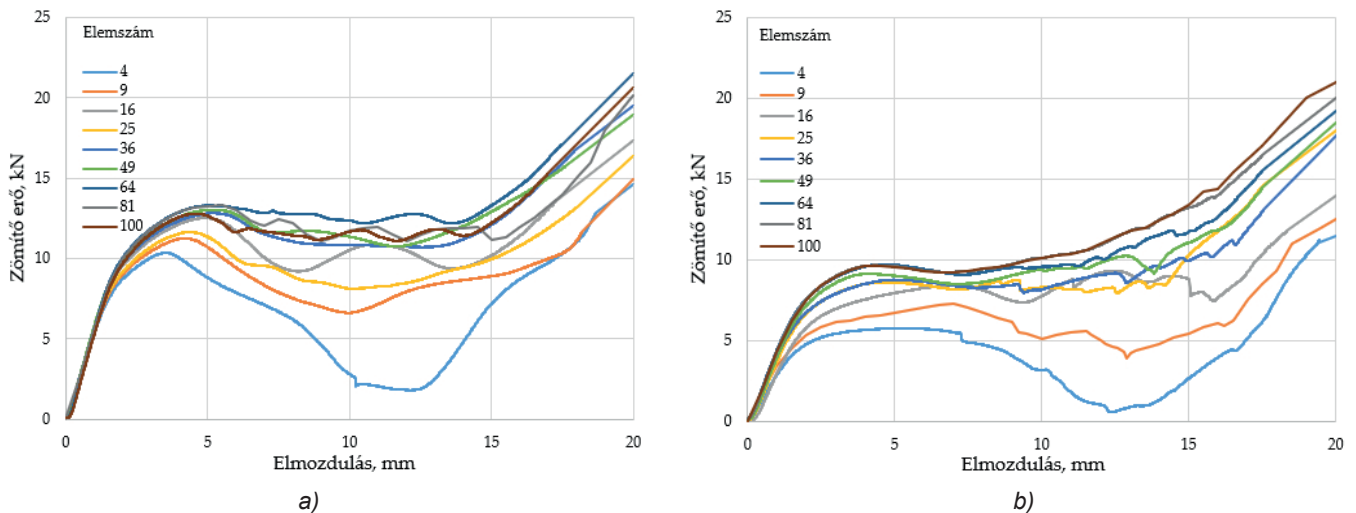
szemben az eltoló geometriával, ahol több alkotót is hajlító nyomterhelés terhel. Az elemszámra az eltoló mintadarabok esetében nincs hatása, míg a rendezett mintadarabok esetében az elemszám növelése növeli a rugalmas tartomány mértékét.

A vizsgált polimer mintadarabok esetében, függetlenül a struktúrától, a deformációs terhelés végéhez közeledve a zömítési erő értéke jelentős növekedésnek indul. A növekedés az alkotó régiók egymáson való felfekvéséből, a tömörödésből ered.

A hagyományos (9. a ábra) mintadarabokban kialakuló feszültségek következtében azok a sarkokban elrepednek, de ezen repedések hatása – mérete és száma is csökken az elemszám növekedésével. A jelenséget remekül tükrözi, hogy a 4 elemszámú minta esetén a zömítés kezdeti csúcsa után az erőben erős visszaesés figyelhető meg a deformáció előrehaladtával (10. a ábra). Mivel a mintadarabok elrepednek, csökken azok terheléssel szembeni ellenállása is. A több elemből álló mintadarabok esetében ez egyre kevésbé releváns, és a 100 elemből álló minta esetén szinte nem is beszélhetünk ilyen jelenségről (visszaesésről).

A zömítés hatására az eltoló (9. b ábra) mintadarabok esetében is jelentkeznek repedések, mely szintén az erő - elmozdulás görbében megfigyelhető visszaesésben jelenik meg (10. b ábra). Kijelenthető, hogy a visszaesés mértéke ebben az esetben is főként csak a 4 elemből álló mintadarabnál figyelhető meg. Az eltoló struktúra a hajlító és nyomó igénybevételnek köszönhetően stabilabb - egyenletesebb viselkedést eredményez, mint a rendezett. A hajlított régiók terheléssel szembeni ellenállása alacsonyabb, mint a nyomottaké, így a görbéken a kezdeti erő csúcs értéke is alacsonyabb.

Megfigyelhető a 2.1 fejezetben levezetett karcsúsági arány (15 számú egyenlet) függvénynek a hatása is, hiszen a függvénynek van határértéke, melyet már a 36 elemből álló mintadarab kellően megközelít. Ebből adódóan, a 36 vagy annál több elemből álló mintadarabok esetében már alig figyelhető meg a visszaesés a zömítő görbén.



10. ábra: A zömítés eredményei vizsgált elemszámokra  
a) Rendezett geometria b) Eltolt geometria

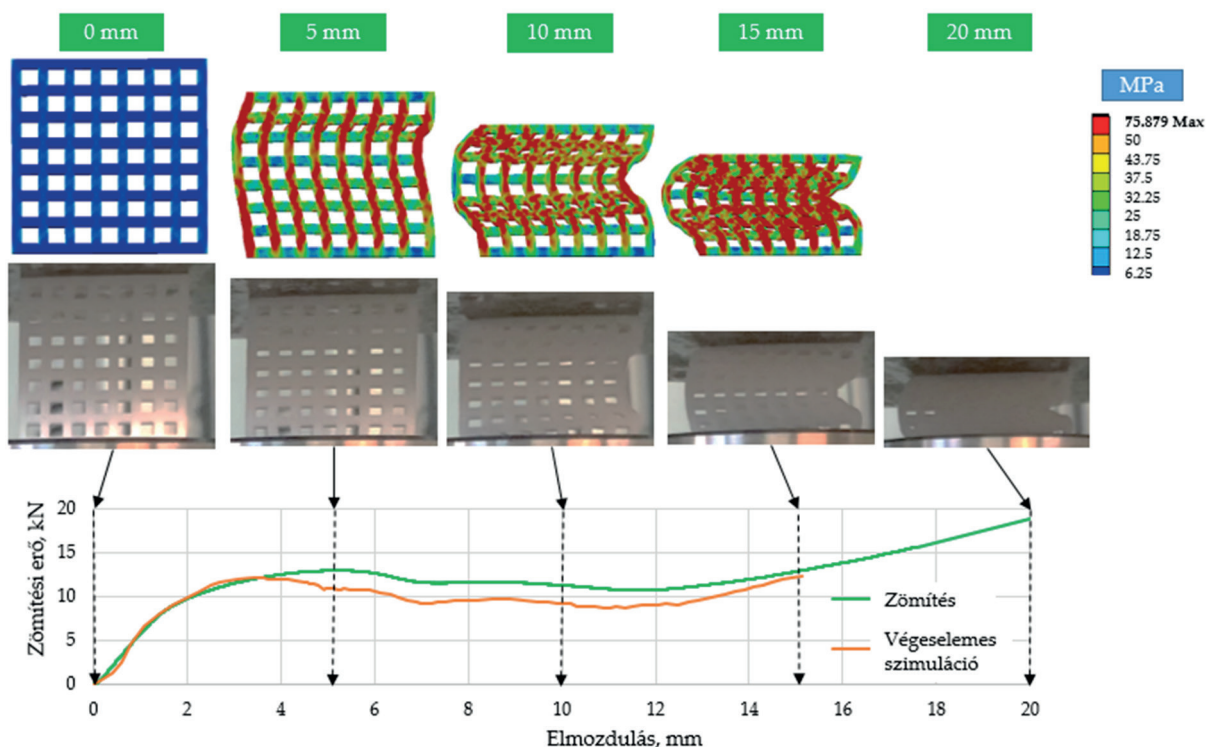
A mintadarabokban megjelenő repedések – törések miatt a végeleemes szimulációk csak a 36 vagy több elemből álló esetekben adnak értékelhető eredményt. A 9. ábrából megfigyelhető, hogy a metaanyag viselkedését tisztán jellemző zömítési út 15mm-ig tart, majd további felfutó szakaszban tömörödés figyelhető meg. Tehát az általunk bemutatott metaanyagokra jellemző karakterisztikus viselkedést a 0-15 mm zömítési szakasz írja le, ezért a végeleemes vizsgálatokat is ezen a szakaszon végeztük.

A 11. ábrán látható eredményekből megfigyelhető, hogy a 37,5%-os zömítés eredményeként a mintadarabok szinte teljesen tömörre zömülnek. A rendezett szerkezet a várákosoknak megfelelően instabilan viselkedett – oldal irányba kidőlt (11-12. ábra). Mint látható, két jellemző

cellaszámú darabnál (n=49 és n=100) a mintadarabok eltérő irányba deformálódtak, mely beigazolta a szerkezet nem tervezhető viselkedését (ez minden rendezett geometriájú struktúránál hasonlóan ment végbe).

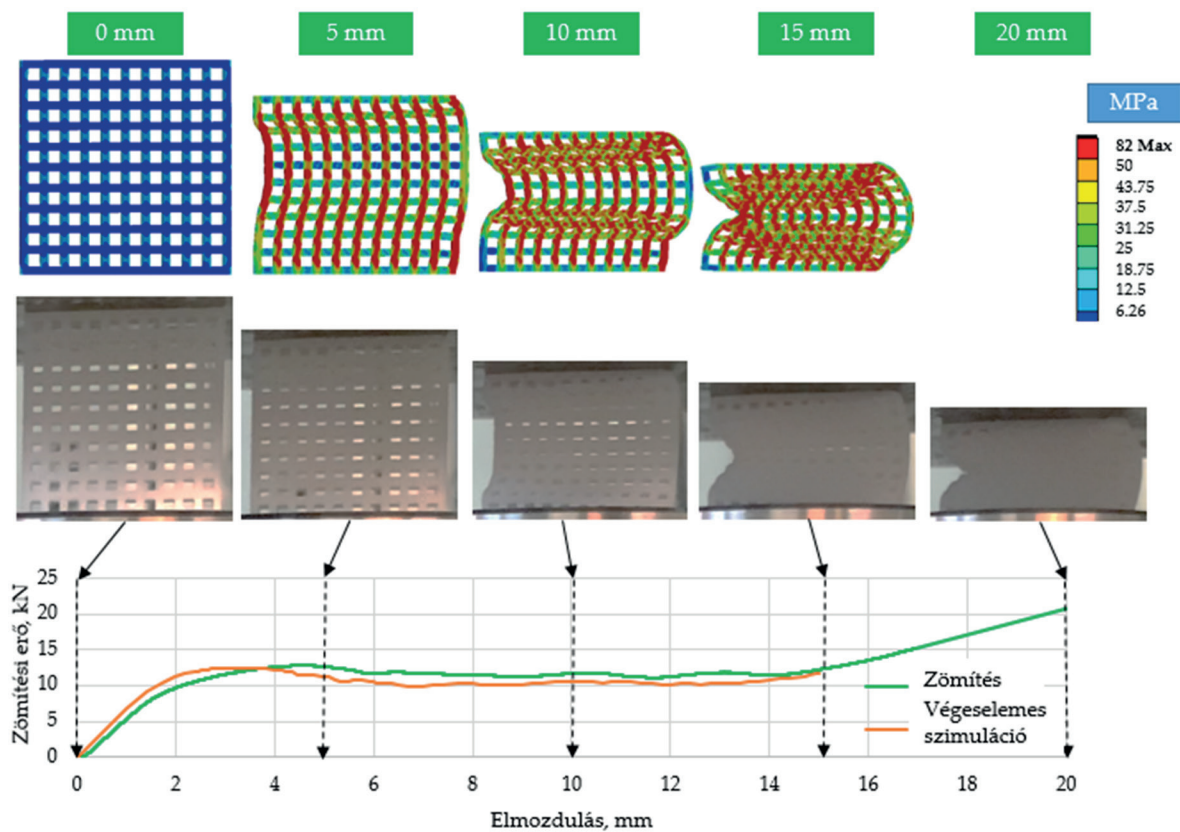
Megfigyelhető ugyanakkor, hogy a végeleemes szimuláció és a valós zömítés görbéi jó egyezést mutatnak (11-13. ábra), mely a végeleemes módszer relatív nagy deformációs viselkedésre való pontos alkalmazhatóságát jelenti.

Az eltolt mintadarabok zömítése során egy jóval rendezettebb – önmagába roskadó deformációs viselkedést figyelhetünk meg a 12. ábrán. A deformációs viselkedés és a zömítéshez szükséges erő alakulását remekül követi a végeleemes módszer ennél a struktúránál is.

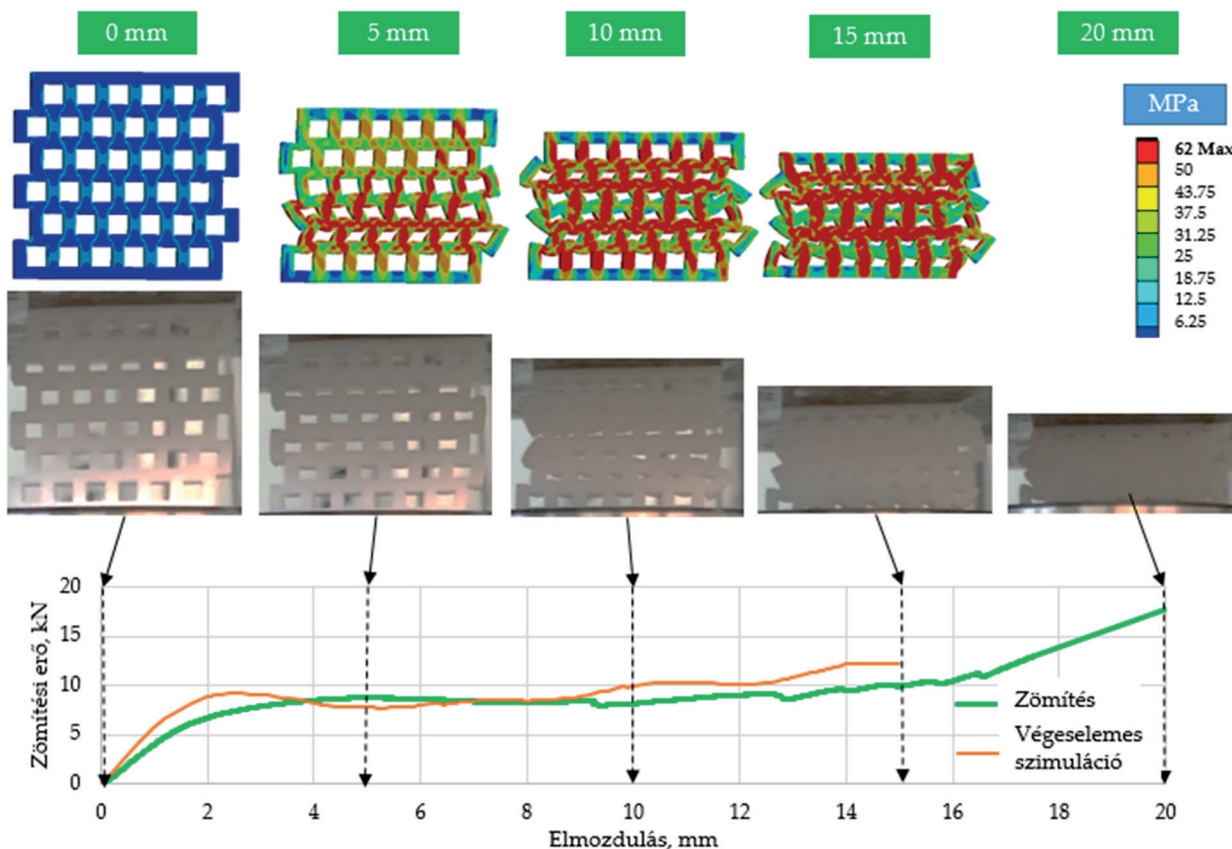


11. ábra: A végeleemes szimuláció eredményeinek összehasonlítása a valós nyomóvizsgálatokkal n=49 elem esetén





12. ábra: A végeselemes szimuláció eredményeinek összehasonlítása a valós nyomóvizsgálatokkal  $n=100$  elem esetén



13. ábra: A végeselemes szimuláció eredményeinek összehasonlítása a valós nyomóvizsgálatokkal  $n=36$  elem esetén

### 3.2 Az eltott és rendezett szerkezetek által elnyert energiák elemzése

A deformációs viselkedés mellett a mintadarabok a zömítés során elnyelt energia mértékével is jellemezhetők.

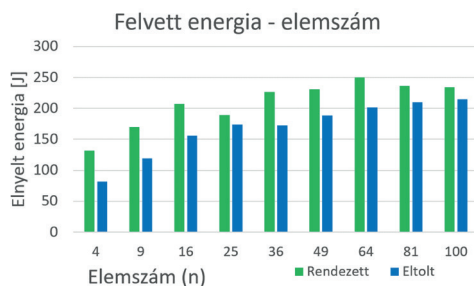
**1. táblázat:** A vizsgált metaanyagok geometriák által elnyelt energia értéke

Elem szám, n	Elnyelt energia (rendezett), J	Elnyelt energia (eltolt), J
4	131,5	81,6
9	169,7	119,0
16	206,9	155,5
25	189,1	174,1
36	226,4	172,2
49	230,5	188,2
64	250,0	201,3
81	236,0	209,8
100	234,1	215,0

Az elnyelt energiát (az 50%-os, vagyis a 20 mm-es deformációs tartományban) a 9. ábrán látható görbék alatti terület határozza meg. Az 1. táblázat tartalmazza az elnyelt energiák mértékét.

Az 1. táblázat azt is megmutatja számunkra, hogy az eltott geometriák minden esetben kisebb mértékű energiát képesek felvenni.

A 14. ábra alapján megfigyelhető, hogy az elemszám növekedésével a rendezett geometria esetében az instabil kihajlási viselkedésből adódóan az elnyelt energia értéke nincs szoros kapcsolatban az elemszámmal. Az eltott geometria esetében viszont az elnyelt energia a kiszámítható deformációs viselkedés következtében monoton növekszik. Ez vélhetően a karcsúsági tényezővel van kapcsolatban.



14. ábra: A mintadarabok által elnyelt energia

### 4. Konklúzió és összefoglalás

Jelen munkában egy egyszerű felépítésű, fraktál inspirált metaanyag családot és annak származtatását, valamint vizsgálatát mutattuk be, amelyek segítenek megérteni a viselkedésüket. A komplexebb metaanyagokkal szemben a bemutatott szerkezetek szélesebb körben alkalmazhatók, a levezetett matematikai alapok alapján pedig bármilyen elemszámmal megalkothatók (fenntartva az azonos felszín, azonos térfogat, azonos tömeg alapelveit). A tanulmányban a rendezett felépítéssel szemben vizsgáltuk a

geometriák eltolásának hatását. Az eltott szerkezeteket a kedvezőbb deformációs viselkedés elérésének reményében hoztuk létre. A vizsgálatunk alapján az alábbi következtetések vonhatóak le:

- Az elemszám növelésével egyre stabilabb viselkedést érhetünk el, a terheléssel szembeni ellenállás a teljes deformációs tartományon növekszik.
- Az elemszám növekedésével mindkét vizsgált struktúra esetében növekszik az elnyelt energia mértéke.
- Mivel a rendezett szerkezet tisztán nyomott elemekből áll, a teherbírása és az elnyelt energia mértéke is nagyobb. Ugyanakkor a vizsgálatok eredményéből belátható, hogy az eltott szerkezetek deformációs viselkedése tervezhető – kiszámítható a hagyományos szerkezettel szemben. A kiszámítható, tervezhető viselkedés alapkövetelmény a nagyteljesítményű metaanyagokkal szemben.
- Az eltott szerkezetek lágyabbak – összenyomásukhoz átlagosan 27%-al kevesebb erő szükséges.
- A végeelemes szimulációkból az is megfigyelhető, hogy az eltott mintadarabok feszültségeloszlása egyenletesebb.
- A végeelemes módszer 36 elemszám felett pontos – megbízható eredményeket mutatott, így a bemutatott peremfeltételek mellett alkalmazható a módszer.
- Általánosan kijelenthető, hogy az elemszám növelésnek egy adott pontot követően nincs jelentős hatása a mechanikai tulajdonságokra.
- Újszerű metaanyag tervezésekor célszerűbb egyedi, a hagyományos formáktól eltérő szerkezetet megalkotni. Jelen publikáció remekül szemléltette, hogy a hagyományos négyzetes elrendezés eltolásával (mely egy egyszerű geometria módosítás) mennyivel kedvezőbb mechanikai tulajdonságok érhetők el.

### Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium által az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP-23-3) támogatásával készült.

A mérésekhez felhasznált mintadarabok az EBK Hungary Kft. munkatársainak köszönhetően készültek el.

### Irodalomjegyzék

- [1] Pickover, C. A. The math book: from Pythagoras to the 57th dimension, 250 milestones in the history of mathematics. Sterling Publishing Company, Inc. 2009, ISBN 978-1-4027-5796-9.
- [2] Mandelbrot, B. B., & Mandelbrot, B. B. The fractal geometry of nature 1982, (Vol. 1). New York: WH freeman.
- [3] Schaefer, S.; Levin, D.; & Goldman, R. Subdivision Schemes and Attractors. Symposium on Geometry Processing 2015, pp. 171-180.
- [4] Majewski, M. A tutorial on the realistic visualization of 3D Sierpinski fractals. Computers & Graphics 1998, 22(1), pp. 129-142, [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(97\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(97)00088-5)
- [5] Bunde, A., & Havlin, S. (Eds.). Fractals in science. Springer 2013.

- doi:10.1007/978-3-642-77953-4.
- [6] Ghanbarian-Alavijeh, B.; Millán, H.; & Huang, G. A review of fractal, prefactal and pore-solid-fractal models for parameterizing the soil water retention curve. *Canadian Journal of Soil Science* 2011, 91(1), pp. 1-14.
- [7] Riva, L.; Ginestra, P. S.; Pandini, S.; & Pasini, C. Production and characterization of the Poisson's ratio of cellular structured metamaterials by additive manufacturing. *Procedia CIRP* 2022, 110, pp. 378-382.
- [8] Zhu, Y.; Jiang, S.; Zhang, Q.; Li, J.; Yu, C.; & Zhang, C. A novel monoclinic auxetic metamaterial with tunable mechanical properties. *International Journal of Mechanical Sciences* 2022, 107750, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107750>
- [9] Guo, S.; Gao, R.; Tian, X.; & Liu, S. A 3D metamaterial with negative stiffness for six-directional energy absorption and cushioning. *Thin-Walled Structures* 2022, 180, 109963, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109963>
- [10] Sharma, D.; Hiremath, S. S.; & Kenchappa, N. B. Bio-inspired Ti-6Al-4V mechanical metamaterials fabricated using selective laser melting process. *Materials Today Communications* 2022, 33, 104631, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104631>
- [11] Zhang, X.; He, X.; & Wu, L. Experimental investigation of thermal architected metamaterials for regulating transient heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2022, 193, 122960, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122960>
- [12] Sha, W.; Xiao, M.; Huang, M.; & Gao, L. Topology-optimized freeform thermal metamaterials for omnidirectionally cloaking sensors. *Materials Today Physics* 2022, 28, 100880, <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100880>
- [13] Zhang, L.; Bai, Z.; & Chen, Y. Dual-functional hierarchical mechanical metamaterial for vibration insulation and energy absorption. *Engineering Structures* 2022, 271, 114916, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114916>
- [14] Jiang, W.; Yin, G.; Xie, L.; & Yin, M. Multifunctional 3D lattice metamaterials for vibration mitigation and energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences* 2022, 233, 107678, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107678>
- [15] Zhao, P. Zheng, B. B.; Zhong, R. C.; Chen, X.; Fu, M. H.; & Hu, L. L. A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect. *Materials & Design* 2019, 171, 107700, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107700>; Zhang, K.; Qi, L.; & Deng, Z. 3D chiral mechanical metamaterial for tailored band gap and manipulation of vibration isolation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2022, 180, 109430, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109430>.
- [16] Zolfagharian, A.; Bodaghi, M.; Hamzehei, R.; Parr, L.; Fard, M.; & Rolfe, B. F. 3D-Printed Programmable Mechanical Metamaterials for Vibration Isolation and Buckling Control. *Sustainability* 2022, 14(11), 6831, <https://doi.org/10.3390/su14116831>
- [17] Deshpande, V. S.; Ashby, M. F.; & Fleck, N. A. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures. *Acta materialia* 2001, 49(6), pp. 1035-1040, [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00379-7)
- [18] Chen, E., Luan, S., & Gaitanaros, S. On the compressive strength of brittle lattice metamaterials. *International Journal of Solids and Structures* 2022, 257, 111871, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111871>
- [19] de Jonge, C. P.; Kolken, H. M.; & Zadpoor, A. A. Non-auxetic mechanical metamaterials. *Materials* 2019, 12(4), 635, <https://doi.org/10.3390/ma12040635>
- [20] Wagner, M. A.; Lumpe, T. S.; Chen, T.; & Shea, K. Programmable, active lattice structures: Unifying stretch-dominated and bending-dominated topologies. *Extreme Mechanics Letters* 2019, 29, 100461, <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100461>
- [21] Yin, S.; Wu, L.; & Nutt, S. Stretch-bend-hybrid hierarchical composite pyramidal lattice cores. *Composite structures* 2013, 98, pp. 153-159, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.004>
- [22] Al Nashar, M.; & Sutradhar, A. Design of Hierarchical Architected Lattices for Enhanced Energy Absorption. *Materials* 2021, 14(18), 5384, <https://doi.org/10.3390/ma14185384>
- [23] Zhong, R.; Fu, M.; Chen, X.; Zheng, B.; & Hu, L. A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression-torsion properties. *Composite Structures* 2019, 226, 111232, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111232>
- [24] Zheng, B. B.; Zhong, R. C.; Chen, X.; Fu, M. H.; & Hu, L. L. A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect. *Materials & Design* 2019, 171, 107700, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107700>
- [25] Wang, L.; & Liu, H. T. 3D compression-torsion cubic mechanical metamaterial with double inclined rods. *Extreme Mechanics Letters* 2020, 37, 100706, <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100706>
- [26] Li, X.; Yang, Z.; & Lu, Z. Design 3D metamaterials with compression-induced-twisting characteristics using shear-compression coupling effects. *Extreme Mechanics Letters* 2019, 29, 100471, <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100471>
- [27] Wang, Y. B.; Liu, H. T.; & Zhang, D. Q. Compression-torsion conversion behavior of a cylindrical mechanical metamaterial based on askew re-entrant cells. *Materials Letters* 2021, 303, 130572, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130572>
- [28] Ren, C.; Yang, D.; & Qin, H. Mechanical performance of multidirectional buckling-based negative stiffness metamaterials: an analytical and numerical study. *Materials* 2018, 11(7), 1078, <https://doi.org/10.3390/ma11071078>
- [29] Shruti, M.; Hemanth, N. S.; Badgayan, N. D.; & Sahu, S. K. Compressive behavior of auxetic structural metamaterial for lightweight construction using ANSYS static structural analysis. *Materials Today: Proceedings* 2021, 38, pp. 12-17, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.410>
- [30] Wu, W.; Liu, P.; & Kang, Z. A novel mechanical metamaterial with simultaneous stretching-and compression-expanding property. *Materials & Design* 2021, 208, 109930, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109930>
- [31] Zhu, Y.; Jiang, S.; Zhang, Q.; Li, J.; Yu, C.; & Zhang, C. A novel monoclinic auxetic metamaterial with tunable mechanical properties. *International Journal of Mechanical Sciences* 2022, 107750, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107750>
- [32] AlQaydi, H. A.; Krishnan, K.; Oyebanji, J.; Lee, D. W.; Alneyadi, S. A.; Ghisi, N.; ... & Aboulkhair, N. T. Hybridisation of AISi10Mg lattice structures for engineered mechanical performance. *Additive Manufacturing* 2022, 102935, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102935>
- [33] AlQaydi, H. A.; Krishnan, K.; Oyebanji, J.; Lee, D. W.; Alneyadi, S. A.; Ghisi, N.; ... & Aboulkhair, N. T. Hybridisation of AISi10Mg lattice structures for engineered mechanical performance. *Additive Manufacturing* 2022, 102935, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102935>
- [34] Yang, X.; Yang, Q.; Shi, Y.; Yang, L.; Wu, S.; Yan, C.; & Shi, Y.



Effect of volume fraction and unit cell size on manufacturability and compressive behaviors of Ni-Ti triply periodic minimal surface lattices. Additive Manufacturing 2022, 54, 102737, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102737>

- [35] Xiao, Z.; Yang, Y.; Xiao, R.; Bai, Y.; Song, C.; & Wang, D. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. Materials & Design, 2018 143, 27-37, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.023>
- [36] Osman, M. M.; Shazly, M.; El-Danaf, E. A.; Jamshidi, P.; & Attallah, M. M. Compressive behavior of stretched and composite microlattice metamaterial for energy absorption applications. Composites Part B: Engineering 2020, 184, 107715, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107715>
- [37] Tan, X.; Chen, S.; Zhu, S.; Wang, B.; Xu, P.; Yao, K.; & Sun, Y. Reusable metamaterial via inelastic instability for energy absorption. International Journal of Mechanical Sciences 2019, 155, pp. 509-517, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.02.011>
- [38] Zhang, H.; Chen, P.; Zhang, Z.; Lin, G.; & Sun, W. Structural response and energy absorption assessment of corrugated wall mechanical metamaterials under static and dynamic compressive loading. International Journal of Impact Engineering 2022, 172,

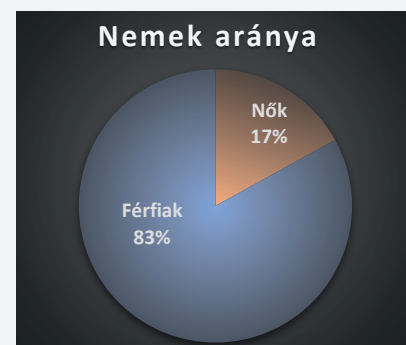
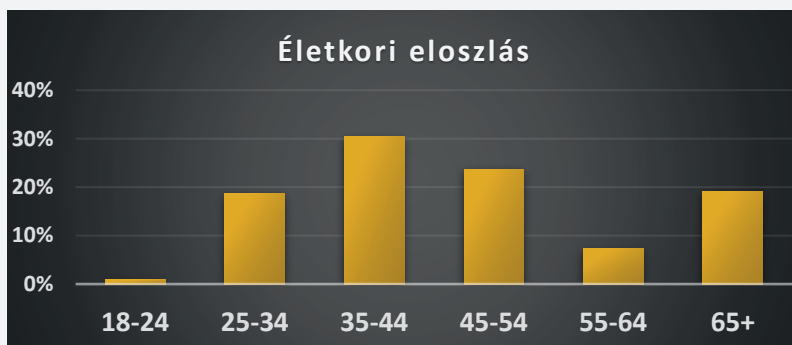
104427, <https://doi.org/10.1016>

- [39] Park, K. M.; Min, K. S.; & Roh, Y. S. Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements. Materials, 2022, 15(1), 97. <https://doi.org/10.3390/ma15010097>
- [40] Truskiewicz, E.; Thalhamer, A.; Rossegger, M.; Vetter, M.; Meier, G.; Rossegger, E.; ... & Berer, M. Mechanical behavior of 3D-printed polymeric metamaterials for lightweight applications. Journal of Applied Polymer Science 2021, 139(6), 51618, <https://doi.org/10.1002/app.51618>
- [41] Unal, H., & Mimaroglu, A. Friction and wear performance of polyamide 6 and graphite and wax polyamide 6 composites under dry sliding conditions. Wear, 2012, 289, 132-137.
- [42] Van De Velde, F., & De Baets, P. The friction and wear behaviour of polyamide 6 sliding against steel at low velocity under very high contact pressures. Wear, 1997, 209(1-2), pp. 106-114, [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07500-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07500-X)
- [43] Lindberg, A.; Alfthan, J.; Pettersson, H.; Flodberg, G.; & Yang, L. Mechanical performance of polymer powder bed fused objects–FEM simulation and verification. Additive Manufacturing 2018, 24, pp. 577-586, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.009>



## ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA - 3 ÉVE A FACEBOOKON

Facebook oldalunk 3 éves lett, mely alatt **közel 230 kedvelőnk** lett. A legtöbb olvasónk Miskolcra, Budapestre, és Debrecenre követi a facebook oldalunkat, melynek nemek közötti és életkori eloszlása a következő:



Legtöbb aktivitást mutató bejegyzésünk a LINDE által támogatott lapszámunk megjelenéséről megosztott hír.

