



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

SZÉLES LEVENTE

Geometriai változtatások hatáselemzése
az auxetikus lattice struktúrák tulajdonság
javításának céljából

Témavezető: Dr. Horváth Richárd

**ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2025.03.30.

Jelölés- és rövidítés jegyzék

Jelölésjegyzék

Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
a	$[mm]$	Fraktál ihletésű mintadarabok befoglaló mérete
b_1	$[mm]$	Egyetlen elemi cellából álló, fraktál ihletésű mintadarab kivágott anyagrészének mérete
b_2	$[mm]$	Négy elemi cellából álló, fraktál ihletésű mintadarab kivágott anyagrészének mérete
b_3	$[mm]$	Kilenc elemi cellából álló, fraktál ihletésű mintadarab kivágott anyagrészének mérete
b_i	$[mm]$	i darab elemi cellából álló, fraktál ihletésű mintadarab kivágott anyagrészének mérete ($i = \sqrt{n}$)
c_i	$[mm]$	i darab elemi cellából álló, fraktál ihletésű mintadarab alkotó (megmaradó) anyagrészének mérete
n	$[-]$	Elemszám
$A_1, A_2, A_3 \dots A_i$	$[mm^2]$	Fraktál ihletésű mintadarabok keresztmetszeti mérete
$V_1, V_2, V_3 \dots V_i$	$[mm^3]$	Fraktál ihletésű mintadarabok térfogati mérete
$F_{elm.}$	$[N]$	A fraktál ihletésű mintadarabok alkotóra bontása során a terhelés pillanatában megjelenő elméleti erő
$F_{terhelés}$	$[N]$	A fraktál ihletésű mintadarabok alkotóiról egymásnak átadódó terhelés mértéke
F_t	$[N]$	A fraktál ihletésű mintadarabok alkotóra bontása során a csomópontban megjelenő tangenciális irányú reakcióerő
F_n	$[N]$	A fraktál ihletésű mintadarabok alkotóra bontása során a csomópontban megjelenő normális irányú reakcióerő
M	$[Nm]$	A fraktál ihletésű mintadarabok alkotóra bontása során a csomópontban megjelenő terhelőnyomaték
d_0	$[mm]$	A kettősen homorú méhsejt elemi cella kezdeti <i>offset</i> paraméter értéke



Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
φ_0	[°]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella kezdeti <i>deg</i> paraméter értéke
t	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella homorú élének hossza
L	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella félszélessége
H	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella félmagassága
ψ	[°]	Az eredeti méhsejt cella homorú és vízszintes éle által bezárt szög
l	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella felső homorú élének hossza
s	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella alsó homorú élének hossza
x_0	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella kezdeti fél szélessége
w	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella mélysége
b	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella névleges vastagsága
α	[°]	A kettősen homorú méhsejt l és s hosszúságú élei által bezárt szög
y	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella magassága – értéke változik a deformáció során
x	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella szélessége – értéke változik a deformáció során
d	[mm]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella deformációs terhelés hatására változó <i>offset</i> értéke
φ	[°]	A kettősen homorú méhsejt elemi cella deformációs terhelés hatására változó <i>deg</i> értéke
ε_x	[%]	A kettősen homorú méhsejt tengelyirányú fajlagos nyúlása
ε_y	[%]	A kettősen homorú méhsejt keresztirányú fajlagos nyúlása



Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
μ	[-]	Poisson tényező
x_m	[mm]	A kettősen homorú méhsejt kritikus x-irányú deformációja
y_m	[mm]	A kettősen homorú méhsejt kritikus y-irányú deformációja
φ^*	[°]	A φ szög kritikus pillanathoz tartozó értéke
λ	[-]	Karcsúsági tényező
n	[-]	A kettősen homorú méhsejt mintadarab függőleges rudat alkotó elemeinek a száma
S	[mm ²]	A kettősen homorú méhsejt mélység menti keresztmetszete, kihajlás számítás során
I_{min}	[mm ⁴]	A kettősen homorú méhsejt legkisebb másodrendű keresztmetszeti nyomatéka
λ_g	[-]	Kritikus karcsúsági tényező
E	[MPa]	A kettősen homorú méhsejt mintadarabok alapanyagának rugalmassági modulusa
σ_p	[MPa]	A kettősen homorú méhsejt mintadarabok alapanyagának rugalmassági modulus értékéhez tartozó feszültség
F_{cr}	[N]	A kettősen homorú méhsejt mintadarabok kritikus, kihajlást előidéző terhelői erő értéke
$E_{felvett}$	[mJ]	A mintadarabok által felvett energia
$E_{fajlagos}$	[mJ/g]	A mintadarabok által felvett, tömegre fajlagosított energia
F_{max}	[N]	A maximális zömítő erő / zömítési ellenállás
$F(x)$	[-]	Erő–elmozdulás függvény
ε_{xx}	[-]	Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt két vizsgálati pont közti fajlagos nyúlása adott irányban
ε_{xAVG}	[-]	Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt tengelyirányú fajlagos nyúlása
ε_{yAVG}	[-]	Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt keresztirányú fajlagos nyúlása



Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
$d_{E_{felvett}}$	[-]	A felvett energia kívánatossági függvénye a kettősen homorú mintadarabok esetében
$d_{F_{max}}$	[-]	A maximális zömítési ellenállás kívánatossági függvénye a kettősen homorú mintadarabok esetében
$d_{E_{fajlagos}}$	[-]	A specifikus felvett energia kívánatossági függvénye a kettősen homorú mintadarabok esetében
D	[-]	Kompozit kívánatossági függvény

Rövidítésjegyzék:

Rövidítés	Megnevezés
PPR	Angol rövidítés; <i>Positive Poisson's Ratio</i> – pozitív Poisson tényező
NPR	Angol rövidítés; <i>Negative Poisson's Ratio</i> – negatív Poisson tényező
ZPR	Angol rövidítés; <i>Zero Poisson's Ratio</i> – nulla értékű Poisson tényező
$mSLA$	pontosabban maszkolt sztereolitográfiával
FDM	Angol rövidítés; <i>Fused Deposition Modelling</i> - olvasztásos huzalfelrakás



Tartalomjegyzék

Jelölés- és rövidítés jegyzék	2
Jelölésjegyzék	2
Rövidítésjegyzék:	5
Értekezés áttekintő folyamatára	9
1 Bevezetés	10
2 Szakirodalmi áttekintés	12
2.1 A metaanyagok csoportosítása és az auxetikusság	12
2.2 Az auxetikus méhsejt-szerkezet ismertetése és hiányosságai	14
2.3 Rácsszerkezetek tulajdonság javítására szolgáló módszerek bemutatása	15
2.3.1 Részleges geometriai módosításon alapuló módszerek	16
2.3.2 Beépített geometriai módosításon alapuló módszerek	17
2.3.3 Kombinációs módszerek	18
2.3.4 Gradiens tervezés	19
2.3.5 Alapanyag-kombinációs és több alapanyagon alapuló módszerek	19
2.4 A metaanyagok viselkedését alapvetően befolyásoló tényezők	21
2.4.1 Az alkotók igénybevétele és a deformációs viselkedés közötti kapcsolat	21
2.4.2 Az elemszám hatása	22
2.4.3 További hatások	22
3 Célkitűzés, nyitott kérdések	23
3.1 Célkitűzések megfogalmazása:	24
4 Anyagok, eszközök és módszerek	25
4.1 A kísérletek során felhasznált mérő berendezések	25
4.1.1 Szakítóvizsgálatok	25
4.1.2 Zömítő vizsgálatok	25
4.2 A kísérletek során felhasznált mintadarabokat előállító additív technológiájú berendezések	26
4.2.1 Szelektív lézerszinterézéssel (SLS) előállított darabok	26
4.2.2 Maszkolt sztereolitográfia (mSLA) technológiával készült nyomatok	26
4.3 A végelelemes környezet bemutatása	27
4.4 Mintadarabok anyagai	29



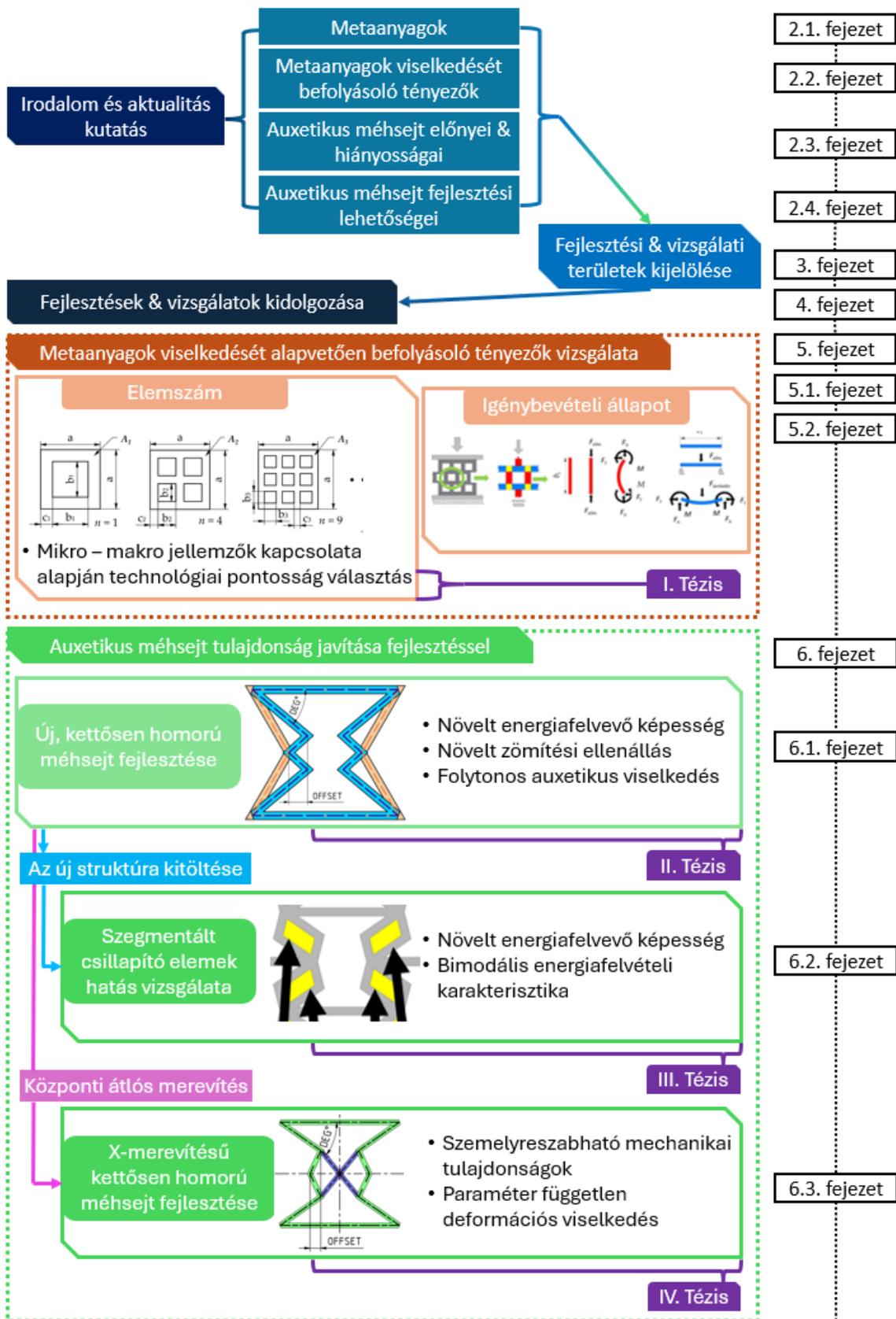
5	Geometriai paramétereknek a rácsszerkezetek tulajdonságira gyakorolt hatásának vizsgálata összehasonlítható, önismétlődő kísérleti elrendezéssel.....	31
5.1	Az elemszám hatásának vizsgálata	31
5.1.1	Az önismétlődő mintadarabok matematikai leírása.....	32
5.1.2	Mintadarabok készítése	35
5.1.3	A végelelemes vizsgálatokhoz használt anyagmodell	35
5.1.4	A vizsgálatok eredménye.....	35
5.2	Az alkotó szegmensek igénybevételi módjának hatása.....	36
5.2.1	Eltérő igénybevételi állapotú mintadarabok létrehozása.....	37
5.2.2	A makroszerkezeti viselkedés becslése mikroszerkezeti alkotók alapján.....	38
5.2.3	A vizsgálatok eredménye.....	39
6	Az auxetikus méhsejt szerkezet tulajdonságjavítása.....	44
6.1	Kettősen homorú kialakítás.....	44
6.1.1	Kettősen homorú kialakítás létrehozása	44
6.1.2	A kettősen homorú szerkezet és mintadarabok geometriai jellemzése	45
6.1.3	Mintadarabok készítése	46
6.1.4	A végelelemes vizsgálatok előkészítése	47
6.1.5	Az újonnan megalkotott (kettősen homorú szerkezet) elemi cella hatása	48
6.1.6	A kettősen homorú szerkezet deformációs viselkedése.....	49
6.1.7	A végelelemes szimulációval elért eredmények.....	54
6.1.8	Az eredmények értékelése	57
6.1.9	A kettősen homorú auxetikus méhsejt Poisson tényezője	58
6.2	Szegmentált csillapítóelemekkel ellátott kettősen homorú geometria	60
6.2.1	Szegmentált kitöltés ismertetése	60
6.2.2	Mintadarabok készítése	61
6.2.3	Az abszorber elemek hatása.....	63
6.2.4	Az eredmények magyarázata – deformációs viselkedés.....	67
6.2.5	A tulajdonságok paraméterfüggése	69
6.3	A paraméterfüggetlen deformációs viselkedés elérése	70
6.3.1	Hipotézis a paraméterfüggetlen deformációs viselkedés elérésére.....	70
6.3.2	A mintadarabok készítése	72
6.3.3	Az újonnan létrehozott merevített elemi cella kialakítás hatása	74
6.3.4	A zömítő vizsgálat eredményei	74



6.3.5	A felvett energia értékek elemzése	78
6.3.6	A végeselemes eredmények validálása	80
6.3.7	A deformációs viselkedés és Poisson tényező elemzése	81
6.3.8	A feszültség eloszlás elemzése	84
7	Összefoglalás	86
8	Új tudományos eredmények – tézisek	88
8.1	Bevezető gondolatok	88
8.2	I. Tézis	89
8.3	II. Tézis	90
8.4	III. Tézis	91
8.5	IV. Tézis	92
9	Summary	93
10	A tudományos eredmények hasznosulása	95
	Köszönetnyilvánítás	97
11	Mellékletek	98
1.1	Melléklet: A várható viselkedés előrejelzése analitikus közelítéssel	98
1.2	Melléklet: Optimumkeresés	104
12	Disszertációval kapcsolatos publikációk	107
12.1	Folyóirat közlemények:	107
12.2	Konferencia kiadványok:	108
13	Felhasznált irodalom	109

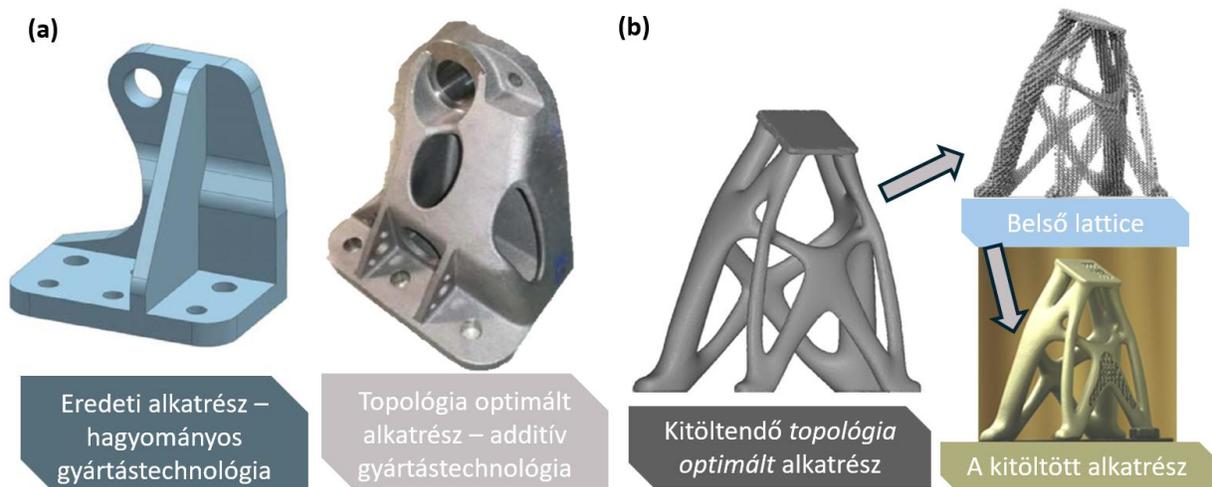


Értekezés áttekintő folyamatábra



1 Bevezetés

A hagyományos anyageltávolítás alapú gyártástechnológiákkal, mint a forgácsolás, (pl.: marás, CNC megmunkálások) előállítható termékek alakja jelentősen korlátozott. Többek között nem hozhatók létre szabályos, tervezett viselkedésű belső térkitöltő szerkezetekkel (úgynevezett lattice struktúrákkal) ellátott alkatrészek. A belső térkitöltő szerkezetek egyedi, kiemelkedő, tervezhető tulajdonságokat kölcsönözhetnek egy terméknek, sőt akár olyan egyedi tulajdonságok is elérhetők, melyekkel az alapanyag nem rendelkezik az. Az additív technológiák megjelenésével ezek a geometriai kötöttségek megszűntek, de természetesen az additív technológiák megjelenése a belső térkitöltő szerkezeteken kívül számos egyéb tervezői kényszert is feloldott, így komplex szabadformájú alkatrészek is megvalósíthatók. A feloldott tervezői kényszerek, az additív gyártástechnológiák és a fejlett szoftverek, módszerek, mint például a topológia optimalizálás jelentős súlycsökkentést és költségmegtakarítást eredményezhetnek (lásd 1. (a) ábra). Az optimalizált, tervezői szabadságot kihasználó külső alkatrészforma akár párosulhat belső térkitöltő szerkezetek párhuzamos alkalmazásával is (lásd 1. (b) ábra).



1. ábra. Szemléltető példák az additív gyártástechnológiák által biztosított tervezői szabadságra. (a) Egy eredetileg hagyományos gyártástechnológiára tervezett termék áttervezése additív gyártástechnológiára, ezzel jelentős súlycsökkenést elérve, [1]; (b) Alkatrészek kitöltése szabályos, tervezett belső térkitöltő szerkezettel, úgynevezett lattice struktúrákkal [2].

A fentebb érintett hatalmas tervezői szabadság és lehetőségtár kizárólag akkor használható eredményesen, ha hatásuk ismert. A lattice struktúrák viszonylag bonyolult elemi cella geometriával rendelkeznek, sokfajta lattice elemi cella kialakítás létezik, melyek viselkedése jelentősen eltér egymástól. Kis mértékű deformációs terhelés mellett számos jól bevált módszerrel tudjuk közelíteni, akár vége-selemes módszerrel (például homogenizáció), a szerkezetek viselkedését. Nagy deformációs terhelés mellett azonban komplex szimulációk elvégzése szükséges a tulajdonságok megismerése érdekében.

A lattice szerkezetek tulajdonsága azok geometriai paramétereitől is függ, ami tovább nehezíti az adott műszaki alkotás számára megfelelő struktúra megválasztását. Továbbá, számos esetben olyan lattice szerkezetek kerülnek alkalmazásra, mint például a homorú méhsejt (másnéven auxetikus méhsejt), melyek viselkedése nem kiszámítható (például kihajlás), így a lattice szerkezetek fejlesztése, új szerkezetek megalkotása is szükséges. Ugyanakkor, az alapvetőbb geometriai paraméterek, mint az elemszám és az alkotók (pl.: rúd elemek, henger stb.) igénybevétele is hatással van a lattice szerkezetre, így a műszaki alkotás viselkedésére is.

A lattice struktúrák témaköre rendkívül komplex, számos jelentősen eltérő struktúra létezik, melyek, bár előnyös és egyedi tulajdonságokkal rendelkeznek, viselkedésük alaposabb ismeretet és fejlesztést igényel. Dolgozatomban éppen ezért az alapvető geometriai hatások mellett, a homorú méhsejt vizsgálatával és fejlesztésével foglalkoztam.



2 Szakirodalmi áttekintés

2.1 A metaanyagok csoportosítása és az auxetikusság

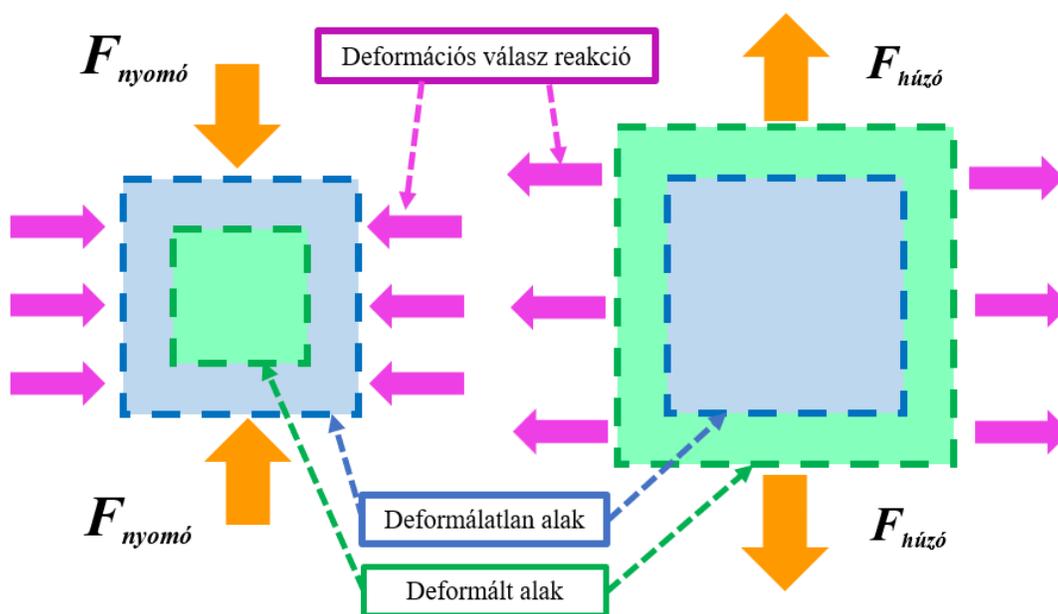
A műszaki alkotásokkal szemben folyton fokozódó és bővülő követelmények tekinthetők a releváns kutatások mozgó rugójának. Manapság a kiemelkedő szerkezeti teljesítmény mellett a műszaki alkotásoktól elvárt, hogy olyan további kapcsolt tulajdonságokkal is rendelkezzenek, mint az energiafelvétel vagy a rezgés csillapítás [3]. A metaanyagok olyan anyagok, amelyek tulajdonságai nem elsősorban a mechanikai tulajdonságaiktól, hanem a szerkezeti felépítésüktől függenek [4]. A lattice-ek (rácsszerkezetek) a metaanyagok szabályos elrendezésű csoportjába sorolhatók [5]. A lattice szerkezetek periodikus, porózus szerkezetek [6], kiemelkedő szilárdságuknak [7], energia felvevő képességüknek [8,9], zajcsillapító [10] és súlycsökkentő [11] képességüknek köszönhetően ezen szerkezetek jelentik a választ a jelenkor előzőekben bemutatott követelményeire. A lattice szerkezetek éppen ezért széles körben kerülnek alkalmazásra az olyan nagy terhelést jelentő iparágakban, mint a gépjárműipar [12,13], az űrrepülés [14], a hadiipar [15] és a sportszeripar [16]. A periodikus szerkezetű [17] mesterségesen létrehozott metaanyagok mellett léteznek sztochasztikus felépítésű metaanyagok is, melyek természetes anyagok, mint például a fa és a csontok [18].

A metaanyagok számos mechanikai [19–22], hőtani [23,24], és rezgéstani [25–28] paraméter szerint csoportosíthatók és vizsgálhatók. Természetesen a szerkezettől függően, főleg, ha az auxetikusság a kutatási terület fókuszja, akkor a Poisson tényező előjele alapján is történhet a csoportosítás [19]. A Poisson tényező előjele alapján három csoportba sorolhatók a lattice szerkezetek; negatív Poisson tényezős (NPR – angolul: Negatív Poisson's Ratio), pozitív Poisson tényezős (PPT – angolul: Positive Poisson's Ratio) és nulla Poisson tényezős (ZPR – angolul: Zero Poisson's Ratio) anyagok [29]. Ezen anyagok mindegyike rendelkezik specifikus előnyös tulajdonságokkal és egyedi alkalmazási területekkel. A pozitív Poisson tényezős szerkezetek elsősorban súlycsökkentés [30] céljából kerülnek beépítésre kiemelkedő szilárdság/tömeg [31] arányuknak köszönhetően, és ott, ahol speciális, testreszabott mechanikai tulajdonságok szükségesek. A legikonikusabb és legismertebb PPR lattice az ún. méhsejt szerkezet [32]. A nulla értékű Poisson tényezővel rendelkező anyagok világa egy kevésbé kutatott területet, ennek ellenére számos kizárólagos alkalmazásuk van. A ZPR anyagok ígéretes jövő elé néznek a repülőgépiparban, a repülőgépek szárnyának alakváltozó képessége kapcsán [33]. Számos természetes szövet Poisson tényezője szintén nulla [34], így a ZPR metaanyagok ígéretesek a szövetsebészetben is [35].

A legtöbb műszaki anyag egy adott irányban összenyomva az arra merőleges irányokban kitágul. A keresztirányú és hosszanti alakváltozás kapcsolatát a Poisson tényező írja le, mely jellemzően 0 és +0,5 közé esik [36,37]. Azonban bizonyos anyagok összenyomás hatására zsugorodnak, míg húzás hatására tágulnak keresztirányban; ezen anyagok Poisson tényezője negatív (a viselkedést



a 2. ábra szemlélteti). A negatív Poisson tényezőjű anyagokat Evans és tsai. [38] auxetikus anyagoknak nevezték el. Az auxetikus anyagok története közel 100 éves múltra tekint vissza, egészen 1927-28-tól kezdődően [39]. Előnyük közé tartozik a nagyobb energia elnyelés [8,40], a növelt keménység [41], a benyomódással [42] és a dinamikus terhelésekkel (ütésekkel) szembeni ellenállás [43] és a töréssel szembeni megnövekedett ellenállás [44,45]. Az auxetikus anyagok történelmében két jelentős korszak emelendő ki. Az első az 1980-as évek második fele, amikor kutatók számos geometriai és topológiai hatást elemezve lényegében tervezhetővé tették az auxetikus viselkedést [46–48].

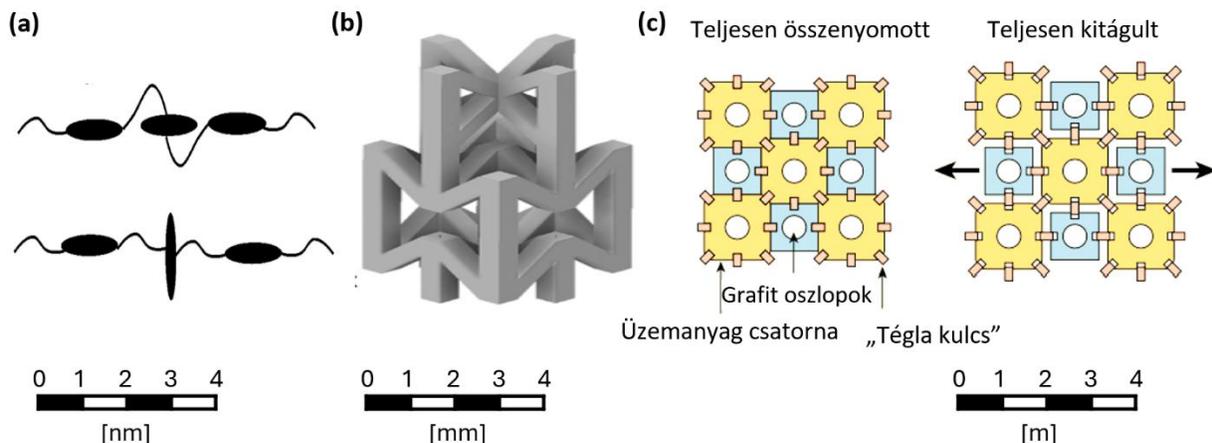


2. ábra. Auxetikus anyagok deformációs viselkedése nyomó, illetve húzó terhelés hatására [49].

Az auxetikus anyagok komolyabb figyelmet kaptak a 90-es években valós alkalmazási lehetőségeken keresztül. Choi és tsai. [50] auxetikus „okos” szegecset hoztak létre, míg Evans és tsai. [38] állították, hogy az auxetikus tömítések biztosabbak a hagyományos kivitelűeknél. Az auxetikus anyagok nemcsak ember alkotta szerkezetek lehetnek, hanem a természetben is számos olyan anyag vesz körül bennünket, mely auxetikus viselkedést mutat. A tehén tőgye [50], a macska [51] és a szalamandra [52] bőre is auxetikus; negatív Poisson tényezővel rendelkezik az alfa-krisztobalit, az egykristályos arzén, az antimon, a bizmut, a kadmium és a tallium is [53–55]. Számos kutatás és anyagfejlesztés alapul természetből vett inspiráción [56].

Kijelenthető, hogy az auxetikuság méret- és léptékfüggetlen, melyet a 3. ábra példái szemléltetnek. Kutatók, például molekuláris tervezéssel, szintetizálták az auxetikus polimerek új osztályát (3. ábra (a)) [57,58]. A spektrum másik végén (3. ábra (c)) az 1950-es évek atomreaktoraira jellemző auxetikus grafit mag felépítése látható [59]. Kutatómunkám keretében makro méretben vizsgáltam és fejlesztettem lattice és auxetikus lattice szerkezeteket, melyek mérettartományára a 3. ábra (b) mutat példát egy additív gyártástechnológiákra tervezett elemi

cellán keresztül [60]. Az auxetikuság határtalansága az alapanyagokra is kiterjed, ilyen struktúrák a polimerek mellett például habokból [61] és kerámiákból [62] is létrehozhatók.

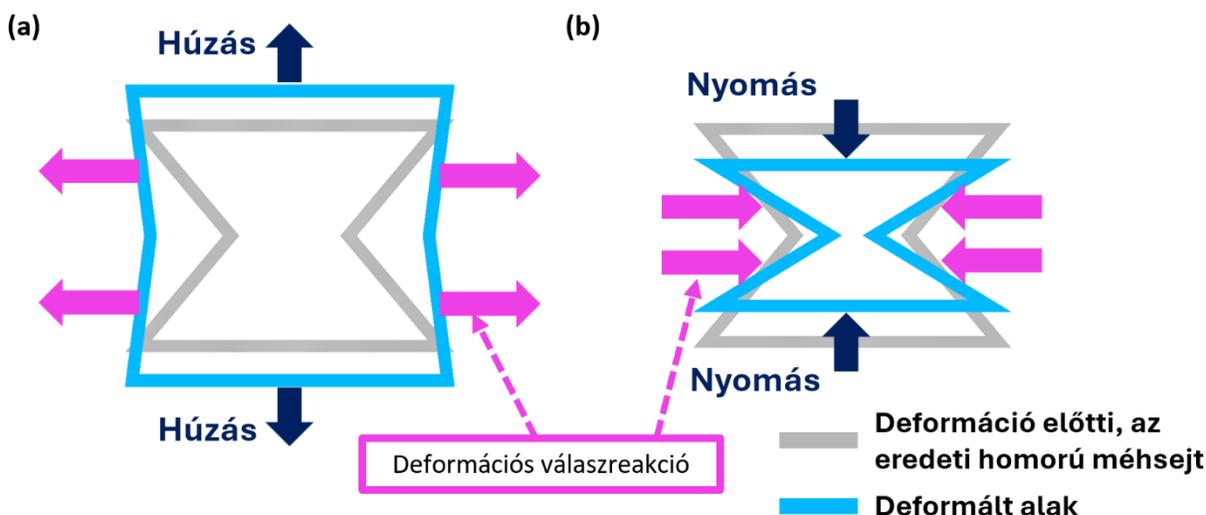


3. ábra. Példa auxetikus szerkezetekre különböző méretekben. (a) Molekuláris szinten; auxetikus trimer nematikus és nyújtott állapotban [57,58]; (b) Auxetikus elemi cella, mindössze pár milliméter méretű, additív gyártástechnológiával történő megvalósításra tervezve [60]; (c) Nagy méretű auxetikuság egy atom reaktorban [59], az auxetikus kialakításnak köszönhetően a reaktor mag ellenáll a földrezgésnek és nagy ellenállással rendelkezik a horizontális irányú nyíró hatásokkal szemben. (Az ábrákon feltüntetett méret skálák pusztán szemléltető jellegűek)

Egyszerűbb geometriájú auxetikus struktúrák hagyományos gyártástechnológiákkal is létrehozhatók [63,64], míg a kissé komplex geometriák találékonysággal még éppen megvalósíthatók a hagyományos technológiákkal [65]. Azonban a kutatási terület második áttörésekkel teli korszakát az additív gyártástechnológiák által biztosított geometriai és tervezői szabadság hozta el.

2.2 Az auxetikus méhsejt-szerkezet ismertetése és hiányosságai

Az egyik legismertebb és talán legszélesebb körben kutatott lattice struktúra a 2.5 dimenziós auxetikus méhsejt (más néven homorú méhsejt). A szerkezet számos, az előző fejezetben bemutatott, az auxetikus szerkezetekre jellemző kedvező tulajdonsággal rendelkezik. A méhsejt struktúra viselkedését - melyet többek között a Poisson tényező és a Young modulus ír le – sok kutató részletesen bemutatta [66–68], így számos geometriai hatás paramétere jól ismert [69]. A lattice szerkezetek esetében egy másik nagyon fontos csoportosítási elv a deformációs mechanizmus. Az auxetikus méhsejt (vagy homorú méhsejt) homorú deformációs mechanizmussal rendelkezik [8]. Húzás hatására a homorú élek kifelé nyílnak, így tágul az elemi cella oldalirányban, míg nyomó igénybevétel hatására a viselkedés fordított (lásd 4. ábra). Az auxetikus szerkezetekre jellemző deformációs mechanizmus előnyeinek kinyeréséhez jelentős mértékű porozitás szükséges, így az ilyen szerkezetek síkbeli merevségük limitál, ezért nem javasoltak nagy teherbírást igénylő alkalmazásokra [70].



4. ábra. A homorú méhsejt szerkezet deformációs viselkedése (a) Húzó terhelés hatására; (b) Nyomó terhelés hatására.

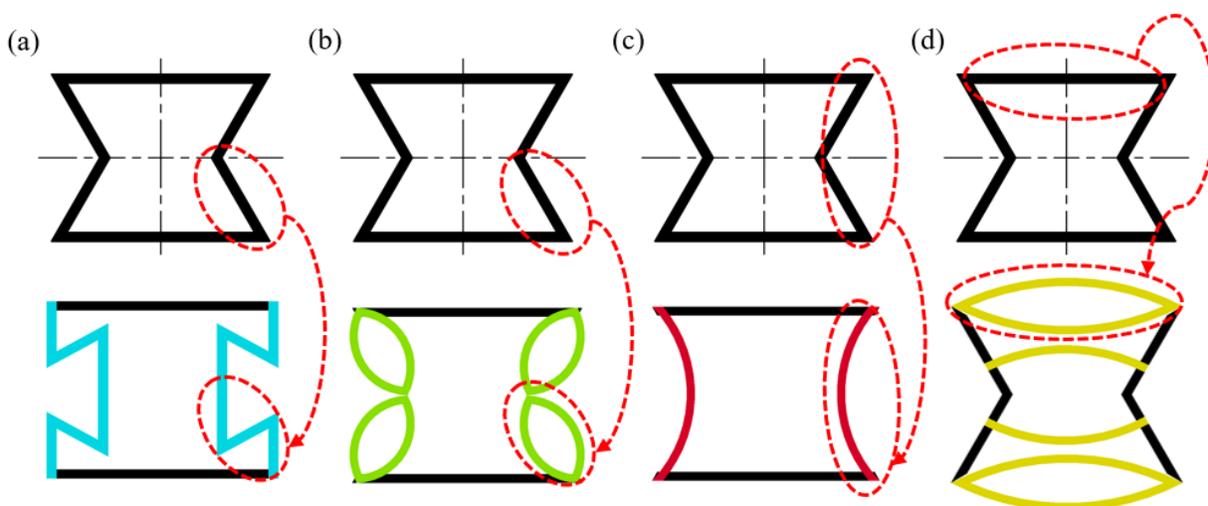
A homorú struktúrák egyik legnagyobb hátránya a kihajlásra való hajlam [8]. A struktúrák kihajlási hajlama a relatív sűrűség csökkentésével (azaz a porozitás növelésével) növekszik [18], mely az elérhető súlycsökkentésnek is határt szab. Xiuhui és társai [71] analitikus módon levezették a homorú méhsejt kihajlási mechanizmusát leíró összefüggést, és meghatározták a globális (több elemi cellából álló rácsszerkezetre érvényes) és a lokális (elemi cella szintű) kihajlási módot. Tanulmányukban megállapították, hogy a globális kihajlás jellemzőbben lép fel a lokálishoz képest. Mirsalman és tsai. [72] megállapították, hogy bizonyos geometriai módosítások, mint például a méretarány változtatása, minimális hatással vannak a kihajlásra, míg a vastagságot és a hosszúságot változtatva (növelve) kismértékű növekedés figyelhető meg a kihajlást előidéző terhelésben. Kijelenthető, hogy a megfelelő geometriai paraméterek változtatásával sem kerülhető el a kihajlás annak érdekében, hogy a homorú méhsejt struktúra egy igazán nagy teljesítményű, kiszámítható viselkedésű szerkezetté válhasson.

2.3 Rácsszerkezetek tulajdonság javítására szolgáló módszerek bemutatása

A metaanyag tervezés alapvető koncepciója olyan struktúrák mesterséges létrehozása, melyek a kívánt tulajdonságokkal rendelkeznek. Másik lehetőség a kutatók és fejlesztők számára egy meglévő lattice struktúrát alapul véve egy továbbfejlesztett vagy alapjaiban új struktúra megalkotása. Amennyiben egy meglévő szerkezet fejlesztése a cél, két lehetőség közül választva hozhatjuk létre saját új struktúránkat: vagy bizonyos elemi cella alkotókat kicserélünk és részleges geometriai módosítást hajtunk végre, vagy a meglévő szerkezethez adunk hozzá további alkotókat [73]. Az utóbbit beépített geometriai módosításon alapuló módszernek nevezhetjük.

2.3.1 Részleges geometriai módosításon alapuló módszerek

Először a kiinduló elemi cella viszonylatában a jelentősebb geometriai módosításon alapuló módszerek kerülnek bemutatásra. Ebbe a csoportba sorolhatók az olyan geometria módosítások, melyek az eredeti elemi cella egy vagy több alkotó élét (továbbiakban alkotóját) lecserélik egy új alkotóra a kívánt tulajdonságok elérése érdekében. Yilin és társai [74] munkájukban az auxetikus méhsejt homorú éleit „cikk-cakk” alakú alkotókra cserélték (lásd 5. ábra (a)). A szerzők saját irodalom kutatásuk alapján arra jutottak, hogy sok újszerű geometria a nagyobb merevség érdekében inkább feláldozza az auxetikusságot, és ezek az újszerű geometriák hagyományos, költséghatékony technológiákkal nem hozhatók létre. Munkájuk eredményeként a „cikk-cakk” alakú módosítás növelt merevséget biztosított a szerkezetnek, amely hagyományos gyártástechnológiákkal is gyártható, valamint az auxetikus viselkedés is megmaradt.



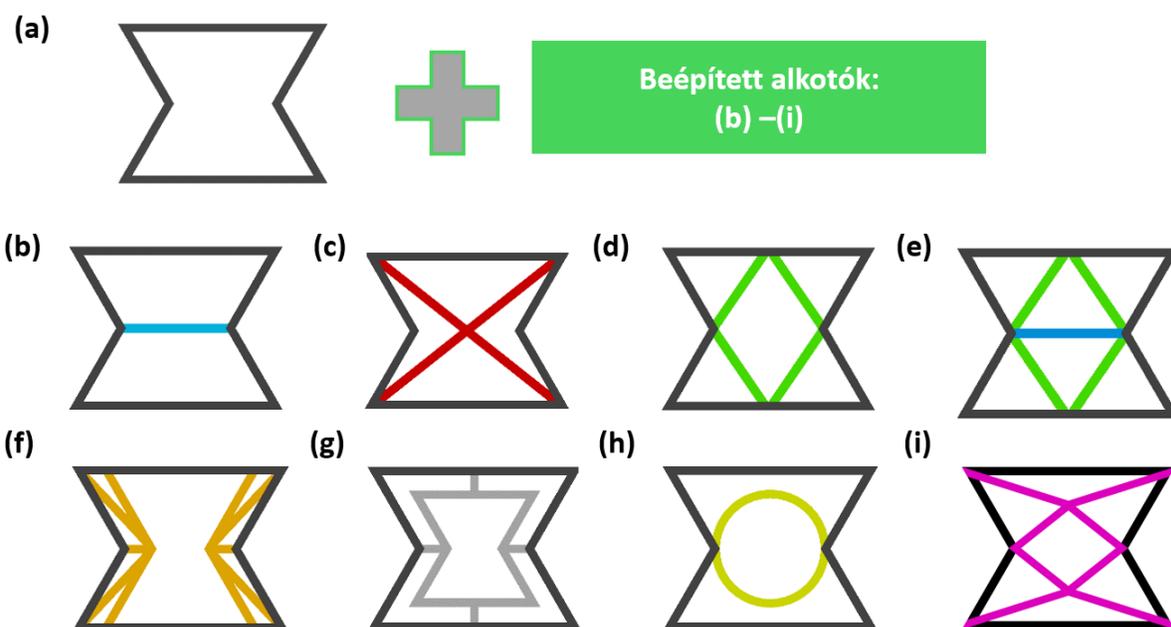
5. ábra. Részleges geometriai-módosításon alapuló, az auxetikus méhsejtet célzó fejlesztések. (a) A homorú éleket cikk-cakk alakú élek váltják fel [74]; (b) A homorú éleket egymással szembe fordított ívek váltják fel [75]; (c) Az oldalanként két-két homorú élt egybefüggő íves szegmens váltja ki [76]; (d) A vízszintes alkotókat íves szegmensek váltják fel [77].

Qi és társai [75] egy rendkívül átfogó vizsgálatot végeztek, melynek keretein belül a homorú éleket egymással szembe fordított ívekkel cserélték le 5. ábra (b). Vizsgálatukban az egymással szembe fordított íves élek életerő mértékű távolságának hatását is vizsgálták. Jóllehet, az eredeti auxetikus méhsejt tulajdonságaival a szerkezet mechanikai tulajdonságai nem kerültek összehasonlításra, de a deformációs viselkedése stabilabb lett, a Poisson tényező értéke a vizsgált paraméterek függvényében beállíthatóvá vált. A 5. ábra (c) [76] egy teknős páncél által ihletett elemi cella kialakítást mutat, mely homogénebb zömölési deformációs viselkedést, és kisebb mértékű feszültségingadozást eredményez a szerkezetben zömítés közben. Az előzőekben bemutatott geometriai módosítások minden esetben a homorú éleket célozták meg, módosíthatatlanul hagyva a két vízszintes élet.

Alapvetően a homorú élek képezik a szerkezet homorú viselkedési mechanizmusának alapját, ebből adódik, hogy a kutatások döntően arra összpontosultak, hogy a homorú éleket módosítsák. Zied és társai [77] azonban pont a vízszintes éleket cserélték le íves elemekre és így növelték a struktúra síkbeli merevségét. Ötletüket továbbfejlesztve további, az alsó és felső ívekkel párhuzamos közbenső ív-szegmenseket is beépítettek a szerkezetbe (lásd. 5. ábra (d)). A fejlesztés növelt síkbeli merevséget eredményezett az auxetikus viselkedés mérsékelt romlása mellett.

2.3.2 Beépített geometriai módosításon alapuló módszerek

A beépített geometrián alapuló módosítások a leggyakrabban alkalmazott megoldások egy adott lattice struktúra tulajdonságainak javítására. A beépített geometriai módosításon alapuló módszerrel megalkotott jelentősebb elemi cella konstrukciókat a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra. Beépített geometriai módosítás alapú auxetikus méhsejt fejlesztések. (a) Az eredeti auxetikus méhsejt cella; (b) Horizontális rúd elem alapú merevítés [78]; (c) Átlós kereszt merevítés. [79]; (d) Beépített rombusz alapú merevítés [80]; (e) Rombusz és horizontális elem kombinációja [81]; (f) Komplex önismétlődő elem-alapú fejlesztés [82]; (g) Eltolt önismétlődő fejlesztés [83]; (h) Íves beépített elem alapú fejlesztés [84]; (i) Több alkotós, komplex beépített elem-alapú fejlesztés [85].

Lu és tsai. [78] 2016-ban megnövelték az auxetikus méhsejt rugalmassági modulusát egy vízszintes rúd beépítésével, mint ahogy a 6. (b) ábra is mutatja. Az egyenes vonalvezetéssel szemben, az elemi cella belső négy sarkát átlósan is összeköthetjük, így két új alkotó rúd elemmel egészül ki az elemi cella struktúra [79] (6. (c) ábra). A geometriai módosítás eredményeként növekedett a síkbeli merevség és a Young modulus értéke. A szerzők egy másik, a 6. (d) ábrán bemutatott szintén átlós elrendezési elvet is fontolóra vettek, és a beépített rombusz merevítés is eredményesnek bizonyult [80]. A 6. (e) ábrán látható megoldás szerint, a 6. (b) és a 6. (d) ábrán bemutatott változatokat Chen és társai [81] kombinálták.

Ez a geometria rugalmasabb tervezhetőségét kölcsönözt a szerkezetnek a kombináció alapját képező egyszerűbb változatokhoz képest, és a fajlagos merevsége is nagyobb. Az előzők értelmében a geometriai kialakítás tekintetében egy nem teljes mértékben innovatívnak tekinthető fejlesztés is kiemelkedő eredmények elérésére teszi képessé a szerkezetet. Nedoushan és társai. [85] számos él beépítésével egy rendkívül komplex struktúrát hoztak létre. A jelentős mennyiségű hozzáadott alkotó megnövekedett szilárdságot és tervezhető Poisson tényezőt eredményezett (6. (i) ábra). A beépített geometriai módosításon alapuló módszerek széles körben vizsgált másik területe az önhasznó-elem beépítése. A 6. (f)-(g) ábrákon önhasznó beépített geometriai módosításokat láthatunk, melyek jelentősen növelik az auxetikus méhsejt szerkezet stabilitását [82,83,86].

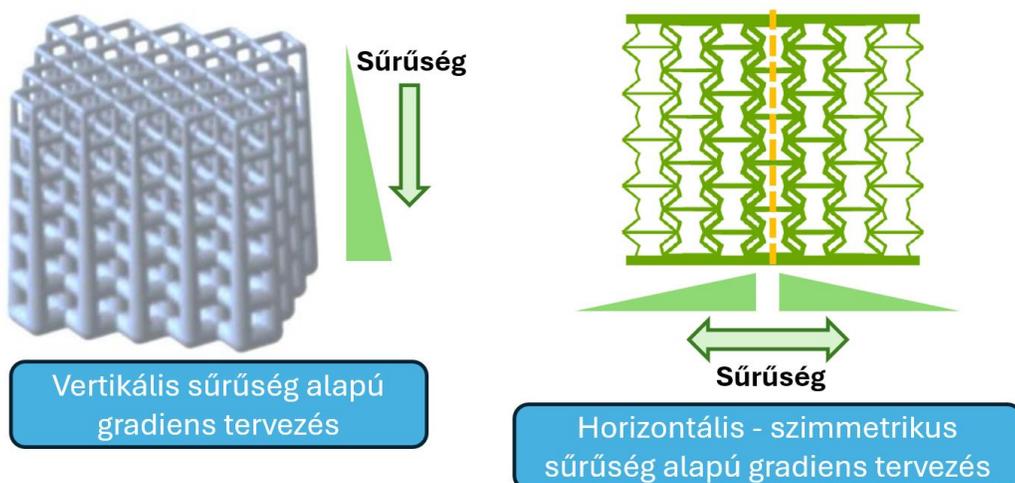
A hagyományos, egyenes alkotókon alapuló geometriai módosítások mellett, az ívelt szegmensek előnyös hatása is bizonyított a lattice struktúrák világában [87]. A részben ívelt, vagy teljesen íves szegmensek a szakaszok nagyobb mértékű átfedésesét eredményezik, így növelve a struktúrák merevségét, energiateljesítményét [88] és auxetikusitását [89], ezzel párhuzamosan az éles sarokpontok feszültséggyűjtő szerepét kiküszöbölve [90]. Az íves elemek beépítésén alapuló geometria módosítás az auxetikus méhsejt szerkezet tulajdonságait is előnyösen befolyásolja (6. (h) ábra) [73,84,91]. A beépített gyűrű alakú szerkezet kapcsolatot biztosít a vízszintes és homorú alkotók között, így növeli a szerkezet stabilitását anélkül, hogy jelentősen befolyásolná annak Poisson tényezőjét.

2.3.3 Kombinációs módszerek

Az előző fejezetekben látszólag is új, illetve újszerű elemi cella kialakítások kerültek bemutatásra. A következő két fejezetben két olyan témakört ismertettek, melyek megjelenése látszólag nem, vagy csak kis mértékben újszerű, mégis megfelelő alkalmazással a kívánt (kedvezőbb) mechanikai tulajdonságok elérhetők. A kombinációs módszerek, mint nevük is mutatja, meglévő elemeket kombinálnak és hoznak létre egy új struktúrát. A kombináció sok-színű lehet, például geometriai alapú, melyre egy remek példa az előző fejezetben bemutatott 6. (e) ábra, ahol korábbi kutatómunkák eredményei lettek egyesítve egy még eredményesebb fejlesztés során [81]. A kombinációk egy másik, az auxetikus méhsejt kapcsán releváns csoportja a deformációs mechanizmusok kombinálásán alapul. Reza és társai [92] a homorú deformációs mechanizmust a jelentősen eltérő királis deformációs mechanizmussal kombinálta, ezzel leküzdve a homorú deformációs mechanizmussal rendelkező szerkezetek és így az auxetikus méhsejtre is jellemző alacsony zömítési ellenállást és anizotrópiát. Rendkívül érdekes és kiemelkedően eltérő perspektívát követtek Wei és társai. [93], akik egy másik lattice szerkezet, az auxetikus nyílhegy (homorú nyílhegy) struktúra kihajlásra való hajlamát felismerték és beépítették saját új struktúrájukba. Egy olyan két-lépcsős deformációs viselkedésű dupla auxetikus nyílhegy struktúrát hoztak létre, amelyben a kezdeti kihajlás megengedett, de később auxetikus zömülésbe vált át [93].



2.3.4 Gradiens tervezés



7. ábra. Gradiens tervezés példák [94] [S15].

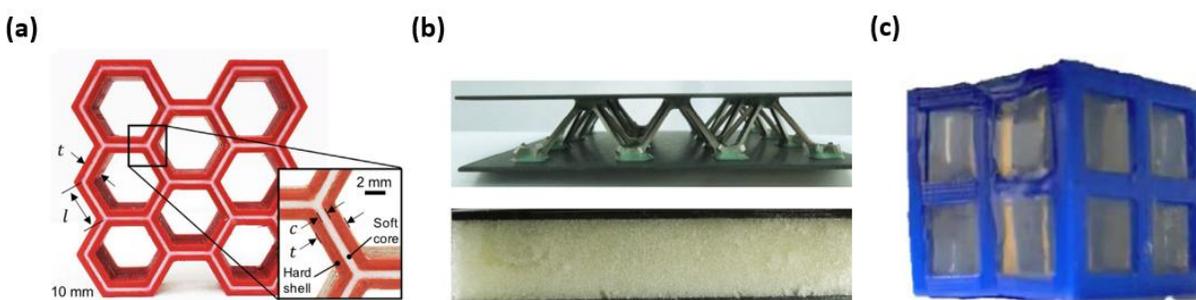
A geometria módosításokon alapuló módszerek közül végső soron fontos megemlíteni a gradiens módszert is. A módszer lényege, hogy fokozatosan változtatjuk az elemi cella paramétereit, jellemzően függőleges irányban. A gradiens módszer alapulhat a geometriai paraméterek, anyagjellemzők vagy akár a nyomtatási paraméterek változtatásán is [95]. A legelterjedtebb módszer a vastagság gradiens, amely az elemi cellákra jellemző névleges vastagság változását jelenti függőleges vagy tetszőleges irányban [96] homogénezen vagy adott függvény szerint (7. ábra). A gradiens mintadarabok terhelhetősége magasabb a homogén mintadarabokhoz képest [97], és a terhelhetőség a vastagság-gradiens módosításával beállítható. A gradiens módszerrel megtervezett szerkezetek magasabb energiafelvevő képességgel [98,99], alacsonyabb csúcstesztség értékkel és további előnyös mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek [100]. A jellegzetes rétegenkénti tömörödés a gradiens szerkezetek legelőnyösebb tulajdonsága, melyből adódóan a hirtelen fellépő, kritikus tönkremenetel nem tud kialakulni [97].

2.3.5 Alapanyag-kombinációs és több alapanyagon alapuló módszerek

A metaanyagok mechanikai tulajdonságai tovább javíthatók alapanyag kombinációkkal. A legelterjedtebb anyag kombinációs módszer során kiegészítő anyagokat keverünk az alapanyagba. A szálerősített anyagok talán a legszélesebb körben ismert nyomtatáshoz használt anyagok, melyek az extrúzió alapuló additív gyártástechnológiák esetében, mint az FDM (Fused Deposition Modelling) jól alkalmazhatók [101,102]. Az extrúziós technológiákkal létrehozott szálerősített alkatrészek tagadhatatlanul kedvezőbb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek (szemben a szálerősítés nélküli alkatrészekkel), ugyanakkor anizotrópia, porozitás és delamináció is jellemzi ezeket a termékeket, melyek negatívan hatnak a használhatóságukra. Yavas és társai [103] egy két extruderes nyomtatóval vizsgálták az anyagkombináció hatását a hagyományos méhsejt szerkezetre (8. (a) ábra).

A mintadarabok elemi cellái a külső és belső kerületük mentén kemény, míg belsejükben lágy (TPU) anyagból készültek. A lágy és kemény régiók vastagság-arányának változtatásával a struktúra mechanikai tulajdonságai beállíthatók.

Az alapanyag kombinációk mellett a lattice szerkezetek porozitását másodlagos, ömlesztett anyagokkal kitöltve javíthatók az energia-fellevő és csillapító tulajdonságok [104–107]. A könnyű anyagok széles spektruma használható a lattice szerkezetek kitöltésére, mint például a poliuretán habok [108,109] (8. (b) ábra), fémhabok [110,111], szintaktikus habok [112] és agaragar zselé [113] (8. (c) ábra).



8. ábra. Alapanyag kombinációs lattice fejlesztési módszerek. (a) Alapanyag kombináció két extruderes nyomtatóval készítve [103]; (b) Lattice szerkezet üregeinek kitöltése poliuretán habbal [107]; (c) Lattice szerkezet üregeinek kitöltése agaragar zselével [113].

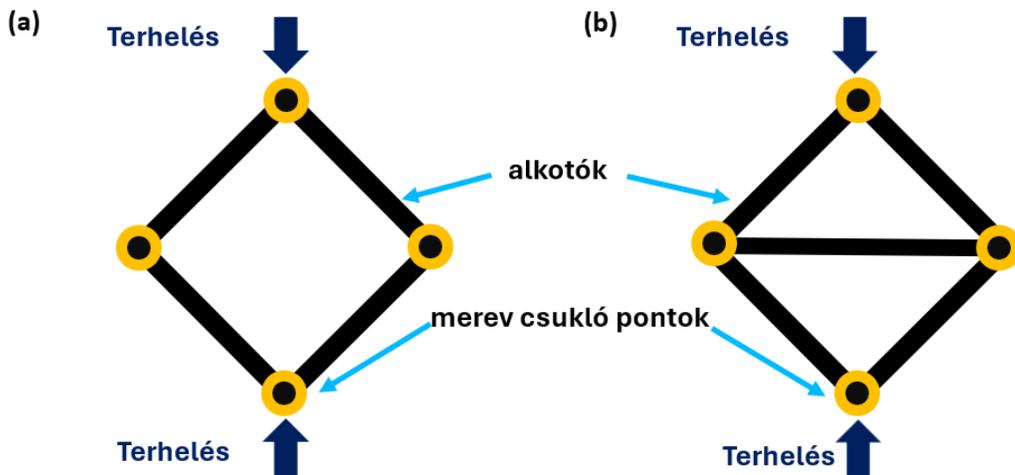
Samul [113] és társai egyszerű FDM technológiával készített köbös lattice mintadarabokat töltöttek ki agaragar zselével. A kitöltött és kitöltetlen mintadarabokat összevetve 50%-os növekedés figyelhető meg a kitöltöttek energiafellevő képességében, valamint a tönkremenetelük 55%-kal nagyobb deformáció mellett jött létre. A kutatómunka kiválóan mutatja, hogy az anyag kombináció (kitöltés révén) még egyszerű geometriák esetében is hatásos lehet. Az anyagkombináción alapuló tulajdonság egyesítés az építőanyagok világában is megfigyelhető. A jól ismert betonacél [114] mellett acél csővázakat belső merevítéssel [115,116] és üvegszál erősítésű csöveket [117] is elterjedten alkalmaznak szeizmikus rezgéscsillapításra. Az emberi fog által inspirálva egy kemény külső réteget lágy poliuretán habbal megtöltve a szerkezet benyomódással és töréssel szembeni ellenállása jelentősen megnövelhető [118,119]. Természetesen a lattice szerkezetek nemcsak puha, összenyomható, hanem összenyomhatatlan anyagokkal is kitölthetők [120], továbbá regionális és akár egyszerre több anyag alapú kitöltés is megvalósítható.

A teljes kép érdekében az anyagpárosítás módszereit használó és több alapanyagból felépülő szerkezetek hátrányait is meg kell említeni. A sikeres tulajdonság egyesítés érdekében a megfelelő anyagkapcsolat elengedhetetlen. A legtöbb bemutatott módszer esetében a határfelületek mentén lépett fel a tönkremenetel, vagyis a megfelelő kötés legalább olyan erős kell legyen, mint a gyengébb anyag, ellenkező esetben a párosítás előnytelen [121,122].

2.4 A metaanyagok viselkedését alapvetően befolyásoló tényezők

2.4.1 Az alkotók igénybevétele és a deformációs viselkedés közötti kapcsolat

Egy lattice szerkezet alkotóinak nyújtása vagy hajlítása által deformálódik. Az ezredfordulón Deshpande és társai [123] meghatározták azokat a topológiai kritériumokat (Maxwell [124] elméletei alapján), melyek meghatározzák, hogy egy struktúrában a hajlítás vagy a nyújtás dominál, mely alapján befolyásolja az elemi cellák és így a metaanyagok deformációs viselkedését. A 9. ábra egy példát hoz a hajlítás és nyúlás által dominált szerkezetekre.



9. ábra. Lattice struktúrák alkotóinak igénybevételi állapota és deformációs viselkedés közötti kapcsolat.
(a) Példa a hajlítás által dominált szerkezetre; (b) Példa a nyúlás által dominált szerkezetre [123].

Tételezzük fel, hogy a csatlakozási pontok merevek, és terhelés hatására a 9. (a) ábrán látható struktúrában a merev csomópontokban hajlító igénybevételek ébrednek, így az alkotók is hajlító igénybevételnek lesznek kitéve. A 9. (b) ábrán látható elrendezés alkotóiban szintén megjelenik a hajlító igénybevétel, azonban a struktúra terhelhetőségét az alkotó hosszirányú teherbírása határozza meg, így a húzás lesz a domináns a szerkezet igénybevétele szempontjából.

A hajlítás-dominanciájú szerkezetek nagyobb kezdeti folyáshatárral jellemezhetők, így súlycsökkentést igénylő alkalmazási területeken ezek a kedveltebbek a húzás-dominanciájú szerkezetekkel szemben. A húzás-dominálta szerkezetek azonban zömítés során az alkotók kihajlása miatt lágyabb szerkezetté válnak, így energiafelvételre a hajlítás-dominálta szerkezetek az előnyösebbek. Chen és társai [125] később vizsgálták is ezt a jelenséget. Kísérleteikben háromdimenziós lattice struktúrákat vizsgáltak, és megállapították, hogy a hajlítás-dominálta Kelvin szerkezet zömítési ellenállása közel kétszer akkora, mint a nyolcszög vagy kockataéder struktúra esetében mért érték [126]. Wagner és társai [127] fejlesztésükkel áthidalták a hajlítás-dominált és húzás-dominált lattice szerkezetek közti szakadékot, egy olyan programozható viselkedésű új szerkezettel, mely külső hő hatására képes megváltoztatni viselkedésének mechanikáját [127]. A hajlítás–nyúlás hierarchiáján több lattice szerkezet fejlesztés is alapul, melyeknek köszönhetően

akár 4-5-szörös energiafelvétel is elérhető [128]. Háromdimenziós lattice szerkezetek esetében a deformációs módok jóval szélesebb spektrumban és komplexebb mechanizmusokban mozognak, mint például a „zömülő-csavarodó” [129,130] vagy a „húzó-csavaró” [131] kapcsolatot.

2.4.2 Az elemszám hatása

A rácsszerkezetek mechanikai tulajdonságai javíthatók az elemszám változtatásával is. A legcélravezetőbb módja ennek a vizsgálatnak, ha összehasonlíthatóak az eredmények, azaz az egyes szerkezeti variációk például azonos tömegűek vagy azonos a relatív sűrűségük. Hend és társai [132] egy összehasonlító vizsgálatot végeztek TPMS (triplán periodikus minimális felületű) lattice struktúrákon. Megállapították, hogy a zömítési ellenállás legjobban az elemi cella típusától és annak méretétől függ. Továbbá, megállapították, hogy azonos relatív sűrűség mellett közel azonos szilárdsági jellemzőkkel rendelkezzenek az eltérő szerkezetek. Yang és társai [133] az elemszám és a relatív sűrűség hatását párhuzamosan vizsgálva megállapította, hogy az elemszám növelése, (azonos tömeg mellett) növelt zömítési ellenállásban és energia-felvevő kapacitásban mutatkozik meg. A relatív sűrűség növelése is javasolt, mivel a feszültségcsúcsok kialakulása kevésbé jellemző [134]. Ezeket az eredményeket további kutatómunka is alátámasztja [135]. Kedvezőbb mechanikai tulajdonságok az elemszám változtatása mellett a cella-arányok változtatásaival is elérhetők [136]. A cellák orientációja is hat a mechanikai tulajdonságokra, különösképpen, ha a deformációs viselkedés hajlítás dominálból húzás dominálttá válik [137]. A fentiek alapján belátható, hogy az elemszám és az igénybevételi állapot hatása nem független egymástól, hatásukat célszerű teljes mértékben összehasonlítható körülmények között vizsgálni.

2.4.3 További hatások

A metaanyagok fejlesztésének világa egy rendkívül sokszínű, innovációkkal teli tudományterület, az irodalmi összefoglalóban elsősorban a tervezett geometriai módosítás alapú fejlesztések kerültek bemutatásra és értékelésre. A metaanyagok fejlesztésének lehetősége azonban folyamatosan bővül, mára akár már az újkeletű topológiai optimalizálás és additív gyártástechnológiák által biztosított együttes előnyöket is ki lehet használni [138].

Zárásként fontos megemlíteni, hogy egy adott elemi cella struktúra csak akkor tudja a kívánt tulajdonságokat biztosítani, ha az alkotó alapanyag azt lehetővé teszi. Egy adott szerkezet viselkedése eltérő alapanyagok esetén jelentősen eltérő lehet [139].

3 Célkitűzés, nyitott kérdések

Doktori kutatómunkám során az **alapvető geometriai paraméterek hatásának megismerését követően az auxetikus méhsejt szerkezet fejlesztésére fókuszálok**, kutató munkám alapját az alábbi főbb szakirodalmi alapok és feltárt hiányosságok adták:

- Yang és társai [133] megállapították, hogy az elemszám növelése (azonos tömeg mellett) mechanikai tulajdonság-javulást eredményez. Az elemszám mellett egyéb alapvető tulajdonságok (orientáció [137], az alkotók igénybevételi állapota [137], relatív sűrűség [134]) is hatással vannak egy adott mintadarab tulajdonságaira. A számos geometria hatás közül az elemszám és alkotók igénybevételi állapota alapvető paraméternek tekinthető a metaanyagok tervezésekor és beépítésekor, de a kutatókban megfogalmazódott az igény több tulajdonság összehasonlító módon történő vizsgálatára is. Például Hend és társai [132] az elemszám és lattice struktúrák összehasonlítható vizsgálatára alkottak meg egy vizsgálati környezetet. Ugyanakkor fundamentálisan az elemszám és az alkotók igénybevételi állapota még nem került vizsgálatra összehasonlítható módon, továbbá az optimális elemszám és lattice struktúra geometriai viszonyának esetleges kapcsolatát sem vizsgálták.
- Az egyik legismertebb auxetikus szerkezet kétségkívül a homorú méhsejt, mely számos kedvező tulajdonsága mellett homorú deformációs mechanizmusából adódóan kihajlásra hajlamos [8]. A struktúra fejlesztésére az irodalomkutatásban bemutatottak szerint számos kutató ismertetett különféle módszereket, technikákat. Fejlesztéseik elsősorban a mechanikai tulajdonságok javulását eredményezték. A geometriai alapú fejlesztések azonban számos esetben korlátozták az elemi cella eredeti homorú deformációs mechanizmusát. A fentiek értelmében érdemes lenne vizsgálni egy, a homorú kialakítást hangsúlyozó módosítás hatását, mely elsősorban a deformációs viselkedést javítaná (elkerülné a kihajlást). Jóllehet a homorú méhsejt egy ismert struktúra, alkalmazása éppen a kihajlási hajlama miatt korlátozott. Geometriai módosításokkal adott paraméterek mellett már elérhető a kihajlás korlátozása [84], azonban egy paraméter-független, kihajlás mentes deformációs viselkedésű homorú méhsejt-alapú fejlesztés széles körben alkalmazható struktúrává tenné a szerkezetet.
- A lattice szerkezetek üregeinek kitöltése egy relatíve újszerű terület, a kitöltés hatása előnyös, főként a csillapító és az energia-felvevő képesség javulásában mutatkozik meg [104–107]. A kitöltés hatása nem vizsgált számos lattice, így a homorú méhsejt esetében sem, valamint az irányított, szegmentált kitöltés sem vizsgált.

Mindezek alapján olyan fejlesztések koncepcionálását, valós, végeselemes és analitikus vizsgálatát tűztem ki célul, amelyek segíthetnek megválaszolni a következő nyitott kérdéseket:

- I. Hogyan lehetne a legfontosabb alapvető geometriai paraméterek (elemszám és alkotók igénybevételi állapota) hatását összehasonlíthatóan vizsgálni?
- II. Létezik-e valamilyen lattice-t jellemző paraméter, mely alapján meghatározható az optimális elemszám?
- III. Milyen egyszerű fejlesztéssel lehetne az auxetikus méhsejt – elsődlegesen deformációs, másodlagosan mechanikai - tulajdonságait javítani?
- IV. Vajon a bemutatott lattice struktúrák esetében abszorberekkel megvalósított ún. szegmentált kitöltés pozitív hatással lehet-e az auxetikus méhsejt deformációs és egyéb mechanikai tulajdonságaira?
- V. Egyszerű geometriai módosítással vajon fejleszthető-e az auxetikus méhsejt egy olyan struktúrát megalkotva, melynek deformációs viselkedése paraméterfüggetlen, ugyanakkor mechanikai tulajdonságait geometriai paraméterekkel képesek vagyunk befolyásolni?

3.1 Célkitűzések megfogalmazása:

- Egy átfogó vizsgálati elrendezés kidolgozása, melyben olyan alapvető jellemzők, mint az elemszám hatása összehasonlítható módon vizsgálható.
- Az elemszám mellett a lattice elemi cella alkotói igénybevételi állapotának hatásvizsgálata, kiegészítve az előzőleg megfogalmazott vizsgálati elrendezést.
- A homorú méhsejt-szerkezet kedvezőtlen tulajdonságainak javítására vonatkozó lehetőségek feltárása.
- A homorú méhsejt szerkezet deformációs stabilitásának növelése geometriai módosításokon keresztül több lépcsőben. Céлом, több olyan geometriai módosítás vizsgálata, mely az alapvető deformációs viselkedési mechanizmus megőrzése mellett növeli a struktúra stabilitását.
- A geometriai módosítások minden esetben célszerűen paraméter jellemzettek, így a módosítás hatását egy rendkívül széles tartományban szükséges vizsgálnom.
- Az elvégzett módosítások és a paraméterek hatáselemzése alapján tervezési, stabilizációs irányelvek megfogalmazása, és ezek mentén a lattice struktúra fejlesztésének folytatása.
- Egy olyan új elemi cella struktúra megalkotása, mely a homorú méhsejt deformációs viselkedését paraméter függetlenné és kihajlás mentessé teszi, ahol az egyes geometriai paraméterek függvényében kizárólag a kívánalmaknak megfelelően alakíthatók ki a mechanikai tulajdonságok (pl.: a struktúra Poisson tényezője, az energiaelnyelés, a deformációs viselkedés).
- A geometriai módosítások mellett az alapanyag alapú kitöltés, az ún. szegmentált kitöltés hatásának vizsgálata.

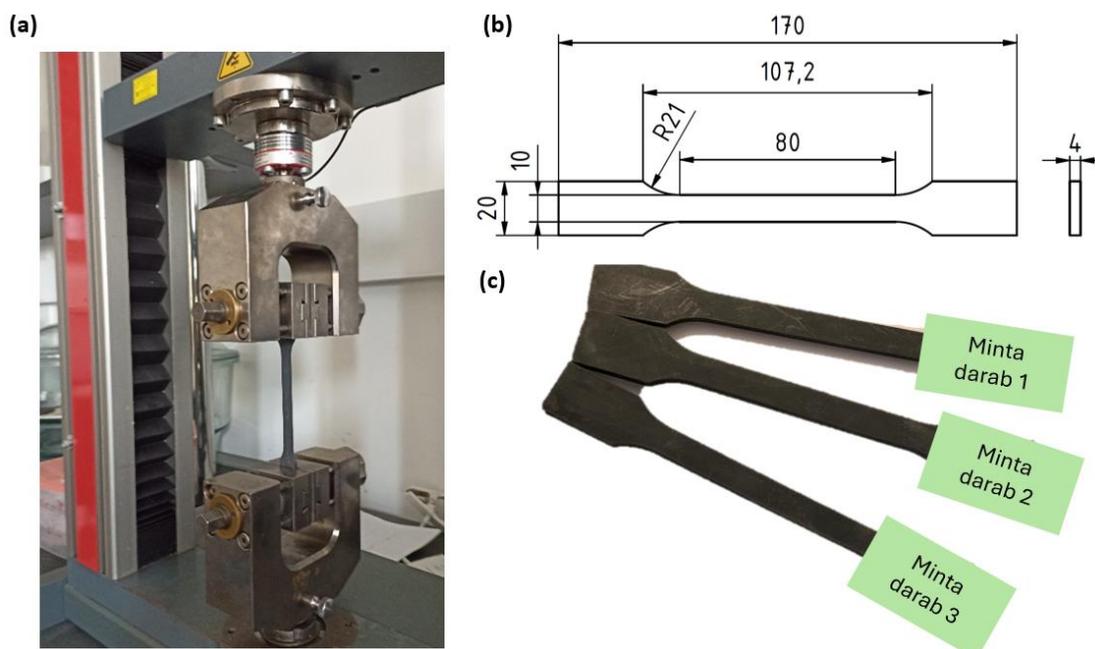


4 Anyagok, eszközök és módszerek

4.1 A kísérletek során felhasznált mérő berendezések

4.1.1 Szakítóvizsgálatok

Szakítóvizsgálatokat a mintadarabok anyagtulajdonságának meghatározása érdekében végeztem szabványos (EN ISO 527-2 szabvány szerinti [140]) próbatesteken. Zwick Z020 (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Németország, Ulm) típusú 20 kN méréshatárú szakítógépet használtam az anyagjellemzők meghatározására (10. ábra). A szakító vizsgálatokat a szabvány szerinti 5 mm/s sebességgel végeztem el. Az 5. fejezetben bemutatott vizsgálat során gyártói adatokra építettem az anyagtulajdonságok meghatározáskor.



10. ábra. Szakítóvizsgálatok az egyedi anyag keverékek tulajdonságainak számszerűsítésére. (a) Vizsgálati elrendezés; (b) Szabványos próbatest főbb méretei; (c) Néhány additív gyártástechnológiával készített szakító próbatest fényképe.

4.1.2 Zömítő vizsgálatok

A bemutatásra kerülő fejlesztések sikerességét és hatékonyságát mechanikai tulajdonságok - külön kiemelve a deformációs viselkedést - alapján ítéltem meg, melyeket zömítő vizsgálatokkal határoztam meg. A vizsgálatokat egy Hegewald & Peschke (Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH, Németország) 40 tonna mérés határú zömítő berendezésen végeztem el 5 mm/min sebességgel. A zömítés mértékét minden esetben az adott vizsgálatához és mintadarabhoz igazítottam, értékét az adott fejlesztés kapcsán ismertetek. Ugyanakkor, közös jellemzője az egyes vizsgálatoknak, hogy nagy deformációs terhelések mellett történtek a mérések.

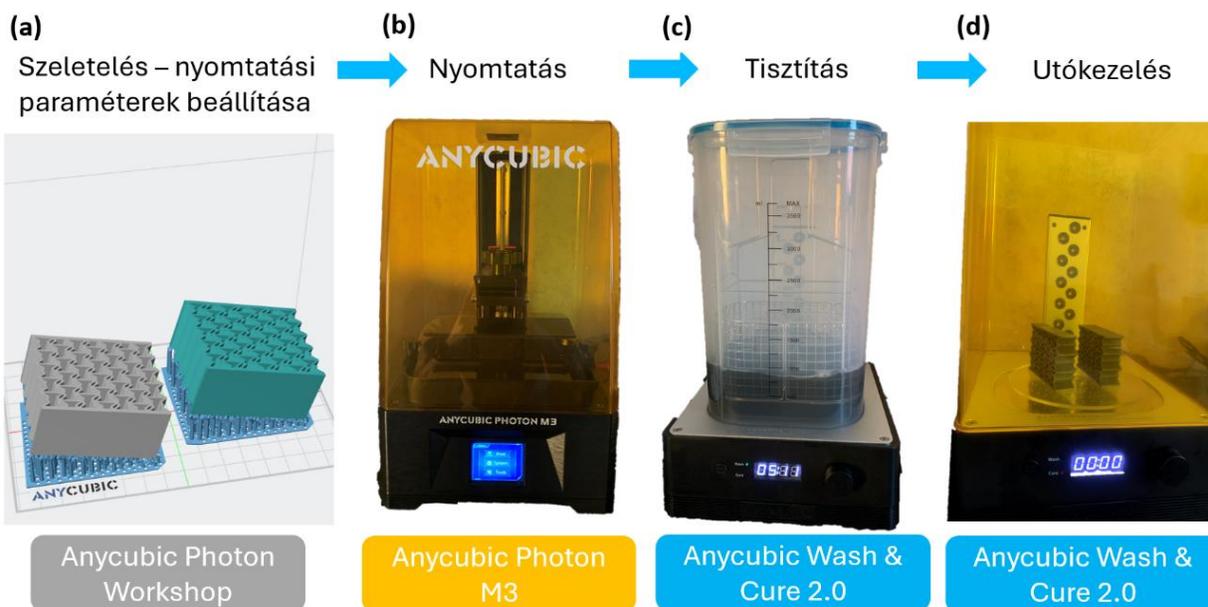
4.2 A kísérletek során felhasznált mintadarabokat előállító additív technológiájú berendezések

4.2.1 Szelektív lézerszinterézéssel (SLS) előállított darabok

Az alapvető vizsgálatokhoz (5. fejezet) a mintadarabok egy 3D Systems ProX 6100 (3D Systems Corporation, Rock Hill, CA, USA) típusú nyomtatón készültek. A munkatérben a mintadarabok vízszintes orientációban helyezkedtek el. A nyomtatást követően a por alapanyag maradéktalanul eltávolításra került kézi szerszámokkal a mintadarabok üregeiből. A zömítő vizsgálatokig a mintadarabok 50%-os relatív páratartalom mellett 22,5 Celsius-fok hőmérsékleten kerültek tárolásra UV védett helyen.

4.2.2 Maszkolt sztereolitográfia (mSLA) technológiával készült nyomatok

A geometriai fejlesztésen alapuló vizsgálatokhoz a gyorsabb kísérleti iterációk és a szabadabb anyaghasználat érdekében gyártástechnológiát váltottam. A geometriai módosításon alapuló mintadarabok tartályos fotopolimerizációval, pontosabban maszkolt sztereolitográfiával (mSLA) készültek egy Anycubic Photon M3 (Hongkong Anycubic Technology Co., Limited) típusú berendezésen (11. (b) ábra).



11. ábra. A maszkolt sztereolitográfia technológiai folyamatának bemutatása. (a) Modellek szeletelése, támaszolója, nyomtatási paraméterek beállítása a nyomtató számítógépes szoftverében; (b) Nyomatás; (c) Az elkészült mintadarabok tisztítása; (d) A tisztított mintadarabok utókezelése.

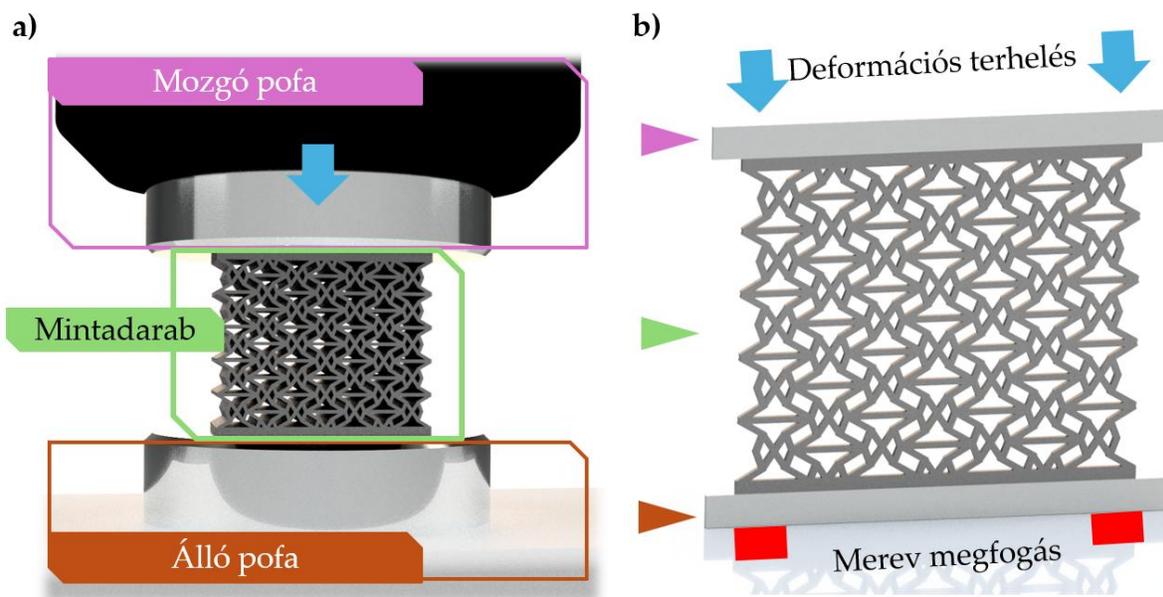
Természetesen a nyomtatást minden esetben egy számítógépes előkészület előzi meg (11. (a) ábra). A nyomtatást követően a mintadarabok eltávolításra kerültek az építőplatformról, majd 3 perces tisztító cikluson estek át egy Anycubic Wash&Cure 2.0 (Hongkong Anycubic Technology Co., Limited) berendezésen, amelynek tartálya 99,8% tisztaságú alkohollal volt feltöltve.

A tisztítást, valamint a mintadarabok száradását követően egy 15 perces UV keményítő ciklus következett az Anycubic Wash&Cure 2.0 típusú berendezésben (11. (c-d) ábra), melynek során a mintadarabok elnyerték végleges mechanikai tulajdonságaikat. A zömítő vizsgálatokig a mintadarabok 50%-os relatív páratartalom mellett 22,5 Celsius-fok hőmérsékleten kerültek tárolásra UV védett helyen.

4.3 A végeselemes környezet bemutatása

A bemutatásra kerülő hatásvizsgálatok és fejlesztések közül számos esetben előzetes végeselemes módszert is alkalmaztam az eredmények kiértékelésére, valamint a deformációs viselkedések, és a vizsgálat paraméterek hatásainak komplex megértésére. A végeselemes módszer alkalmazása az egyes főbb vizsgálatok – fejlesztések – során egyre jelentősebb teret kapott az eredmények kiértékelésében, a bemutatásra kerülő legutolsó vizsgálat során pedig egy olyan mértékben finomított modell felállítását sikerült elérnem, mely esetében a valós vizsgálatok kizárólag a modell validálására lettek felhasználva. A szimulációkat ANSYS Workbench 2023 és 2024 R1 szoftverben végeztem.

A végeselemes modell megalkotása során elsődleges célom a valós zömítő vizsgálatok rendkívül pontos leképzése volt. Ennek tükrében a zömítőgép álló és mozgó pofái is a vizsgálati elrendezés részét képezték, ezért a mintadarab és a pofák közti súrlódásos kapcsolatot is figyelembe vettem, így a végeselemes modell szerinti mintadarab ezen kapcsolat mentén is deformálódhat, mint ahogy ezt a valós vizsgálatok is mutatták. A mintadarabok és a zömítő berendezés pofái között a súrlódási tényező értéke 0,3 [141], melyet a 13. (a) ábra is szemléltet.

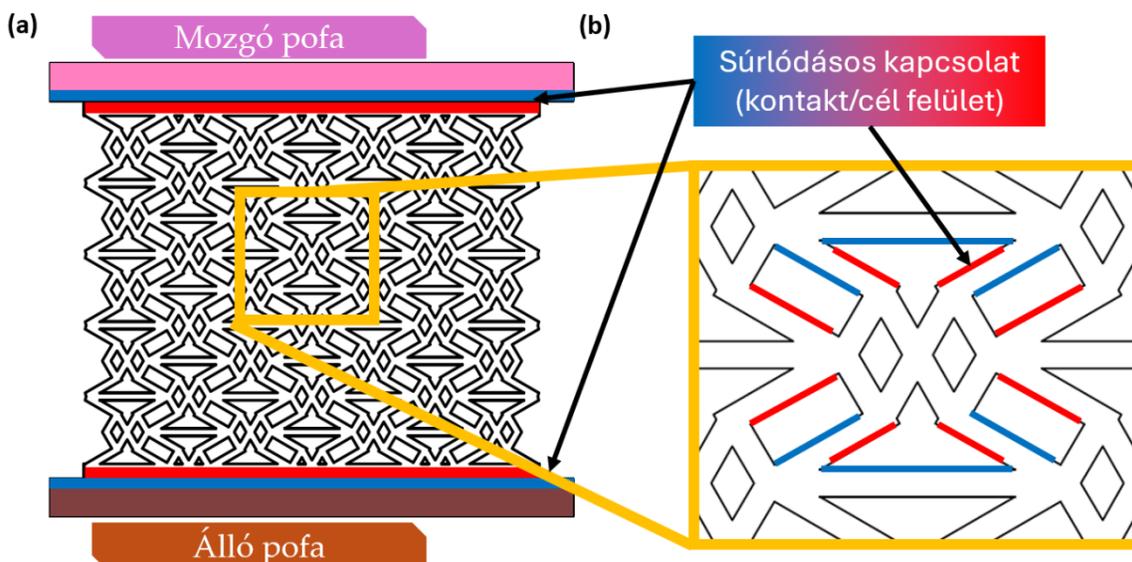


12. ábra. A zömítő vizsgálatok végeselemes leképzése. (a) Egy vizsgált mintadarab valós zömítő vizsgálati elrendezését leképező 3D CAD modell; (b) A valós zömítési környezet végeselemes leképzése

A valós zömítő vizsgálatok és a mintadarabok alakjából, valamint méretarányaiból kiindulva statikus, kétdimenziós szimulációk futtatása elengedően pontos. A 12. (a) ábra a valós, míg a 12. (b) ábra az abból leképzett végeselemes vizsgálati elrendezést mutatja (az ábrán látható fejlesztés a 6.3 fejezetben kerül ismertetésre). A 12. (b) ábrán látható módon a zömítő gép álló és mozgó pofája egy téglalap elemmel került leképzésre, melyek közül az alsó elem alsó éle merev megfogással kényszerített.

A mozgó pofát leképző felső téglalap felső élére került a terhelés megadása deformáció formájában a stabilabb konvergencia érdekében. A deformáció mértéke vizsgálatonként eltérő volt. A deformációs terhelést egy lépésben, számos részlépés mellett adtam meg. A nagy deformációk megengedése opció bekapcsolásra került a szimulációk során.

Deformáció során a mintadarab egyes élei egymással kapcsolatba lépnek, így minden lehetséges érintkezésbe lépő párt definiálnom kellett, melyre egy példát a 13. (b) ábra mutat. Az egyes egymással potenciálisan kapcsolatba lépő élek közötti súrlódási együttható értéke 0,17 [142].



13. ábra. Végeselemes kontakt-cél felület párok. (a) A mintadarab és a zömítő berendezés pofái közti kapcsolat szemléltetése; (b) Az elemi cellák potenciálisan kapcsolatba lépő élei közötti kapcsolatok definiálása. (Az ábrán látható fejlesztést a 6.3. fejezetben ismertetem.)

A modell pontosságát nagyban befolyásolja az anyagmodell. A zömítő berendezés álló és mozgó pofájának alapanyag szerkezeti acél, amelynek figyelembevételére egy a szimulációs szoftverbe beépített anyagmodellt használtam. A főbb mechanikai jellemzőket az 1. táblázat foglalja össze. Anyagmodell szempontjából igazán a mintadarab érdekes. A mintadarabok alapanyagát a vizsgálatokhoz igazítottam melyek rendkívül rugalmas, egyedileg kevert anyagból készültek. Az egyes alapanyagok végeselemes bemeneti vizsgálati eredményeit és az azokra épített végeselemes anyagmodellt az adott vizsgálatok esetében az adott fejezeteknél részletesen ismertettem; ugyanakkor a 4.4. fejezetben táblázatosan megtalálhatók a főbb anyag paraméterek.

1. táblázat. A zömítő berendezés pófáinak a végeselemes anyagmodellben figyelembe vett tulajdonságai

Tulajdonság	Érték	Mértékegység
Zömítő berendezés, szerkezeti acél		
Sűrűség	7850	kg/m ³
Maximális szilárdság	460	MPa
Young modulus	200	GPa
Poisson tényező	0,3	[-]

Minden esetben nagy deformációs terhelésig, szinte a teljes tömörödés határáig vizsgáltam a mintadarabok deformációját, így az egyes alkotók – élek között biztosan lép fel kölcsönhatások, melyeket előre definiálnom szükséges. Az egymással kapcsolatba lépő élek között a konvergencia segítségével érdekében minimális, 0,02 mm értékű egymásba hatolást engedtem meg.

4.4 Mintadarabok anyagai

Az eltérő fejlesztések eltérő, egyedi alapanyag keveréket igényeltek, így a nyomtatási paraméterek is eltérőek voltak, jelen fejezet egy áttekintő táblázat keretében mutatja be az alapanyagok jellemzőit, további információk megtalálhatók az adott fejlesztés fejezetében.

Az 5. fejezetben alkalmazott alapanyag:

A valós zömítő vizsgálatokhoz a mintadarabok egy porágyas (SLS) technológiájú 3D Systems ProX 6100 típusú gépen készültek, DuraForm ProX PA polimer alapanyagból [143]. A modellhez szükséges feszültség-fajlagos nyúlás értékeket a gyártói prospektusból, valamint korábbi kutatási eredményekből [144] nyertem ki.

A 6.1. fejezetben alkalmazott alapanyag:

2. táblázat. A kettősen homorú auxetikus méhsejt mintadarabok alapanyag modelljének főbb paraméterei

Jellemző	Érték	Mértékegység
Mintadarab alapanyag; 63% Resione F69 & 37% Photocentric U DLP		
Sűrűség	1,03	kg/m ³
Szakítószilárdság (5 mm/min)	6,12	MPa
Rugalmassági modulus	13,55	MPa
Anyag konstans C_{10}	0,4850	MPa
Anyag konstans C_{01}	1,8065	MPa
Összenyomhatatlansági paraméter	0,434782	1/GPa



A táblázatban megjelölt anyag konstans értékek a 6.1.3. fejezetben a szakítógörbékre (28.ábra) illesztett 2 paraméteres Money-Rivlin anyagmodell paramétereit.

A 6.2. fejezetben alkalmazott alapanyag:

3. táblázat. A kettősen homorú auxetikus méhsejt mintadarabok alapanyag modelljének főbb paramétereit

Jellemző	Érték	Mértékegység
Mintadarab alapanyag; 75% Litliq FX 60 & 25% Litliq TH 50		
Sűrűség	1,03	kg/m ³
Szakítószilárdság (5 mm/min)	5,31	MPa
Kezdeti szakasz rugalmassági modulus	128,3	MPa
kezdeti rugalmas szakasz fajlagos nyúlás érték	0,03	-

A táblázatban szereplő értékek a 42. ábra alapján kerültek meghatározásra.

A 6.3. fejezetben alkalmazott alapanyag:

4. táblázat. Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt végeeselemes anyagmodelljének főbb paramétereit.

Jellemző	Érték	Mértékegység
Mintadarab alapanyag; 75% Litliq FX 60 & 25% Litliq TH 50		
Sűrűség	1,03	kg/m ³
Szakítószilárdság (5 mm/min)	5,31	MPa
Anyag konstans C_{10}	0,4850	MPa
Anyag konstans C_{01}	1,8065	MPa
Összenyomhatatlansági paraméter	0,434782	1/GPa

A táblázatban megjelölt anyag konstans értékek a 6.3.2. fejezetben a görbékre (51.ábra) illesztett 2 paraméteres Money-Rivlin anyagmodell paramétereit.

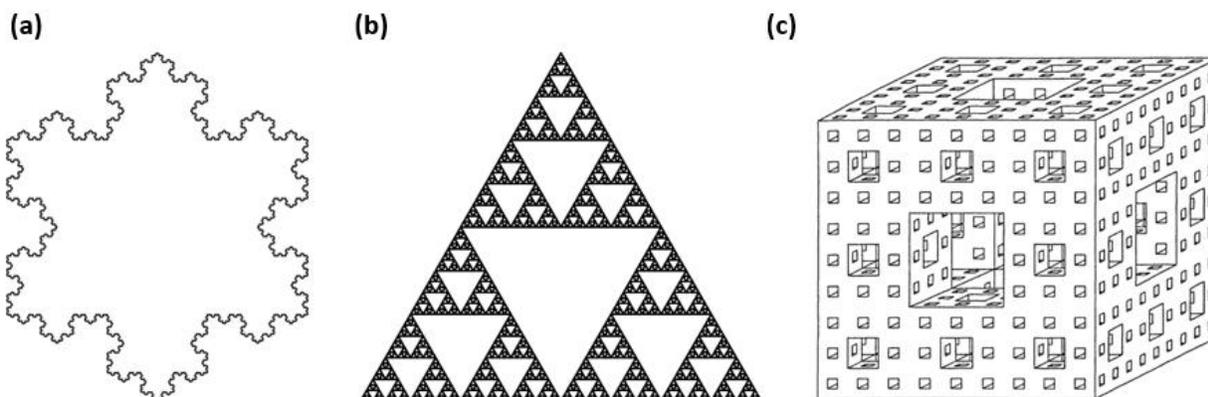


5 Geometriai paramétereknek a rácsszerkezetek tulajdonságira gyakorolt hatásának vizsgálata összehasonlítható, önismétlődő kísérleti elrendezéssel

5.1 Az elemszám hatásának vizsgálata

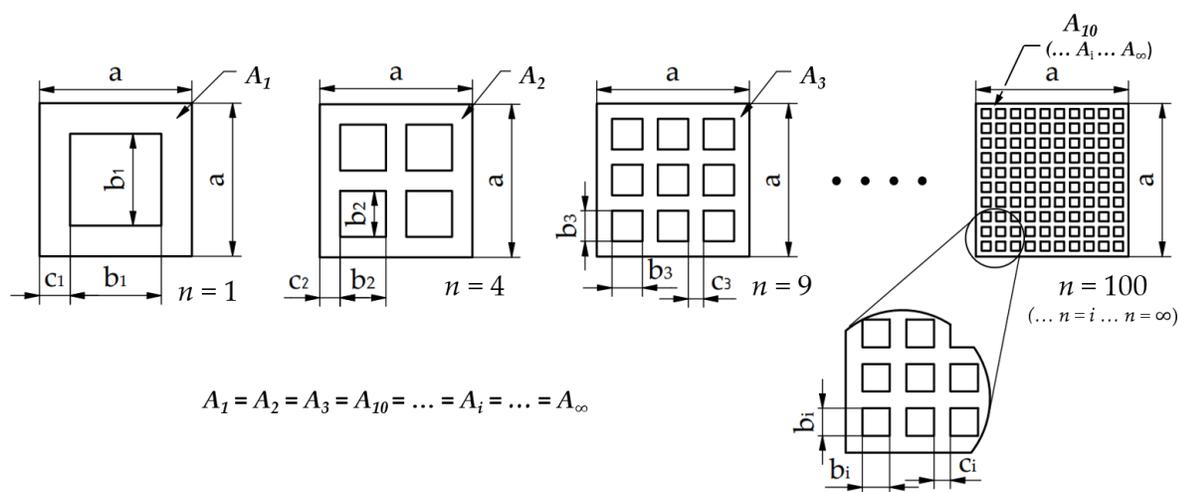
Az irodalomáttekintésben láthattuk, hogy számos alapvető geometriai hatás – mint például az elemszám, a szegmensek igénybevételi állapota – vizsgált terület. Azonban a vizsgálatok ezen tényezők hatását külön-külön számos esetben nehezen, (vagy nem) összehasonlítható módon elemezték. Fontos ezen hatások összehasonlítható vizsgálatának elvégzése, a mögöttes jelenségek alapos feltérképezése, a lattice struktúrák viselkedésének pontos ismerete és későbbi tervezhetőség érdekében. Az elemszám és az elemi cellákat felépítő alkotók igénybevételi állapotának párhuzamos elemzésére az önismétlődő, fraktál geometriákból inspirálódva dolgoztam ki egy vizsgálati geometria rendszert.

A fraktál geometriák története igen hosszú időkre nyúlik vissza, amely (bár nevüket később a XX. században Mandelbrot-tól kapták) a 17. században kezdődött. Már Gottfried Leibniz is elmélkedett a rekurzív ön hasonlóságról [145], majd az 1800-as évek végén Henri Poincaré és Felix Klein fedezte fel azokat az alakzatokat, melyeket ma "öninverz fraktáloknak" nevezünk [146]. 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 (14. (a) ábra). Nem sokkal később Waclaw Sierpinski 1915-ben alkotta meg azt mintát, amit ma Sierpinski-háromszöggént ismerünk (14. (b) ábra). Majd Benoit B. Mandelbrot [146] lengyel származású matematikus alkalmazta először a fraktál kifejezést, mely a latin fractus szó alapján "töröttet" vagy "töredezettet" jelent. Ezeket a fraktál geometriákra jellemző példákat ismerteti a 14. ábra.



14. ábra. Fraktál geometriák: a) Koch hópehely [147]; b) Sierpinski háromszög [147,148]; c) Sierpinski szivacs (3. iteráció) [149,150].

Célom, egy egyszerű négyzetes elemi cellákból felépülő mintadarabok széles tartományában párhuzamosan vizsgálni az elemszám és az elemi cella alkotói igénybevételi állapotának hatását. A fraktál ihletésű önismétlődésnek köszönhetően létrehozható egy olyan rendszer, melyben az elemszám növelésével – a ott befoglaló méreteken belül – nem változik a mintadarabok keresztmetszete, így térfogata és tömege sem. Az önismétlődő, de azonos keresztmetszetű mintadarabok származtatásának alapötletét a Sierpinski szivacs adta, melynek néhány lépését a 15 ábra szemlélteti.



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

15. ábra. A fraktál ihletésű, azonos keresztmetszetű mintadarabok származtatásának bemutatása, megjelölve a mintadarab főbb méreteit.

A mintadarabokat zömítő vizsgálatoknak vetettem alá, hogy megismerhető legyen az elemszám hatása és a kinyert mechanikai tulajdonságok változása.

5.1.1 Az önismétlődő mintadarabok matematikai leírása

Az alábbiakban ismertetem példaként, az 1 a 4 és a 9 elemi cellából felépülő metaanyagok keresztmetszeteinek egymásból való származtatását, majd a származtatás általános alakját az (1), (2) és (3) egyenleteken keresztül:

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

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

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

Feltételezve, hogy $A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_i$ az elemi cella méreteiből meghatározhatóak a további metaanyagok kivágandó részeinek mérete úgy, hogy a keresztmetszet (azonos mintadarab befoglaló méretek mellett azok tömege is) állandó maradjon. A 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 fennáll, 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 az elemszám hatásának komplexebb megértéséhez. Ehhez először az alkotó anyagrészek vastagságát kell meghatározni, mely a (14) összefüggéssel írható le.

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

A karcsúsági tényező jelen mintadarab sorozat esetében:

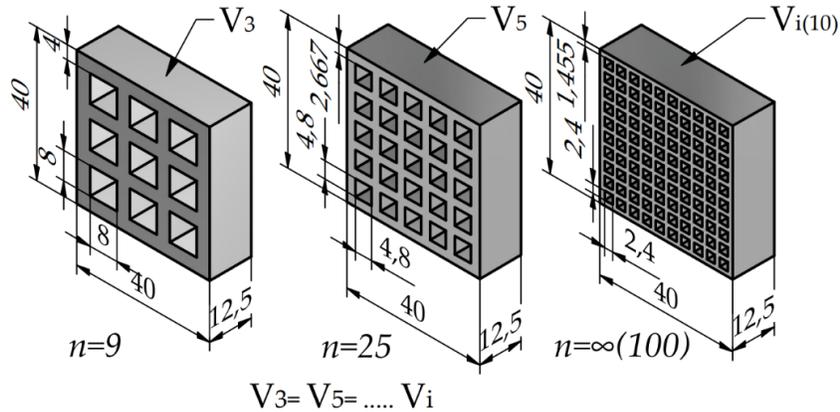
$$\frac{b_i}{c_i} = \frac{\frac{b_1}{\sqrt{n}}}{\frac{a - b_1}{\sqrt{n} + 1}} = \frac{b_1 \cdot (\sqrt{n} + 1)}{\sqrt{n} \cdot (a - b_1)}. \quad (15)$$

A karcsúsági arány az elemszám növelésével egy határértékhez tart (lásd 17. ábra).

A korábban bemutatott egyenletek alapján CAD szoftverben létrehoztam a mintadarabokat $n = 1 - 4 - 9 - 16 - 25 - 36 - 49 - 64 - 81 - 100$ elemszámmal.



A kiinduló méretek minden geometria esetében $a = 40$ mm, valamint $b_1 = 24$ mm. (Az elvi tömegük minden esetben 12,2 g volt) A létrehozott metaanyagok néhány jellemző CAD képét ismerteti a 16. ábra.



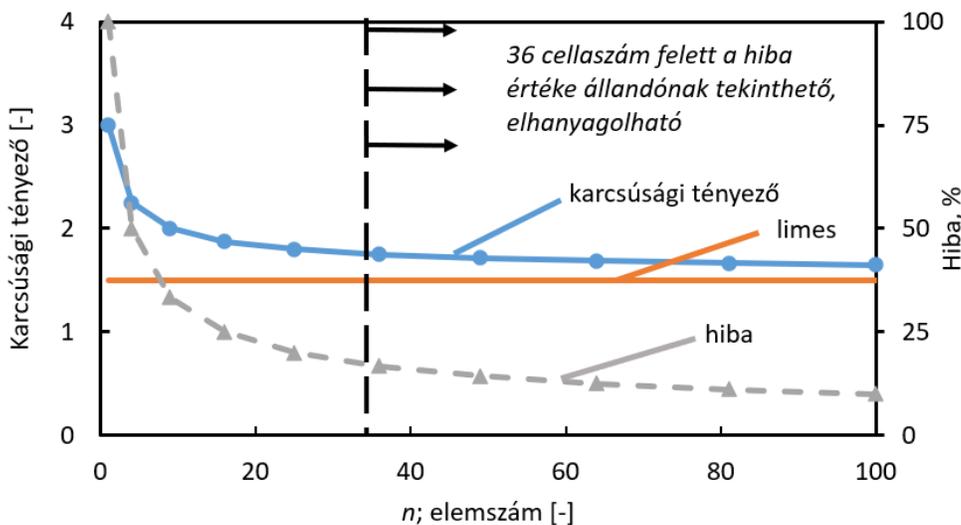
$$V_3 = V_5 = \dots V_i$$

16. ábra. Fraktál ihletésű mintadarabok CAD modellje különböző elemszámok mellett ($n = 9, 25, 100$).

A vizsgálat céljából létrehozott modellek méretei alapján a (15) egyenletbe behelyettesítve a konstans "a" valamint " b_1 " értékeket határérték-számítást végeztem, mely szerint a karcsúsági tényező ebben az esetben az 1,5 értékhez tart.

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

A (16) függvény ábrázolása a 17. ábrán látható. Belátható, hogy 36 elemszám felett a számított határértéktől kismértékű az eltérés, mely még tovább csökken az elemszám növelésével. Azaz, egy adott elemszám felett (ebben az esetben 36) a karcsúsági tényező értéke állandónak tekinthető, ezen megállapítás várhatóan majd a zömítési eredményekben is tükröződik.



17. ábra. A karcsúsági tényező alakulása az elemszám függvényében.

5.1.2 Mintadarabok készítése

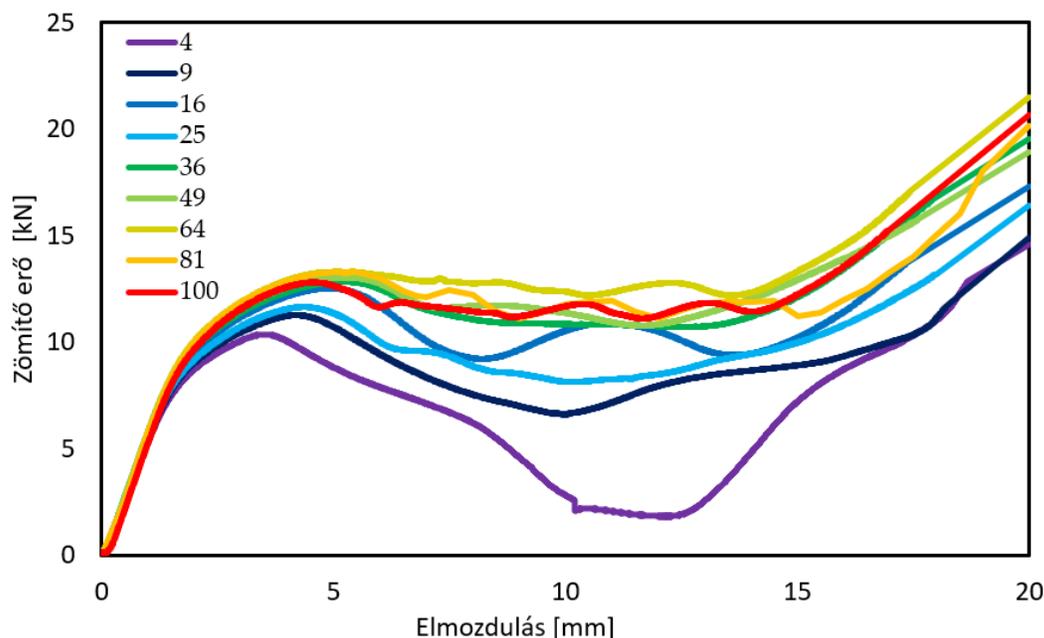
A mintadarabokat végeeselemes és valós környezetben is zömítésnek vettetem alá a tulajdonságok és hatások értékelésének érdekében. A valós zömítő vizsgálatokhoz a mintadarabok egy porágyas (SLS) technológiájú 3D Systems ProX 6100 típusú gépen készültek, DuraForm ProX PA polimer alapanyagból [143]. Nyomtatást követően a mintadarabok felületéről és üregeiből szükséges a por eltávolítása. A mintadarabok nyomtatást követően 50%-os relatív páratartalom mellett 22,5 Celsius-fok hőmérsékleten kerültek tárolásra és zömítésre.

5.1.3 A végeeselemes vizsgálatokhoz használt anyagmodell

A mintadarabok külső mérete $a = 40$ mm volt; a zömítést 20 mm deformációs terhelésig folytattam, így relatív nagy deformációk léptek fel. A 20 mm értékű deformációs terhelés a tömörödés megindulásának a határa, ahol már inkább az anyagjellemzők a hangsúlyosak; kutatómunkámban a lattice szerű viselkedés vizsgálata volt a célom. A jelentős deformációs terhelés, a fellépő kontaktok (érintkezési tartományok), valamint az alapanyag gyártó által megadott szakítódiaagram-görbék alapján belátható a probléma nemlineáris jellege. Az alapanyag viselkedését legnagyobb pontossággal egy multilineáris izotrópikus keményedést leíró modellel lehet közelíteni. A modellhez szükséges feszültség-fajlagos nyúlás értékeket a gyártói prospektusból, valamint korábbi kutatási eredményekből [144] nyertem ki. A zömítő vizsgálat esetében azonosok voltak a környezeti paraméterek a gyártó által végzett anyagvizsgálatokéval.

5.1.4 A vizsgálatok eredménye

A vizsgálatok a 4.1.2 fejezetben megadott paraméterek mellett, 20 mm deformációs terhelésig lettek végrehajtva, majd a kinyert erő – elmozdulás görbék és deformációs felvételek kiértékelésre kerültek a végeeselemes vizsgálatokkal együtt. A 18. ábrán bemutatott erő – elmozdulás görbék nemlineáris viselkedést mutatnak, eltérő számú és mértékű erő érték visszaesésekkel. Ezen szegmensek minden esetben tönkremeneteleket, töréseket – repedéseket jeleznek a mintadarabban. Ezeknek a szakaszok száma és az erőesés mértéke az elemszám növelésével csökken, sőt a 100 elemből álló mintadarab esetében szinte nem is vehető észre. A repedések megjelenése a terhelhetőség csökkenést jelenti, célszerű lenne a repedések kedvezőtlen hatásának csökkentésére és az elemszám növelésére egy határértéket találni. Megfigyelhető a zömítési görbék és a korábban levezetett karcsúsági tényező ((16) egyenlet) szoros kapcsolata. A nagyobb karcsúsági tényezőjű (azaz kevesebb elemből álló) mintadarabok hajlamosabbak a kihajlásra, így kisebb a deformációs ellenállásuk, valamint a jelentős laterális deformáció törésekhez is vezet. A karcsúsági tényező esetében kijelenthető, hogy 36 elem esetében már kellően pontosan közelíti a számított határértéket. Ugyanígy, tanulmányozva a 18. ábra erő-elmozdulás görbéit, belátható, hogy 36 elemszám felett minimális a görbékben megfigyelhető visszaesések mértéke.



18. ábra. A zömítő vizsgálat eredményei erő-elmozdulás értékek formájában az elemszám hatásának vizsgálatára.

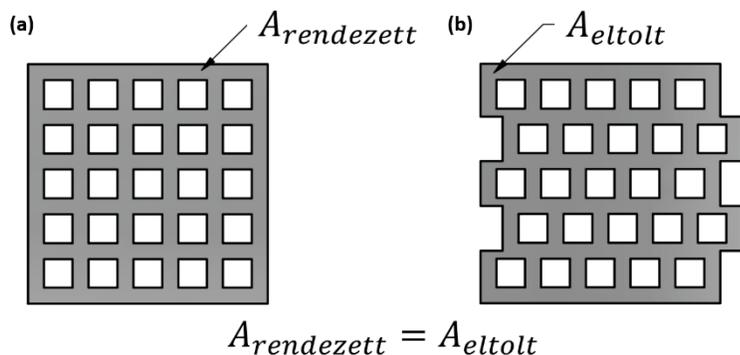
Összességében elmondható, hogy az elemszám növelése stabilabb, regressziómentes viselkedést eredményez. Az elemszám növelés kedvező hatása a mintadarabok terhelhetőségének növekedésében is megfigyelhető. Az elemszám 4-ről 36-ra növelése szinte megduplázza a szerkezet energiafelvevő képességét azonos tömeg mellett (*a felvett energia értékek a 5.2.3 számú fejezetben kerülnek kiszámításra*). Ugyanakkor belátható, hogy az elemi cellák geometriai paraméterei azonos mintadarab paraméterek esetében komoly hatással vannak a teljes mintadarab viselkedésére, jelen esetben a mikroszinten meghatározott karcsúsági tényező pontosan előre jelezte a stabil deformációs viselkedés határát. A karcsúsági tényező és a zömítési eredmények alapján belátható, hogy létezik egy olyan elemszám, mely felett az elérhető további energiafelvételi és terhelhetőségi kapacitás javulása csekély, miközben a gyártás és az utómunkálás jelentősen bonyolultabb. A fentiek értelmében meghatározható egy műszaki és gazdasági optimum is az elemszámmra, melyet az elérni kívánt mechanikai tulajdonságok jósága és az előállítás költsége mentén határozhatunk meg (*az optimum minden esetben technológia specifikus*).

5.2 Az alkotó szegmensek igénybevételi módjának hatása

Az előző fejezetben bemutatott egyszerű négyzetes, fraktál ihletésű mintadarabokon keresztül egzakt módon leírható az elemszám hatása. Célszerű ezen kísérletsorozatot az alapelvek megtartása mellett kibővíteni és megvizsgálni az alkotók igénybevételi állapotának hatását. Emellett, az előző pontban bemutatott eredményekkel összehasonlítva, az elemszám és az alkotók igénybevételi állapotának hatása együttesen is értékelhető.

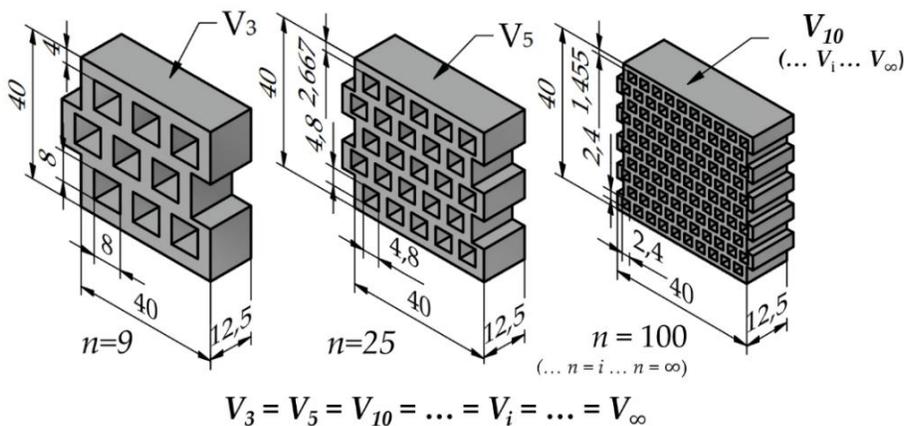
5.2.1 Eltérő igénybevételi állapotú mintadarabok létrehozása

A 5.1.1 számú fejezetben bemutatott elvek szerint a mintadarabok egy másik (a mintadarabok szempontjából) makroszinten eltolt elrendezésben is vizsgálatra kerültek. Eredményül olyan szerkezetek kerültek vizsgálatra eltérő elemszám mellett, melyek mikro szinten azonos elemi cellákból épülnek fel, de makroszinten rendezett (az 5.1 számú fejezetben már vizsgált) és sávosan eltolt kivitelűek. A 19. (a) ábrán az előző fejezetben vizsgált rendezett, míg a (b) ábrán az eltolt elrendezésű mintadarabra ismertetek egy-egy példát.



19. ábra. A két fraktál ihletésű elrendezés bemutatása. (a) Rendezett elrendezés az elemszám hatásának vizsgálatára, (b) Az eltolt elrendezés az alkotók igénybevételi állapota hatásának elemzésére.

Terhelés hatására várhatóan a rendezett geometriában a terhelés során (annak első fázisában) csak nyomott rudak jönnek létre, míg az eltolt geometriánál a vízszintes elemek rögtön hajlításnak lesznek kitéve (19. (b) ábra). Értelemszerűen a széleskörű összehasonlíthatóság érdekében az eltolt szerkezetű mintadarab geometriai paraméterei megegyeznek a rendezett mintadarabokéval.

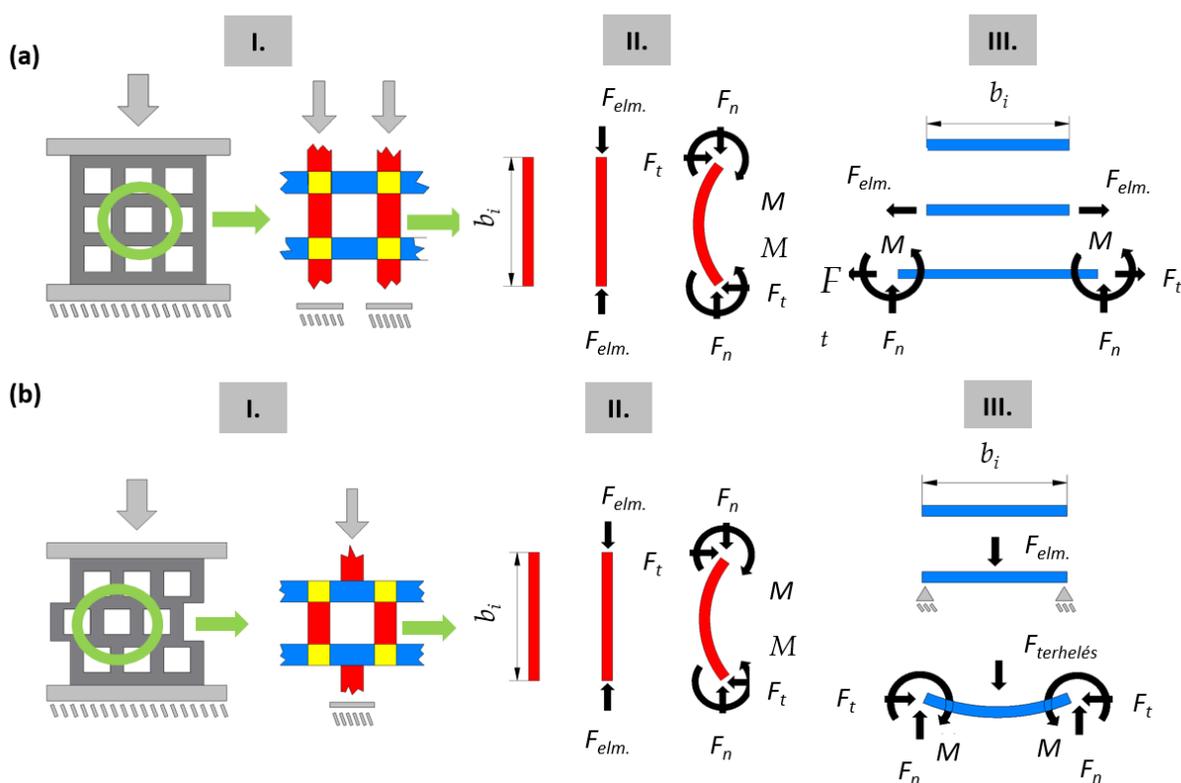


20. ábra. Eltolt elrendezésű fraktál ihletésű mintadarabok CAD modellje különböző elemszámok mellett ($n = 9, 25, 100$).

Néhány, CAD környezetben létrehozott mintadarabot ismertet a 20. ábra. Az elemszám és alkotók igénybevételi állapotának párhuzamos hatáselemzése érdekében, az eltolt mintadarabok vizsgálata is azonos elemszám tartományon történt.

5.2.2 A makroszerkezeti viselkedés becslése mikroszerkezeti alkotók alapján

Az egyes szerkezetek, jelen esetben a rendezett és a középpontosan eltoltt szerkezet makroszerkezeti szintű viselkedése, a mintadarabok alkotókra bontásával, az alkotók igénybevételi állapotának felírásával magyarázható a következők, valamint a 21. ábra szerint. Az alkotókra bontás határát minden esetben az eltérő elemi terhelésű régiók képezik, melyek jelen struktúrák esetében vízszintes (kék) és függőleges (piros) valamint csomóponti (sárga) elemeket eredményeznek. A várható elméleti deformációs viselkedések egyszerűsítve a 21. ábrán kerülnek megjelenítésre. A 21. ábra háromféle terhelési esetben mutatja a kétféle (rendezett és sávosan eltoltt) szerkezetű mintadarabok nyomóterhelésre adott válaszlát. Az ábrákon a nyugalmi – terhelés előtti egyensúlyi állapotot (I.) egy a terhelés ráadásának pillanatában fellépő terhelési rendszer megjelenítése (II.) követi. Végül az ábrák, már egy várható alakváltozást mutatnak a fellépő erőkkel, nyomatékokkal (III.).



21. ábra. Az rendezett (a) és az eltoltt (b) mintadarabok alkotókra bontása, az alkotók terhelési állapotának jelölésével.

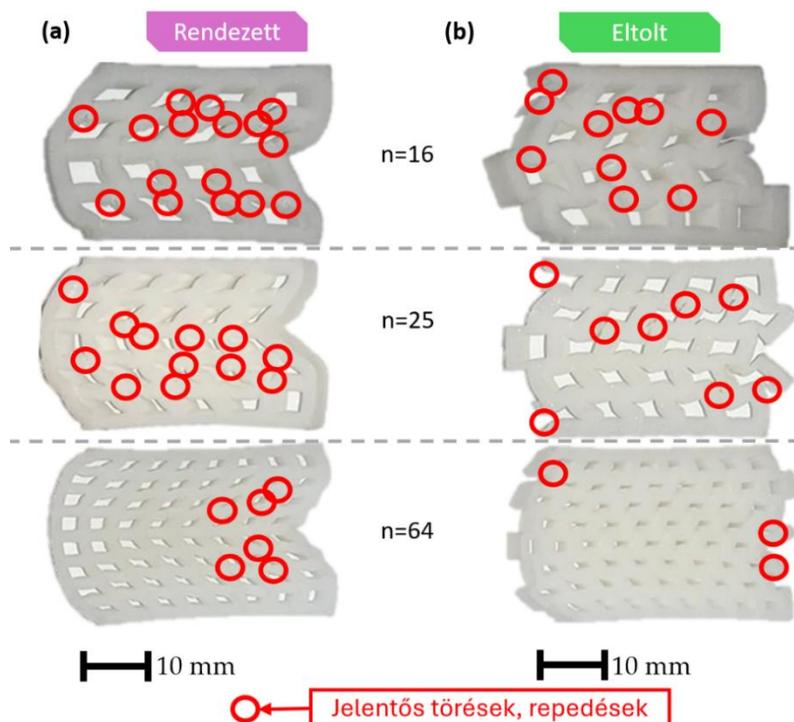
A rendezett struktúrában (21. (a) ábra) a függőleges anyagrégiók kezdetben tisztán nyomásnak, míg a vízszintes régiók tisztán húzásnak kitétek.

Megjegyzendő, hogy főleg a deformáció kezdeti szakaszaiban a nyomott anyagrégiók jelentősebben terheltek a húzottakhoz képest, így a geometria nem egyenletesen kihasználta. 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 (21 (b) ábra). A függőleges (piros) anyagrégiók a nyomóterhelés hatását közvetlenül átadják a vízszintes régiók központjában. Eredményül egy kéttámaszú tartót kapunk központi nyomó- (hajlító) terheléssel. Ugyanakkor, az eltolt rendszer esetében is kijelenthető, hogy a függőleges nyomott régiók kihajlása is fellép a terhelés előrehaladtával, tehát nem tisztán nyomott rudakról beszélünk.

5.2.3 A vizsgálatok eredménye

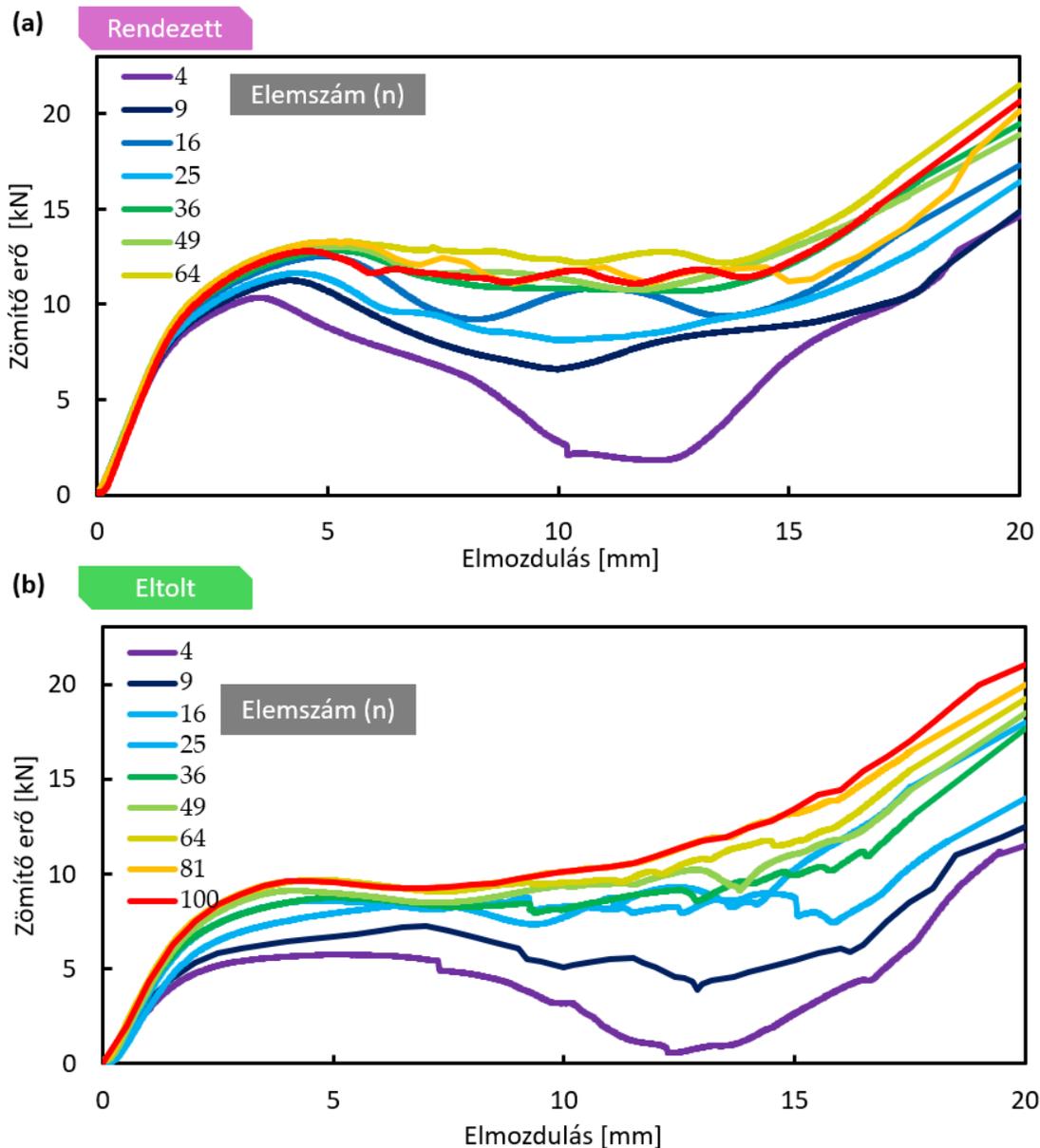
Az eltolt mintadarabok azonos anyagból készültek, valamint azonos módon kerültek zömítésre ugyanúgy, mint az 5.1. fejezetben ismertetett rendezett darabok így az eredmények összehasonlíthatók. A 22. ábrán valós zömítés utáni állapotban látható pár rendezett és eltolt szerkezetű mintadarab. A mintadarabokban repedések figyelhetők meg, de méretük és számuk az elemszám növelésével csökken.



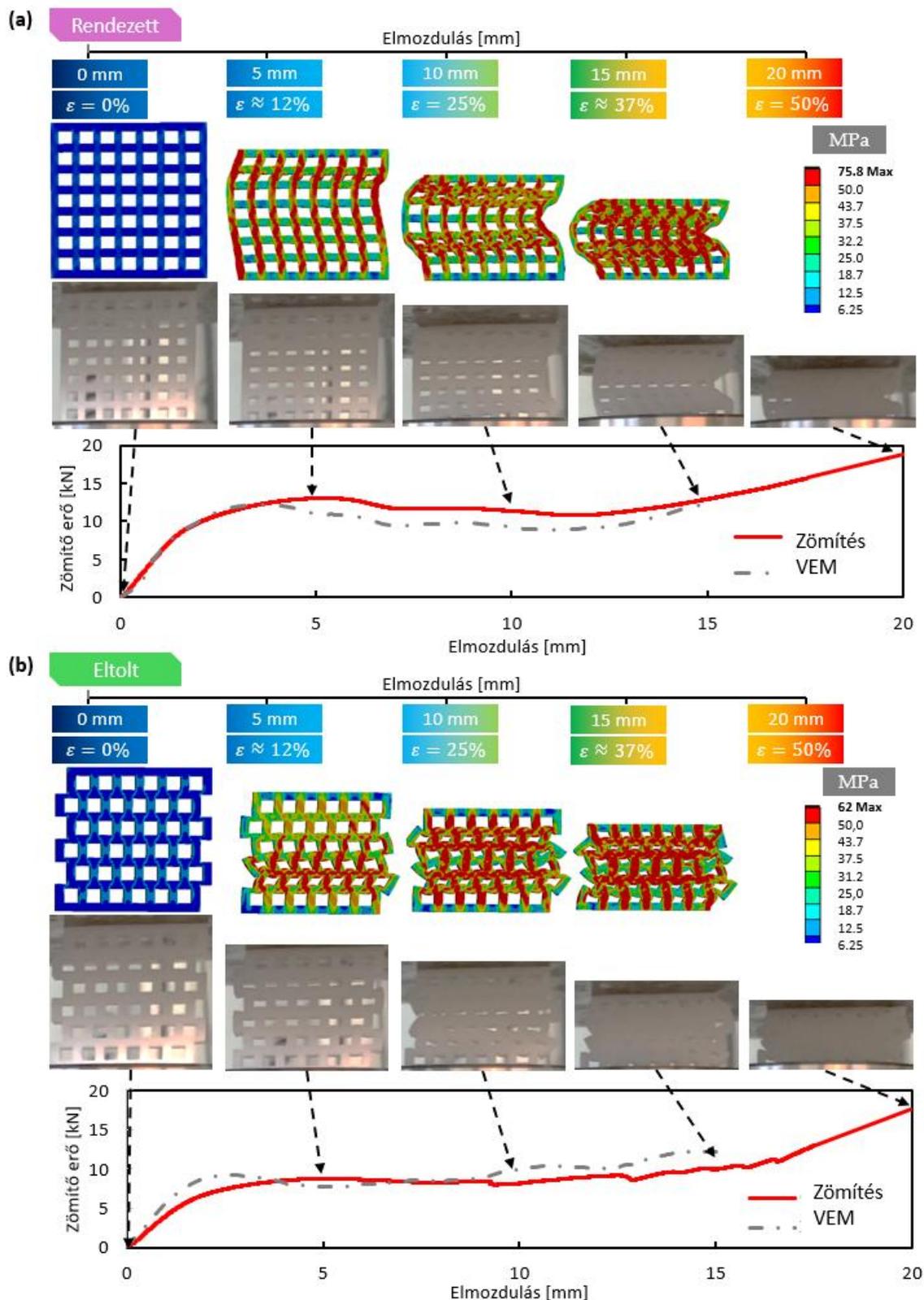
22. ábra. A mintadarabok valós zömítést követően ($n=16, 25, 64$), karikázva a jelentősebb töréseket, repedéseket. (a) Rendezett mintadarabok; (b) Eltolt mintadarabok.

Továbbá megfigyelhető a deformált alakokban egy jelentős különbség. A rendezett szerkezet tisztán nyomó terhelésnek kitett elemei miatt, minden esetben egy jelentős laterális kihajlás rajzolódik ki, míg a középpontosan eltolt mintadarabokra inkább egy önmagukba zömülő deformáció jellemző. Célszerű az 5.1.4 számú fejezetben már bemutatott erő-elmozdulás görbéket összevetni a sávosan eltolt mintadarabok zömítésével kapott görbékkel.

A 23. ábra a) és b) részletén mind a rendezett, mind a sávosan eltolts minták esetében nem lineáris, regressziókkal tagolt a karakterisztika. Különbség azonban a regressziók mértékében figyelhető meg, ugyanis az eltolts mindarabok esetén csupán a 4 és 9 elemi cellából álló változatoknál lép fel regresszió. Az eltolts struktúrára jellemző együttes hajlító és nyomó igénybevételének köszönhetően az ilyen darabokban stabilabb a viselkedés, mint a rendezett geometriájú mintákban, ahol tisztán nyomóigénybevételűek az alkotók. A hajlításnak kitett alkotók terhelési ellenállása azonban kisebb, mint a nyomott régióké így a görbéken látható kezdeti erő maximum értéke is alacsonyabb.



23. ábra. Fraktál ihletésű mintadarabok erő-elmozdulás grafikonja. (a) Rendezett mintadarabok erő-elmozdulás görbéi; (b) Eltolts mintadarabok erő-elmozdulás görbéi.



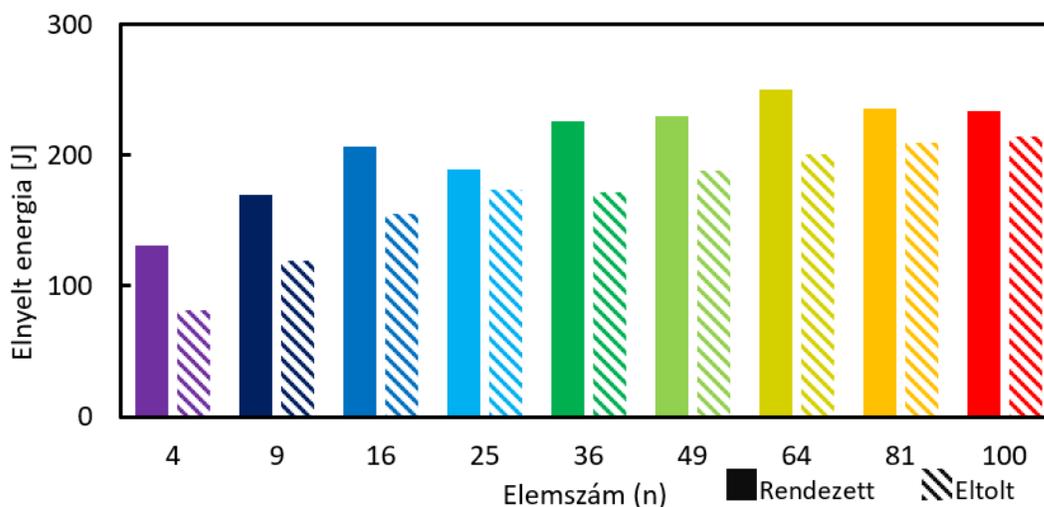
24. ábra. A deformációs viselkedés alakulása a deformációs terhelés függvényében. (a) Rendezett mintadarabok ($n=49$); (b) Eltolt mintadarabok esetén ($n=36$).

A 22. ábrán már láthattuk, hogy a rendezett és sávosan eltoltt struktúrák zömítést követően eltérő deformációs viselkedést mutattak. Érdekes ugyanakkor a nyomóterhelés előrehaladtával a deformációs viselkedés alakulását is megtekinteni, melyet az általam készített felvételek és végeelemes szimulációkon keresztül a 24. ábrán mutatok be. Az 24. (a) ábra egyértelműen bemutatja, hogy a rendezett geometriák esetében már a nyomóterhelés kezdeti szakaszába fellép a kihajlás, mely a deformáció előrehaladtával fokozódik. Megfigyelhető, hogy a nyomott függőleges szegmensek jelentősen nagyobb igénybevételnek vannak kitéve a többi alkotóhoz képest, így nem egyenletes a szerkezet feszültség eloszlása. Az eltoltt geometriák esetében egy szép, lépcsőzetes, irányított, önmagába roskadó deformációs viselkedés mutatkozik (24. (b) ábra). Nagyteljesítményű lattice-ek esetében elvárás az olyan kiszámítható viselkedés, mint amelyet a középpontosan eltoltt struktúra is mutat. Így célszerű a kihajlásra hajlamos elrendezések kerülése. A szerkezet feszültség eloszlása is egyenletesebb az eltoltt szerkezet esetében, valamint a mintadarabokra kisebb maximális feszültség értékek jellemzőek. A mért és szimulált deformációs képek és erő-elmozdulás értékek közel azonosak, mely a felállított végeelemes vizsgálati környezet pontosságáról tanúskodik.

Mint az irodalmi áttekintésben is említésre került a rácsszerkezeteket elterjedten alkalmazzák energia-felvételi feladatokra, így fontos vizsgálni az elemszám és az alkotók igénybevétel állapotának hatását az energia felvevő képességre. Az energia-felvevő képesség az erő-elmozdulás görbék alatti területtel definiálható a (17) egyenlet szerint.

$$E_{felvett} = \int_0^{20} f(x) dx \quad (17)$$

A számított felvett energia értékek a 25. ábrán láthatóak.



25. ábra. Fraktál ihletésű mintadarabok energiafelvevő képessége; tömör kitöltéssel a rendezett míg sraffozott kitöltéssel az eltoltt mintadarabok esetén meghatározott értékek láthatók eltérő elemszám mellett.

Fontos megjegyezni, hogy mivel minden egyes mintadarab az egyedi önismétlődés alapú elrendezésnek köszönhetően azonos tömegű, ezért az eredmények a teljes vizsgálati tartományon összehasonlíthatóak egymással.

Az eltolt mintadarabok energia felvevő képessége a várakozásoknak megfelelően alacsonyabb a tisztán nyomó igénybevételnek kitett alkotókból álló rendezett mintadarabokétól. A fenti ábra alapján kijelenthető, hogy az elemszám növelése mindkét struktúra esetében energia felvevő képesség növekedést eredményez. A rendezett struktúra kiszámíthatatlan deformációs viselkedése miatt azonban nem olyan mértékű a korreláció és a monoton növekedés az elemszám és energiafelvételi képesség kapcsolatban, mint ami az eltolt struktúrák esetében figyelhető meg. A karcsúsági tényező hatása az energia felvevő képesség tekintetében is érződik. 36 elemszám felett, bár van növekedés az energia felvevő képességében, annak mértéke nem közelíti meg az elemszámra vonatkozó határérték alatti növekedés mértékét. Az elemszámot 4-ről 36-ra növelve közel kétszeres, vagy több, mint kétszeres növekedés érhető el mind a rendezett, mind az eltolt mintadarabok esetében.



6 Az auxetikus méhsejt szerkezet tulajdonságjavítása

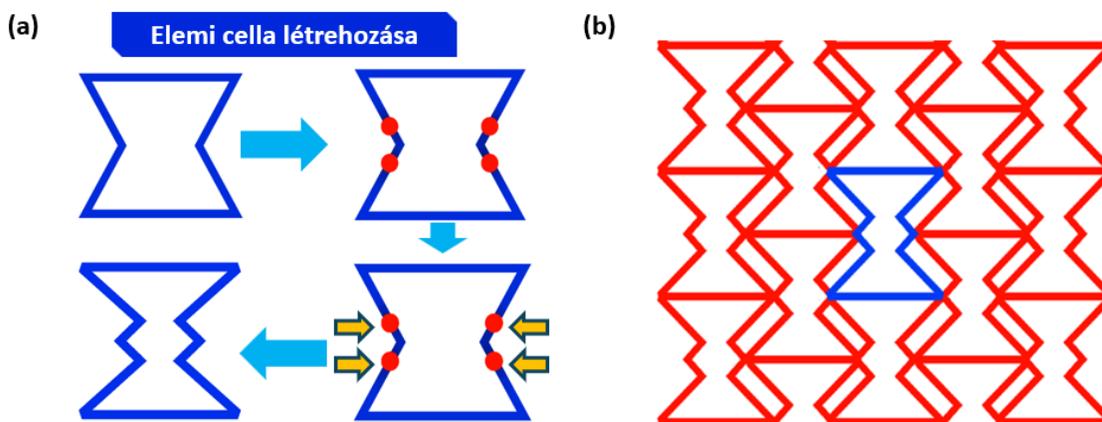
Az irodalmi áttekintés során ismertetésre került az auxetikus méhsejt szerkezet, a struktúra előnyei, felhasználási területei és hátrányai is. Céloom a szerkezet olyan kedvezőtlen tulajdonságainak, mint a kihajlásra való hajlam vagy a kismértékű deformációs ellenállás ellensúlyozása egy nagy teljesítőképességű, széles körben alkalmazható lattice szerkezet elérésének érdekében. A következő fejezetben ezen fejlesztéseim kerülnek bemutatásra. A fejlesztéseket az irodalmi áttekintésben (2.3. fejezet) bemutatott módszerek ihlették.

6.1 Kettősen homorú kialakítás

Az irodalmi áttekintésben bemutatottak szerint, az auxetikus méhsejt struktúra számos kedvező tulajdonsággal, ugyanakkor homorú deformációs mechanizmussal rendelkezik. Az ilyen viselkedésű mintadarabok kihajlásra hajlamosak és kis deformációs ellenállással rendelkeznek. Céloom a struktúra kedvezőtlen jellemzőinek kiküszöbölésével az egyes mechanikai – ideértve a deformációs tulajdonságokat – javítása egy újfajta struktúra megalkotásával.

6.1.1 Kettősen homorú kialakítás létrehozása

Az auxetikus méhsejt homorú éleit további töréspontokkal láttam el, melyeket az elemi cella belsejébe toltam el, így született meg a kettősen homorú szerkezet (26. (a) ábra).

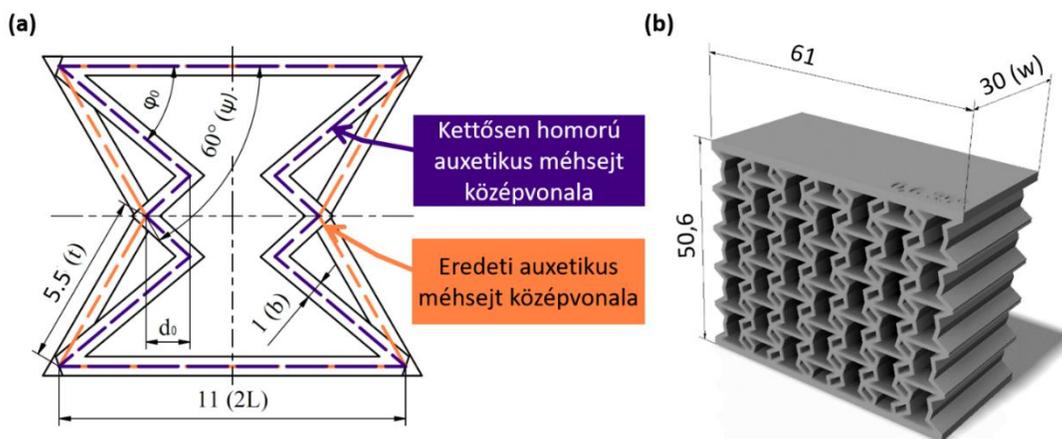


26. ábra. Az új, kettősen homorú auxetikus méhsejt létrehozásának elve. (a) A kettősen homorú auxetikus méhsejt elemi cella származtatása; (b) Az új elemi cellákból összeállított szabályos lattice.

A kettősen homorú kialakítás által bevitt töréspontok erőteljesebben definiált cellán belüli deformációs lehetőséget, valamint egyenletesebb cellán belüli anyageloszlást kölcsönöznek a struktúrának. A 26. (b) ábra egy, az új elemi cellákból felépített minta rácsszerkezetet szemléltet. A kettősen homorú kialakítás elméletben növelheti a szerkezet auxetikusságát, mely a kialakult négyszög szerkezetekkel kombinálva növekszik a szerkezet stabilitása. Ezen a ponton fontos megemlíteni, hogy az új kialakításból adódóan a homorú élek nem közös élek, így több élből épül fel az új szerkezet a homorú méhsejthez képest, ezért az eredményeket tömegre fajlagosítva is kell értékelni.

6.1.2 A kettősen homorú szerkezet és mintadarabok geometriai jellemzése

Az új, kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezet fejlesztése két paraméterrel jellemzett: egy eltolás (*offset* - d_0) és egy szög (*deg* - φ_0) paraméterrel a 27. (a) ábra szerint. Az ábra az elemi cella jellemző méreteit is mutatja. Az *offset* paraméter az új töréspontok eltolásának mértéke az eredeti töréspontokhoz képest. A *deg* paraméter pedig a vízszintes élek és az újonnan bevezetett homorú élek által bezárt szög. Az *offset* és *deg* paraméterek értékei az elemi cellák középvonalaitól mérték, melyet az 27. (a) ábrán szaggatott vonalakkal jelöltem.



27. ábra. A kettősen homorú elemi cella geometriai jellemzése, (a) Az elemi cella létrehozását jellemző geometriai paraméterek kiegészítve az elemi cella főbb méreteivel; (b) Az elemi cellákból összeépített vizsgálati mintadarab főbb méretei.

Az elemi cellákból mintadarabokat készítettem, melyre egy példát a főbb mintadarab méretekkel a 27. (b) ábra mutat. A mintadarabok elég elemi cellát tartalmaznak ahhoz, hogy megbízhatóan jellemezni tudják annak viselkedését. Korábbi vizsgálataim alapján, az 5x7 elemi cellából felépülő mintadarabok kellően pontosan előre tudják jelezni egy végtelen elemi cellából álló szerkezet viselkedését [S11]. A síkból történő kihajlás elkerülése érdekében a mintadarabok 30 mm mélységűek rendelkeznek (*w* méret, 27. (b) ábra). A zömítési terhelést a mintadarabok alsó és felső felületén, az elemi cellákat is összefogó 2 mm vastag tömör lap közvetíti. A geometriai módosítás hatásának teljes értékű elemzése céljából egy széles paramétertartományon vizsgálom és értékelem ki az eredményeket. A főbb geometriai paramétereket és a használt mintadarab elnevezéseket a 5. táblázat ismerteti.

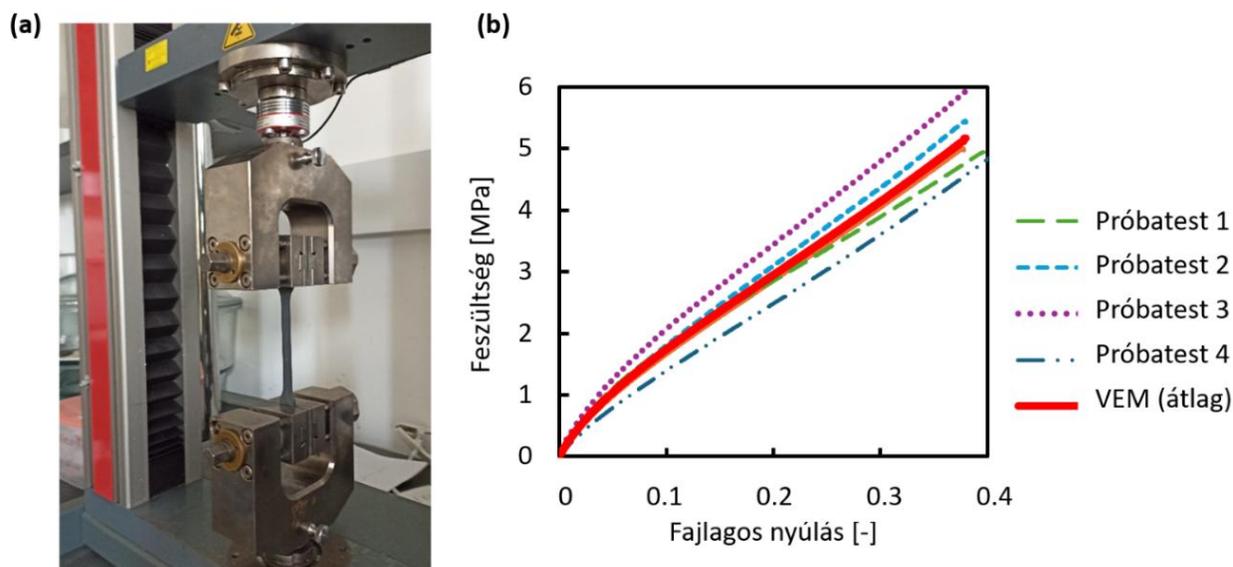
5. táblázat. A kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezet kapcsán vizsgált paraméterkombinációk

Elnevezés	0630D	0635D	0640D	1030D	1035D	1040D	1430D	1435D	1440D
d_0 [mm]	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,4
φ_0 [mm]	30	35	40	30	35	40	30	35	40

A 9 mintadarab mellett egy etalon, az eredeti auxetikus méhsejt cellákból álló mintadarab is elkészült, a fejlesztési eredmények összehasonlíthatóságának érdekében.

6.1.3 Mintadarabok készítése

A mintadarabokat zömítési vizsgálatnak vettem alá, nagy deformációs terheléssel, célom, hogy zömítés során a mintadarabok rugalmasan viselkedjenek, a keletkező törések mértéke minimális legyen, a deformációs viselkedés széles spektrumon történő értékelése érdekében. Egy kellően rugalmas, de ugyanakkor ellenálló nyomtató gyanta keveréket sikerült létrehoznom a mintadarab készítéshez, mely 37% Photocentric U DLP szilárd (szürke) [151] és 63% Resione F69 [152] rugalmas (fekete) gyanta homogén keverékéből áll. Az egyedi alapanyag keverék mechanikai tulajdonságait szakítóvizsgálatokkal határoztam meg, melynek eredményeit a 28. (b) ábra szemlélteti. Látható, hogy a szakítógörbék minimálisan térnek csak el egymástól így az eredmények elfogadhatók. A görbék átlaga képezi a végeeselemes anyagmodell bemenetét (lásd 28. (b) ábra). Szemléltetés képen, közelítésként a teljes görbét közel lineárisnak tekintve rugalmassági modulus értéke $E = 13,55 \text{ MPa}$, szakítószilárdsága pedig $\sigma_p = 5,31 \text{ MPa}$.



28. ábra. A kettősen homorú auxetikus méhsejt mintadarabokhoz készített anyagkeverék vizsgálata. (a) Szakítógépen végzett vizsgálati elrendezés; (b) A szakítóvizsgálattal kapott feszültség – fajlagos nyúlás diagrammok.

A mért feszültség–fajlagos deformáció értékekre egy kétparaméteres Mooney-Rivlin modell illeszkedett a legjobban (eredetileg Mooney [153] származtatta, majd Rivlin [154] a Cauchy-Green féle deformációs tenzorinvariánsokkal fejezte ki). A modell paramétereit 6. táblázat foglalja össze.



6. táblázat. A kettősen homorú auxetikus méhsejt mintadarabok alapanyag modelljének főbb paraméterei

Jellemző	Érték	Mértékegység
Mintadarab alapanyag; 63% Resione F69 & 37% Photocentric U DLP		
Sűrűség	1,03	kg/m ³
Szakítószilárdság (5 mm/min)	5,31	MPa
Anyag konstans C_{10}	0,4850	MPa
Anyag konstans C_{01}	1,8065	MPa
Összenyomhatatlansági paraméter	0,434782	1/GPa

Az egyedileg kevert alapanyag nyomtatási paramétereit a 7. táblázat foglalja össze.

7. táblázat. A kettősen homorú auxetikus méhsejt mintadarabok nyomtatásánál beállított paraméterek.

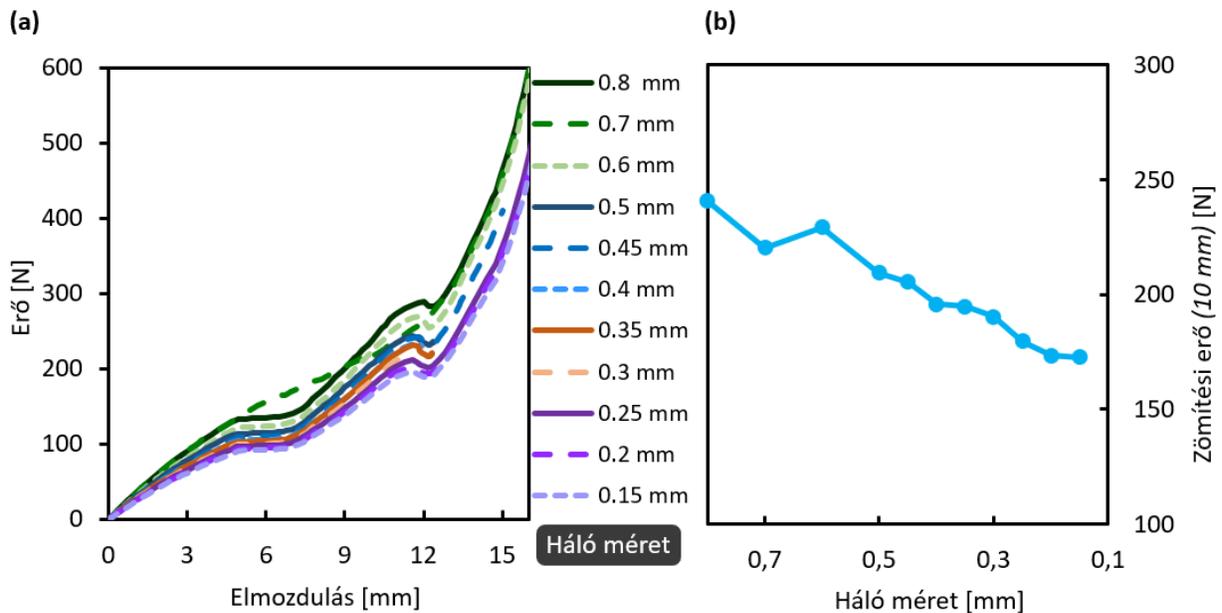
Műgyanta nyomtatási paraméterek:	
Alsó réteg expozíciós idő:	40 s
Alsó rétegek száma:	6
Általános expozíciós idő:	4 s
Réteg vastagság:	0,05 mm
Expozíció mentes nyugalmi idő:	2 s
A z irányú emelési magasság:	4,5 mm
A z irányú emelési sebesség:	0,5 mm/s
Nyomtatandó tárgy paraméterek:	
A z irányú távolság az építő asztaltól:	5 mm
Orientáció az építő asztalhoz képest:	14°
A támaszszerkezet sűrűsége:	Sűrű
Legkisebb támasznyúlvány távolság:	0,5 mm
Az alaplemez vastagsága:	1 mm

6.1.4 A végeelemes vizsgálatok előkészítése

A végeelemes vizsgálati környezet a 4.3. fejezetben leírtak szerint került felállításra. Az optimális hálóméret meghatározásához érzékenység vizsgálatot végeztem. Az érzékenység vizsgálatot egy $offset = 1.0 \text{ mm}$ és $deg = 35^\circ$ paraméter kombinációval jellemezhető mintadarabon végeztem el, a lattice szerű deformációs viselkedés határáig, mely 16 mm átlagosan. Előljáróban fontos megjegyezni, hogy a lattice-szerű viselkedés határa a tömörödés megkezdéséig tart, ameddig jelentős porozitás és deformációs tartalék jellemzi a mintadarabokat.



Az érzékenység vizsgálatot számos eltérő hálóméret mellett elvégeztem a 0-16 mm deformációs tartományon (29. (a) ábra), a háló finomítása biztosabb konvergenciát eredményezett nagy deformációk mellett is. A 10 milliméter deformációs terheléshez tartozó erőértékeket a 29. (b) ábra szemlélteti, ami alapján látható, hogy a háló legalább 0,25 mm méretű kell legyen, mivel ezen háló méret mellett közelíti a szimuláció a stabil erő értéket. A konvergencia érdekében a mintadarabok hálómérete 0,2 mm.



29. ábra. A kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezeten végzett végeselemes háló érzékenység vizsgálat. (a) Erő – elmozdulás görbék különböző hálóméretetek mellett; (b) Maximális zömítő erő 10 mm deformációs terhelés mellett.

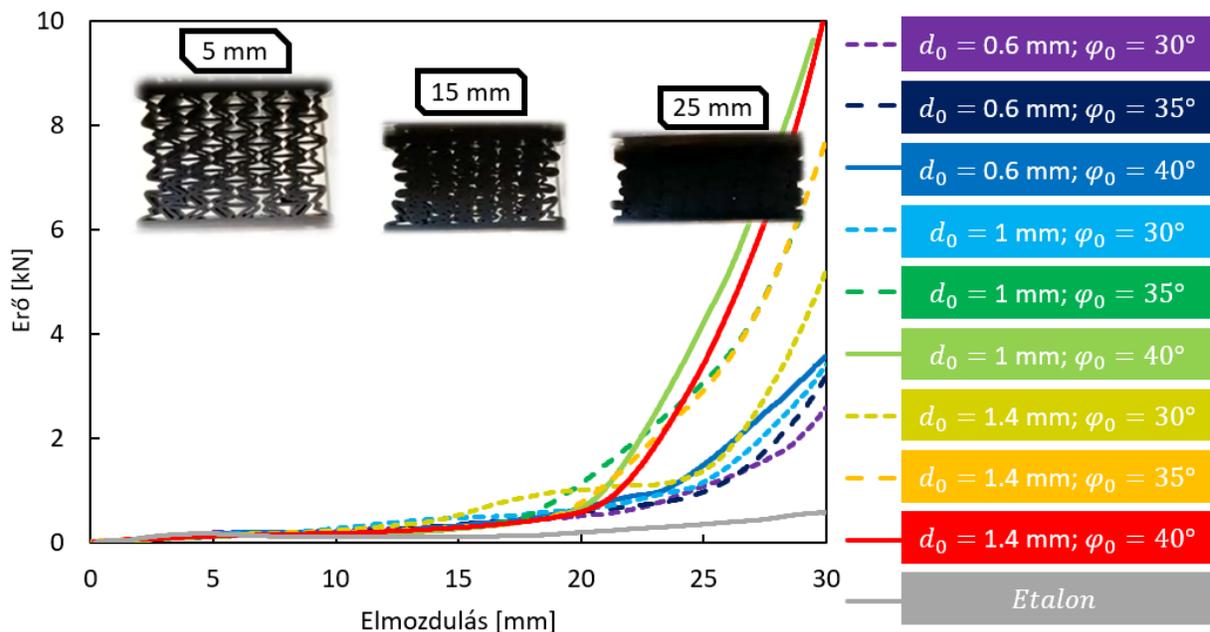
Az új kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezet várható mechanikai tulajdonságait analitikus módszerrel is közelítettem, melyet az **1. Melléklet** ismertet.

6.1.5 Az újonnan megalkotott (kettősen homorú szerkezet) elemi cella hatása

A zömítő vizsgálatok 30 mm deformációs terhelésig lettek elvégezve mind a 9 korábban bemutatott mintadarabon és az etalon mintadarabon egyaránt. A 30 mm értékű deformációs terhelés a mintadarabok többségében a tömörödés megindulásának határa; így a lattice szerű viselkedés képezi csak az értékelés részét. A mért erő-elmozdulás értékek a 30. ábrán kerülnek bemutatásra.

A 30. ábrából egyértelműen látható, hogy az új geometria esetében mérhető maximális zömítési erő értékek minden esetben nagyobbak, mint az etalon esetében. A paraméterek hatása komplex elemzést követel meg.





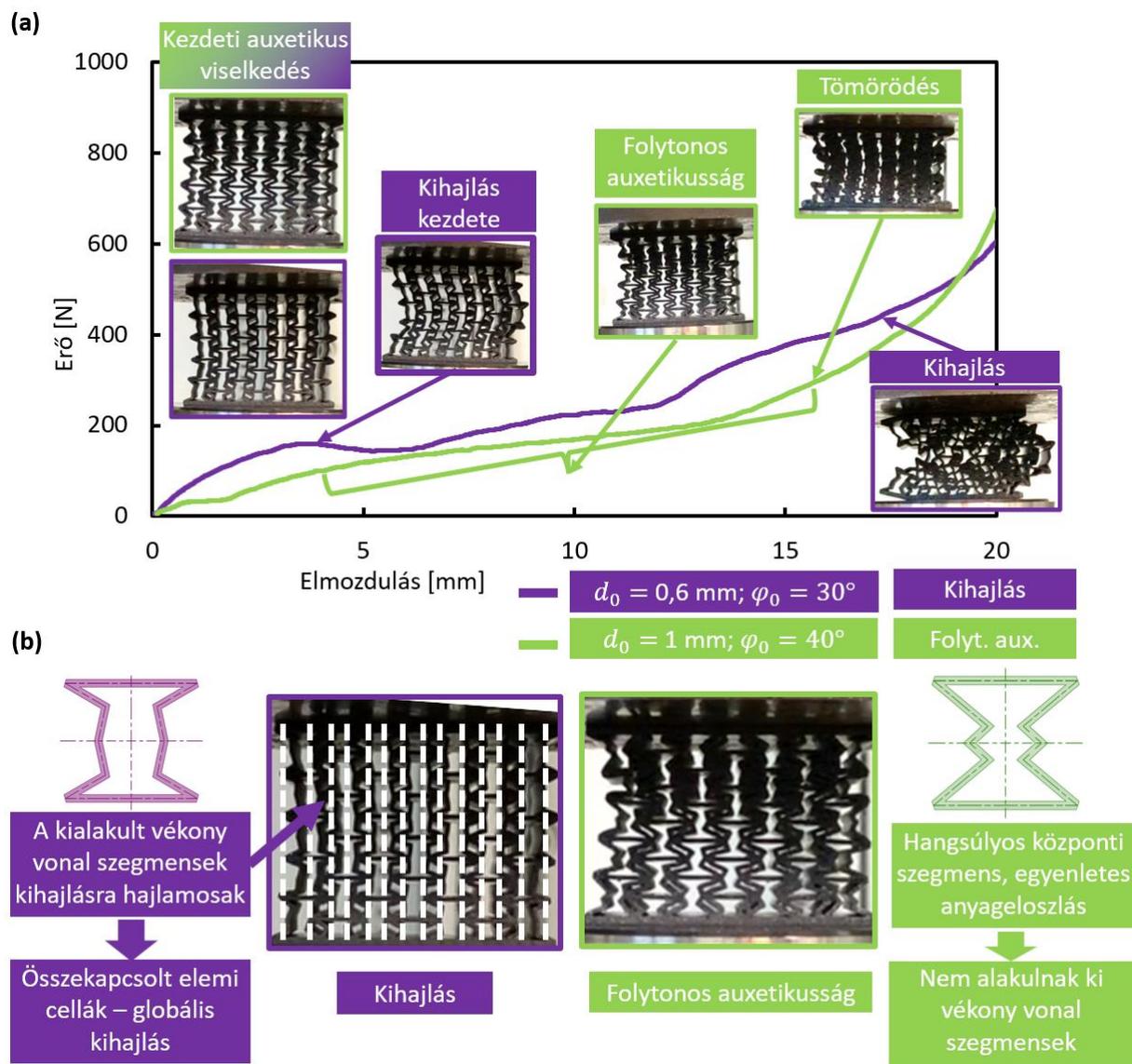
30. ábra. Kettősen homorú mintadarabok mért erő-elmozdulás értékei kiegészítve az eredeti auxetikus méhsejt mintadarab (etalon) mérési eredményeivel.

6.1.6 A kettősen homorú szerkezet deformációs viselkedése

A zömítő vizsgálatok során két jelentősen eltérő deformációs mechanizmus mutatkozott, a mintadarabok egyik része kihajlott, míg másik csoportjuk folytonos auxetikus viselkedést mutatott (ahogyan az analitikus modell előrejelezte). A zömítés kezdeti szakaszában minden mintadarab esetében auxetikus viselkedés figyelhető meg, azonban a deformációs terhelés előrehaladtával a mintadarabok egyik csoportja kihajlik, míg másik csoportjuk továbbra is folytonos auxetikus viselkedést mutat. A két deformációs viselkedést az 31. ábra hasonlítja össze, egy szűkített 0-20 mm deformációs tartományon.

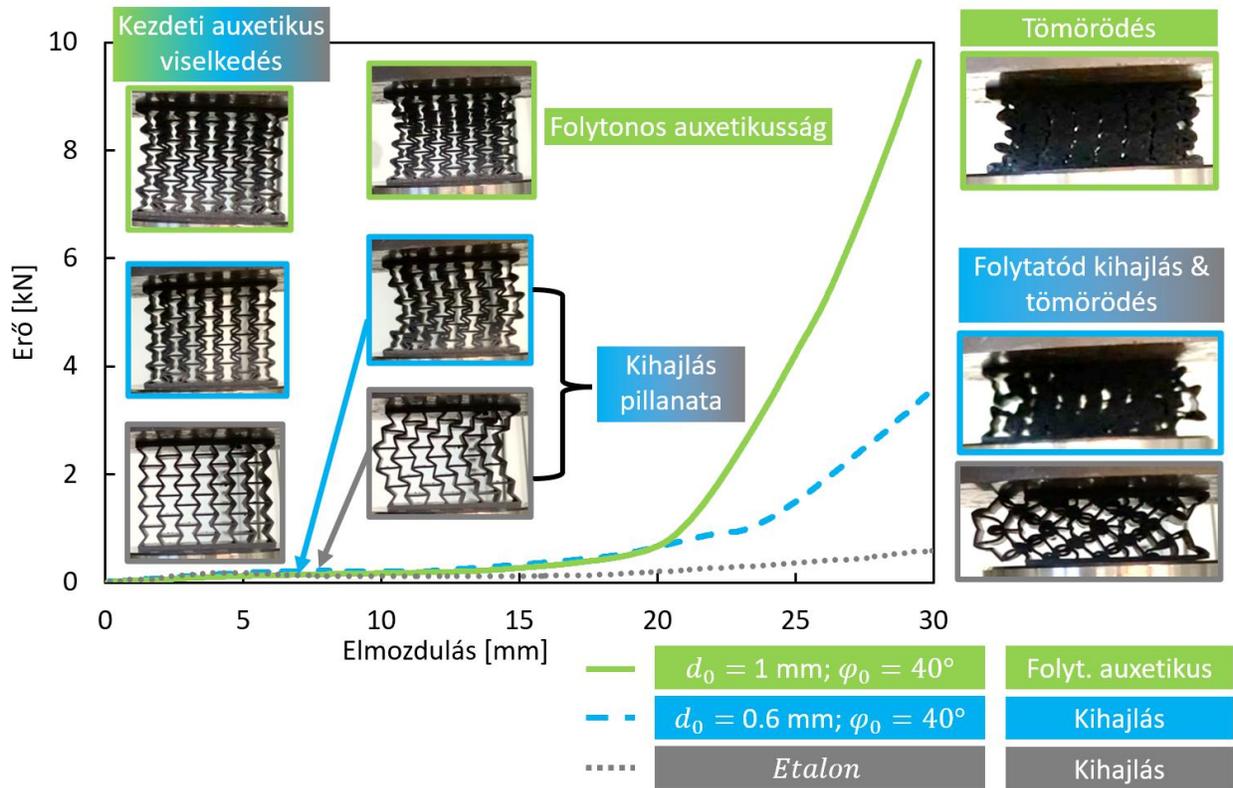
Az 31. (a) ábra alapján kijelenthető, hogy a kezdeti szakaszban mindkét mintadarab auxetikus viselkedést mutat, ameddig az egyik ki nem hajlik jobb oldalra. A folytonos auxetikus viselkedési mechanizmussal rendelkező mintadarab esetében kihajlás nem figyelhető meg a deformáció előrehaladtával. Egy ponton ezen mintadarabban megindul a tömörödés mely egy erőteljesen, progresszíven növekvő erőértékben mutatkozik meg, míg azonos deformáció mellett nem figyelhető meg tömörödés a kihajlásra hajlamos mintadarabok esetében.

A mintadarabok deformációs viselkedése szoros kapcsolatban áll azok alakjával, bizonyos mintadarabokban adott deformáció mellett, függőleges vonalszegmensek alakulnak ki (31. (b) ábra). Ezen függőleges vonalszegmensek továbbra is tengelyirányú nyomóigénybevételnek vannak kitéve, így a kihajlás elkerülhetetlen. Mivel a kihajlásra hajlamos állapotba került alkotók a mintadarab többi alkotójával is kapcsolatban állnak, ezért egy teljes mintadarab szintű kihajlás lép fel.



31. ábra. A kettősen homorú méhsejt szerkezet két jellemző deformációs viselkedése. (a) A kihajlás és folytonos auxetikus deformációs viselkedés összehasonlítása a szűkített 0-20 mm deformációs tartományon; (b) A kezdeti geometriai paraméterek deformációs viselkedésre gyakorolt hatását szemléltető ábrák.

Megállapítottam, hogy minél hangsúlyosabb az elemi cellák központi része (például a nagyobb offset értékeken keresztül egyenletesebb az alkotók eloszlása), annál kevésbé hajlamosak a kihajlásra (31. (b) ábra). Nagyobb *offset* értékek mellett jelentős deformációs terhelés mellett sem alakulnak ki függőleges alkotó szegmensek, az elemi cellán belüli anyag-alkotó eloszlás egyenletes marad, így a homorú auxetikus viselkedési mechanizmus nagy deformációs tartományban is működőképes. A jelenség stabilizációs tervezési irányelvként is felfogható homorú deformációs mechanizmussal rendelkező struktúrákhoz (az irányelv bővebben a 33. ábrán kerül kifejtésre).



32. ábra. A kettősen homorú méhsejt szerkezet két jellemző deformációs viselkedésének összehasonlítása a teljes 0-30 mm zömítési tartományon kiegészítve az eredeti auxetikus méhsejt (etalon) mérési eredményeivel.

A két jelentősen eltérő deformációs mechanizmus átfogóbb elemzésének érdekében, az eredmények a teljes 0-30 mm deformációs tartományon összehasonlításra kerültek (32. ábra), kiegészítve az etalon mintadarab mérési eredményeivel. A kezdeti, kisdeformációs tartományban mindhárom esetben megfigyelhető az auxetikus viselkedés, azonban mind az etalon és a kihajlásra hajlamos mintadarab kihajlik oldalirányban egy adott deformáció mellett (7 mm). A folytonos auxetikusságot mutató mintadarab erő-elmozdulás görbéje nagy erőértékeket ér el bármilyen visszaesés nélkül, míg a másik két mintadarab legnagyobb erőértéke jóval kisebb (32. ábra). Ugyanakkor ezen az ábrán is világosan látszik, hogy az újszerű geometriai kialakítású mintadarabokra jellemző deformációs mechanizmustól függetlenül (azaz még a kihajlásra hajlamos mintadarab is) nagyobb zömítési ellenállást mutat az etalon mintadarabhoz képest.

Az egyes paraméterkombinációk esetén megfigyelt valós deformációs viselkedést az 8. táblázat foglalja össze, kiegészítve az analitikus előrejelzés eredményeivel. A táblázat szerint az analitikus megközelítés eredményeit kellően pontosnak ítélem, az 1430D, 1040D és 1035D elnevezésű mintadarab esetében az analízis relatív nagymértékű fajlagos deformáció mellett jelezte a kihajlást, mely tartományon már az alkotók közti kapcsolat is szerepet játszik a deformációban, melyet az analízis nem vett figyelembe.



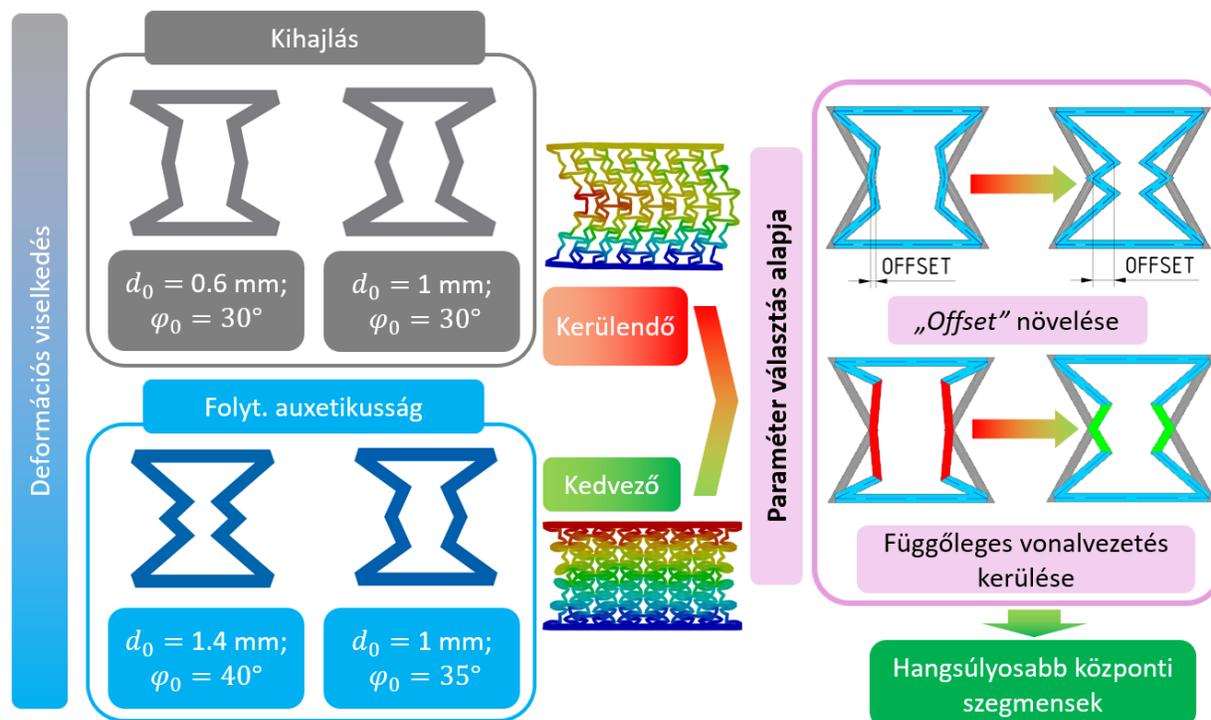
8. táblázat. A kettősen homorú auxetikus méhsejt paraméterfüggő deformációs viselkedése

Elnevezés	Offset paraméter d_0 [mm]	Deg paraméter φ_0 [°]	Analitikus előrejelzés		Valós (& VEM)
			Deformációs viselkedés	Kritikus fajlagos alakváltozás	Deformációs viselkedés
1440D	1,4	40	Folyt. auxetikus	75,1%	Folyt. auxetikus
1435D	1,4	35	Folyt. auxetikus	54,8%	Folyt. auxetikus
1430D	1,4	30	<i>kihajlás</i>	43,4%	Folyt. auxetikus
1040D	1	40	<i>kihajlás</i>	40,1%	Folyt. auxetikus
1035D	1	35	<i>kihajlás</i>	34,5%	Folyt. auxetikus
1030D	1	30	<i>kihajlás</i>	27,2%	<i>kihajlás</i>
0640D	0,6	40	<i>kihajlás</i>	21,3%	<i>kihajlás</i>
0635D	0,6	35	<i>kihajlás</i>	16,8%	<i>kihajlás</i>
0630D	0,6	30	<i>kihajlás</i>	14,1%	<i>kihajlás</i>
ETALON	0	0	<i>kihajlás</i>	-	<i>kihajlás</i>

Az 8. táblázat alapján látható, hogy az *offset* paraméter növelése biztosítja a folytonos auxetikus viselkedés meglétét egy nagyobb terhelhetőségű szerkezetet eredményezve. A táblázat középső részét elemezve (*offset* = 1 mm) látható, hogy adott *offset* paraméter mellett a *deg* paramétertől függően eltérő a megfigyelhető viselkedési mechanizmus, vagyis a viselkedési mechanizmus mindkét paramétertől függ. A táblázat alapján továbbá tisztán kivehető a két viselkedési mechanizmus határa ($d_0 = 1 \text{ mm}$; $\varphi_0 = 35^\circ$). Céлом olyan tervezési irányelv megfogalmazása, mellyel nagy teljesítőképességű, azaz folytonos auxetikus mintadarabok érhetőek el. A megállapítások a 33. ábra szerinti tervezési irányelvben foglalhatók össze.

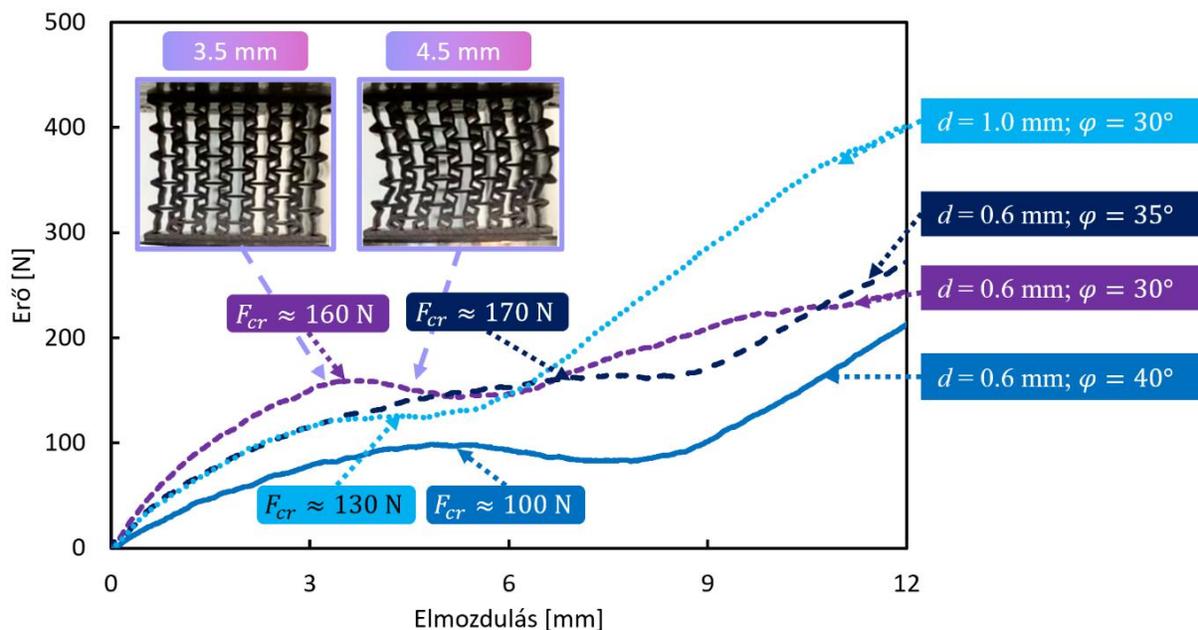
Folytonosan auxetikus viselkedésű mintadarabok két geometria módosítással érhetőek el, az *offset* paraméter jelentős növelésével, függetlenül a *deg* paraméter értékétől, valamint a vízszintes vonalvezetés elkerülésével. Az 33. ábra helyes és helytelen példákon keresztül mutatja be a fentebb leírtakat, összefoglalva az alábbi megállapítást: folytonos auxetikus viselkedésű mintadarabok hangsúlyosabb – koncentráltabb anyageloszlású - központi szegmensek létrehozásával érhetőek el. A megállapítást az analitikus közelítés eredményei is alátámasztják, ha megfigyeljük az 8. táblázat eredményeit, növelve az *offset* értékét csökken a kritikus fajlagos deformáció mértéke.





33. ábra. Példákkal kiegészített tervezési irányelvek a kettősen homorú méhsejt elemi cella folytonos auxetikus viselkedésének elérésére.

Az analitikus közelítés a kritikus kihajlást előidéző terhelés meghatározására is alkalmas, a felírt egyenletek alapján ez $F_{cr} = 153,7$ N terhelést jelent.



34. ábra. A kettősen homorú méhsejtekből felépített kihajlásra hajlamos mintadarabok erő-elmozdulás görbéi, a kihajlást az erő-elmozdulás görbékben fellelhető visszaesés jelzi elő.

A 34. ábra a kihajlásra hajlamos mintadarabok erő-elmozdulás diagramját mutatja a kihajlás pillanatának környezetében, megjelölve a mért kritikus erő értékét. A kihajlás minden esetben egy intenzív visszaesésként jelentkezik az erő-elmozdulás görbéken. A mért átlagos kritikus erő 140 N, melyet kellően pontosan közelít az analitikus előrejelzés.

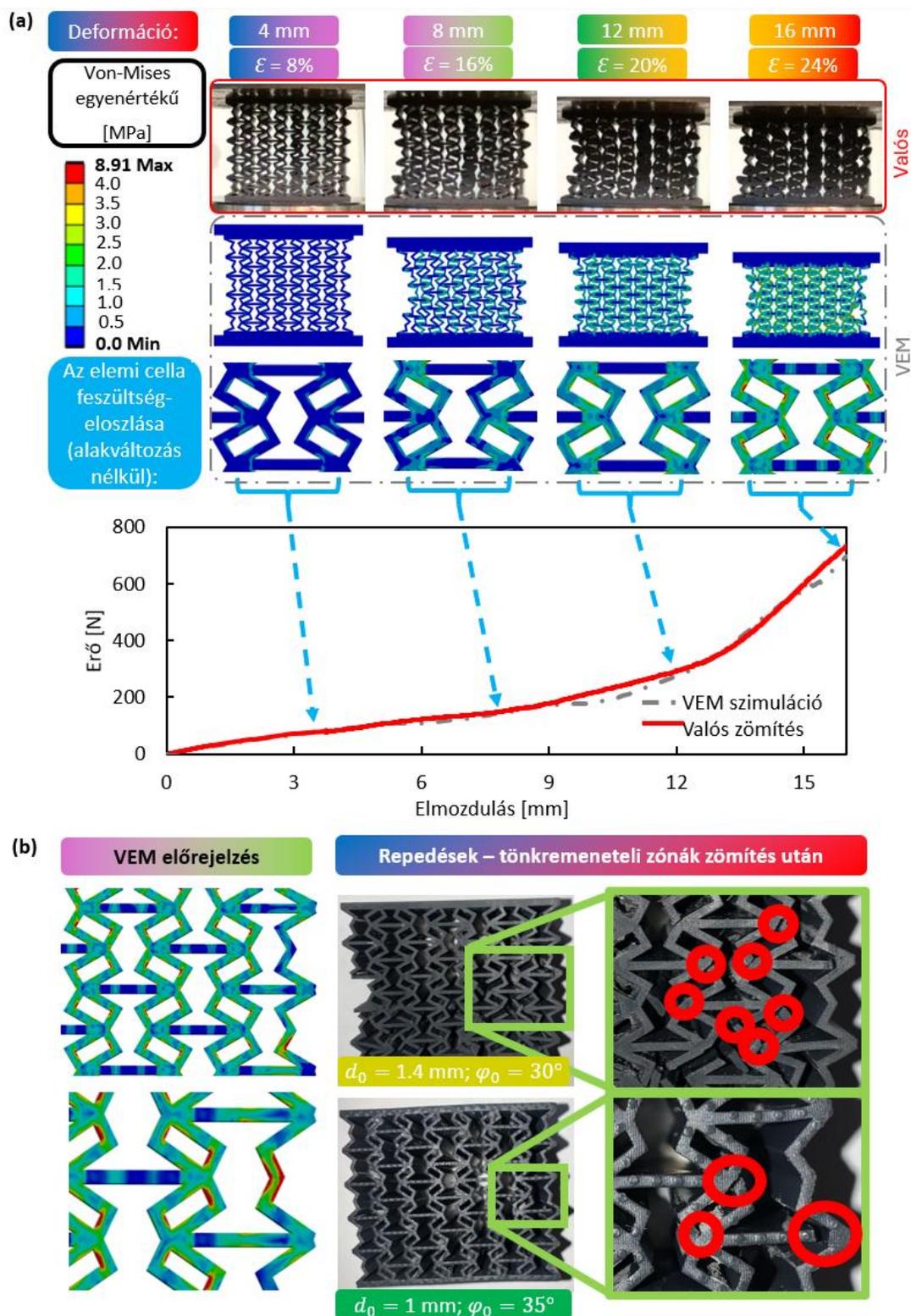
6.1.7 A végeselemes szimulációval elért eredmények

A végeselemes szimulációk a kettősen homorú szerkezet esetében a lattice-szerű viselkedés határáig, azaz 16 mm ($\varepsilon \approx 32\%$) deformációig lettek elvégezve, hiszen eddig a zömítési értékig a tömörödés nem jelentős. A 35.(a) ábra a valós és végeselemes vizsgálat eredményeit hasonlítja össze egy folytonos auxetikus viselkedést mutató mintadarabnál. A kezdeti auxetikus viselkedés egy enyhe oldalirányú kihajlásba csap át (35. (a) ábra ($\varepsilon = 16\%$)), mely rövidesen folytonos auxetikus viselkedésben folytatódik.

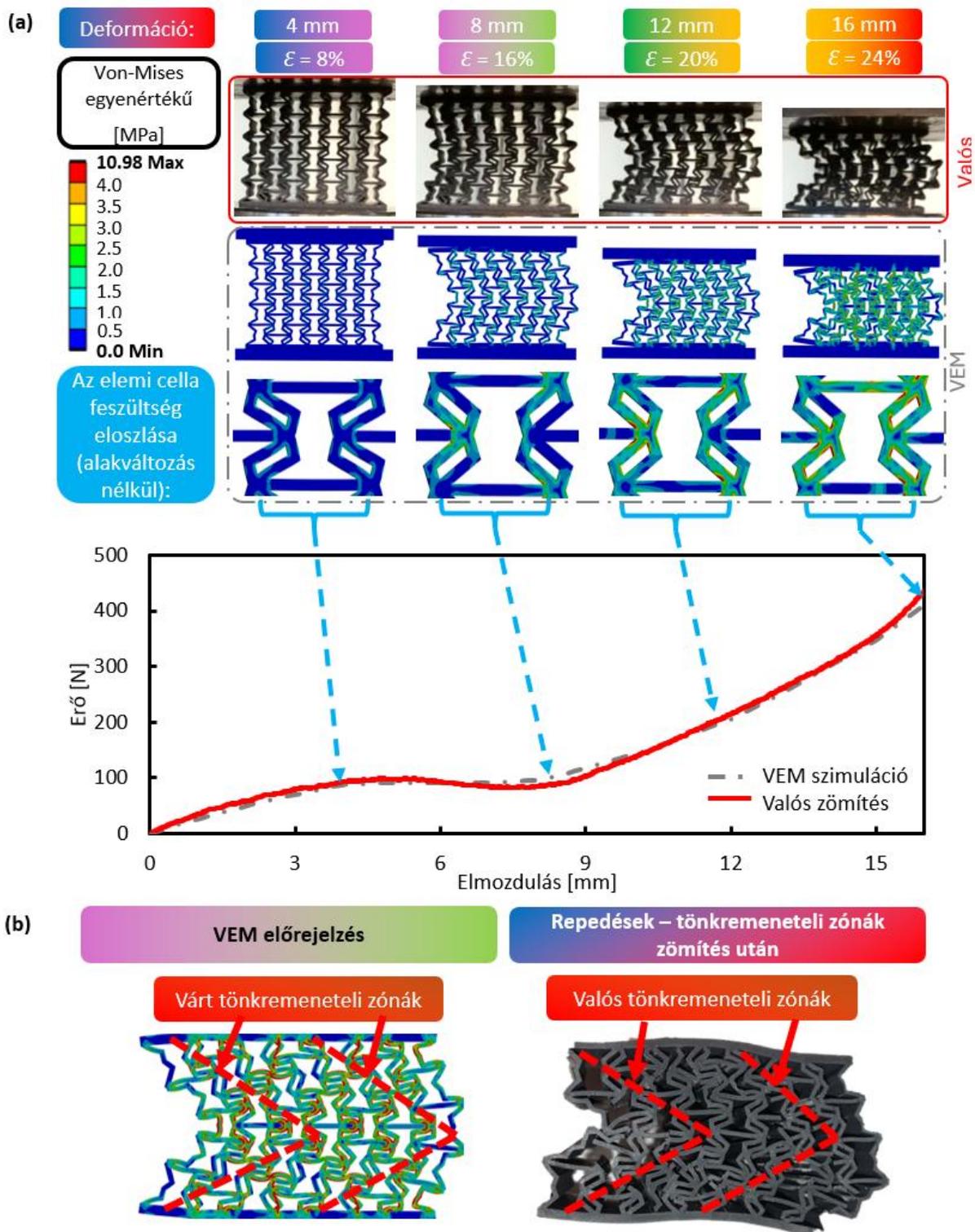
Az 35. (a) ábra szerint a mért és a végeselemes erő-elmozdulás értékek kellően pontosan egyeznek a deformált alakokkal egyetemben. Az eltérés mértéke elfogadható, ezzel bizonyítva a felépített modell megfelelőségét, így a feszültség értékek is a kiértékelés tárgyát képezhetik. A 35. (b) ábrán a 4 MPa feszültségnél nagyobb értékeket piros színnel jelöltem, mivel ezen feszültség érték közelíti az anyag teherbíró képességét, lehetséges tönkremeneteli pontokat indikálva. Jelen esetben a kritikus régiók kis területekre-sarokpontokra korlátozódtak, ezenkívül a feszültségeloszlás egyenletesnek tekinthető. A megjelenő repedéseket, töréseket a végeselemes modell kellően jól jelezte előre, globális károsodáshalmozódás nem figyelhető meg. A fentiek tükrében, a folytonos auxetikus viselkedés kívánatos még nagy deformációk esetében is, mikor a repedések megjelenése elkerülhetetlen.

Az 36. ábra egy kihajlásra hajlamos mintadarab valós és végeselemes zömítő vizsgálatnak eredményeit hasonlítja össze. A kezdeti auxetikus (36. (a) ábra $\varepsilon = 0 - 8\%$) viselkedést egy egyre növekvő oldal irányú kihajlás követi. Hasonlóan a fenti bekezdésben tárgyaltakhoz, a valós és végeselemes vizsgálatok kellően pontosan követik egymást, az erő-elmozdulás görbéken megfigyelhető eltérés a valós vizsgálati környezetben fellépő egyenetlen tömörödésből ered, mely az alapanyag egyedi jellegéből adódik. A kihajlásra hajlamos mintadarabok esetében a feszültségeloszlás nem tekinthető egyenletesnek még a deformáció kezdeti szakaszában sem. A kihajlást szenvedett alkotók megvezetik az erővonalakat, szimmetrikus, ferde, nagyfeszültség értékű régiókat eredményezve (36. (b). ábra). A végeselemes modell által előre jelzett tönkremeneteli régiók a valós zömítések során is megjelentek. A repedések és a koncentrált feszültségcsúcsok jelentősen csökkentik a szerkezet terhelhetőségét, melyet a korábbi ábrák (30., 31., 32.) is mutatnak. Összegezve tehát, a kihajló viselkedés nem csak nem tervezhető, kiszámíthatatlan, hanem egyenetlen, lokalizált feszültségcsúcsokkal tagolt feszültségeloszlást eredményez, mely jelentősen korlátozza a szerkezet terhelhetőségét és energiafelvevő képességét.





35. ábra. Valós és végeleemes eredmények összehasonlítása egy folytonos auxetikus viselkedést mutató kettősen homorú mintadarab esetében ($d_0 = 1,4 \text{ mm}$; $\varphi_0 = 30^\circ$). (a) Valós és végeleemes erő-elmozdulás értékek és deformációs képek összehasonlítása; (b) A végeleemes módszer eredményeik felhasználása potenciális tönkremeneteli régiók előrejelzésére.



36. ábra. Valós és végeselemes eredmények összehasonlítása egy kihajló viselkedést mutató kettősen homorú mintadarab esetében ($d_0 = 0,6 \text{ mm}$; $\varphi_0 = 40^\circ$). (a) Valós és végeselemes erő-elmozdulás értékek és deformációs képek összehasonlítása; (b) A végeselemes módszer eredményeinek felhasználása a lehetséges tönkremeneteli régiók előrejelzésére

6.1.8 Az eredmények értékelése

Az új geometria és a paraméterek hatásának elemzésére a maximális zömítési erő, a felvett energia és ezek tömegre fajlagosított értéke szolgál.

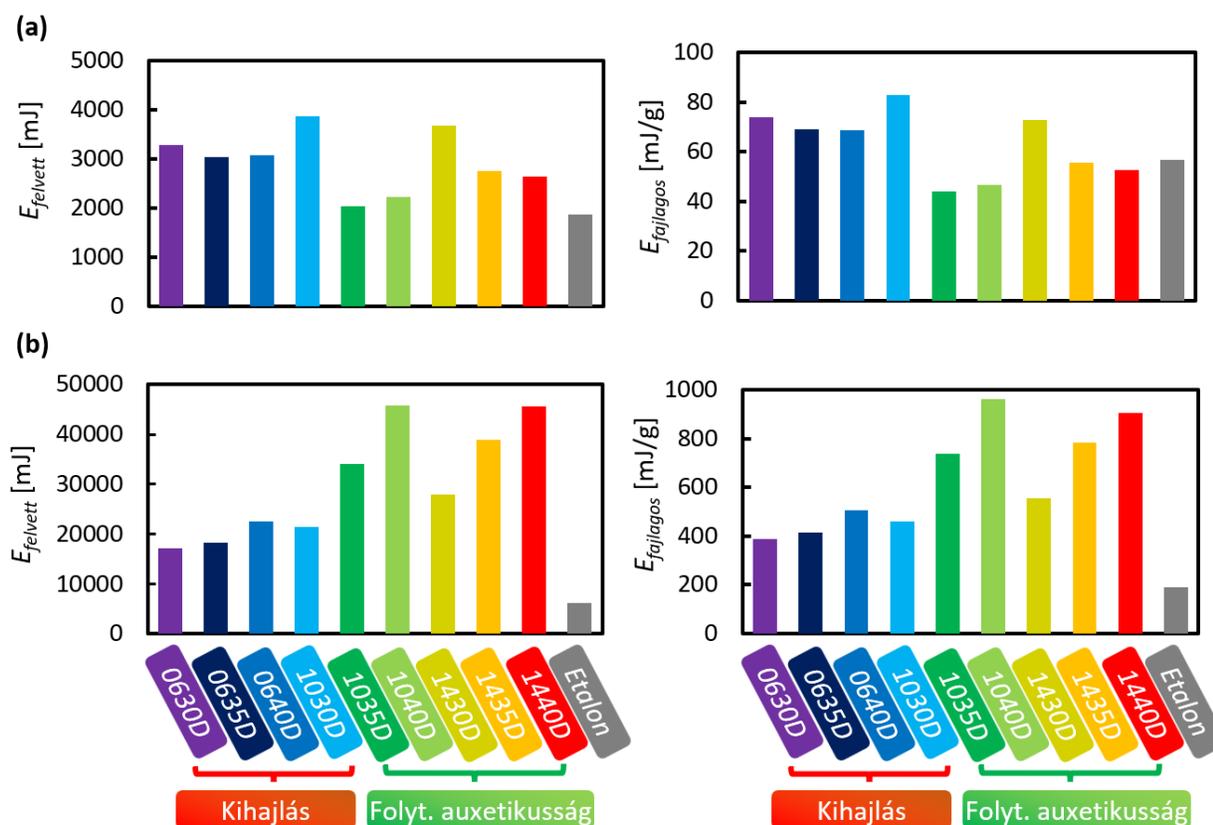
A felvett energia értékeket két tartományon is meghatároztam, értékeltem.

- A lattice-szerű viselkedés határa: azon tartomány, ahol a tömörödés még nem jelentős, az elemi cella deformációk még jelen vannak (0-16 mm deformáció).
- A teljes mérési tartomány; 0-30 mm deformáció között.

A felvett energia az erő-elmozdulás görbék alatti terület mértékével jellemezhető (18) egyenlet alapján:

$$E_{felvett} = \int_0^{30} f(x) dx. \quad (18)$$

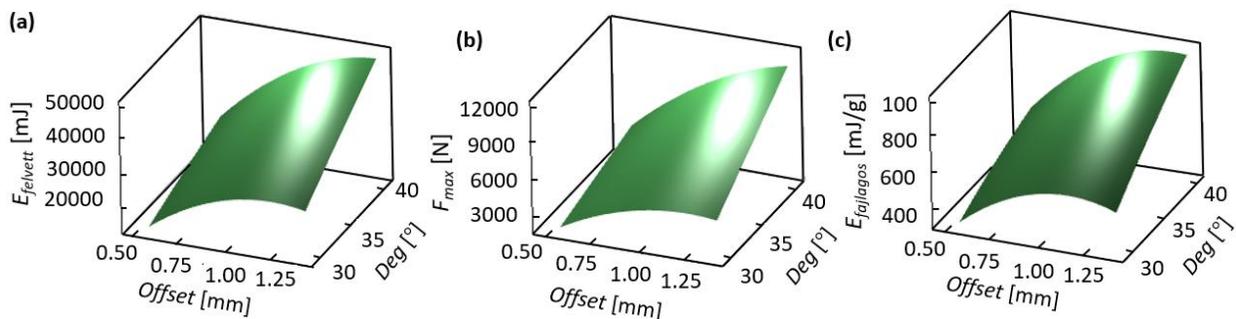
A számított és a fajlagos energia értékek a 37. ábrán oszlopdiagramok formájában kerültek ábrázolásra.



37. ábra. A kettősen homorú auxetikus méhsejt felvett és fajlagos felvett energia értékei. (a) Felvett és fajlagos felvett energia értékek a lattice szerű viselkedés határáig, (0-16 mm tartomány); (b) Felvett és fajlagos felvett energia értékek a teljes zömítési tartományban (0-30 mm).

A diagramok egyértelműen mutatják, hogy az új geometria minden esetben több energia felvételére képes az auxetikus méhsejthez képest (37. (a) ábra). A kihajlásra hajlamos mintadarabok esetében nem lép fel jelentős mértékű tömörödés éppen a kihajlás miatt, ez magyarázza ezen mintadarabok gyengébb energiafelvevő képességét. Ugyanakkor, a 0-16 mm deformációs tartományon éppen az ellenkezője figyelhető meg, a kihajlásra hajlamos mintadarabok nagyobb energiafelvevő képességet mutatnak (37. (b) ábra). A kihajlás megindulásáig ugyanis ezen mintadarabok nagyobb zömítési ellenállással rendelkeznek, pontosabban a kialakult tisztán nyomott rudak zömítési ellenállása nagyobb, mint a nagyobb deformációs szabadsággal rendelkező homorú mintadaraboké. A jelenség a kihajlás tényleges megindulásáig, valamint az auxetikus mintadarabok tömörödéséig áll fenn.

A geometriát leíró paraméterek hatásának jellemzésére a megválasztott paramétereket térben ábrázoltam a 38. ábra szerint. Az ábra alapján kijelenthető, hogy az *offset* és a *deg* geometriai paraméterek értékének növelésével mind a zömítési ellenállás, mind a felvett energia és a fajlagos energia mértéke is növekszik.



38. ábra. A geometriai paraméterek hatása térben ábrázolva a kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezeten. (a) Paraméterek hatása a felvett energiára; (b) A paraméterek hatása a maximális zömítési erőre, (c) A paraméterek hatása a fajlagos felvett energiára.

Kereshető az optimális auxetikus struktúra ezen a vizsgált tartományon, ahol a tömeg minimalizálandó az energiafelvétel és a zömítési erő pedig maximalizálandó. Az optimális paraméterű mintadarab jellemzői a következők: *offset* = 1,33 mm *deg* = 40°. Az optimális lattice struktúrát zömítéssel validáltam. Az értékei valóban megegyeznek az elvárt energiafelvételi és zömítőerő értékekkel. A választott optimalizálási metódust részletesen a 2. Melléklet ismerteti.

6.1.9 A kettősen homorú auxetikus méhsejt Poisson tényezője

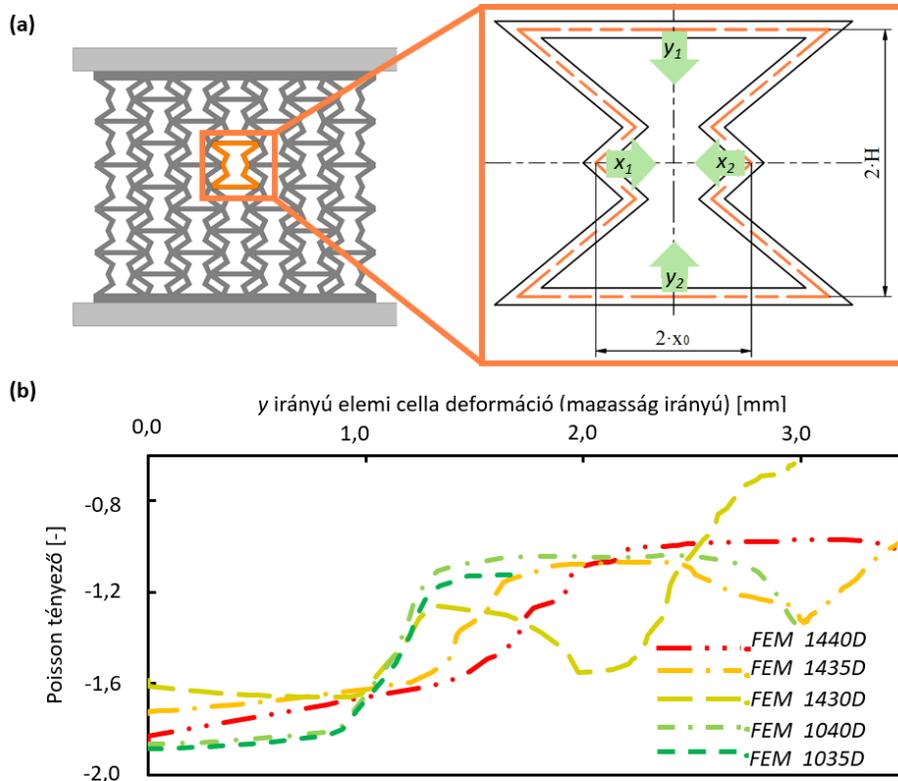
A végelelemes vizsgálatoknak köszönhetően a struktúra Poisson tényezője is meghatározható, a (19) egyenlet alapján. A tengely- és keresztirányú alakváltozás az adott irányú méretváltozás (Δx és Δy) és az eredeti méret hányadosaként határozható meg (lásd (20)-(21) egyenlet).

$$\mu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (19)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{W_{Initial}} 100\% = \frac{\Delta x}{2 \cdot x_0} 100\% \quad (20)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{H_{Initial}} 100\% = \frac{\Delta y}{2 \cdot H} 100\% \quad (21)$$

Az elemi cella Poisson tényezőjének meghatározásához a 39. ábra szerint 4 pontban értékeltem ki az elmozdulásokat, melyek alapján a (22) számú egyenleteket felhasználva kiszámítottam az adott irányú méretváltozásokat.



39. ábra. A kettősen homorú auxetikus méhsejt Poisson tényezőjének számítása. (a) A deformáció komponensek lekérdezésének helye; (b) A Poisson tényező alakulása az elemi cella szintű deformáció függvényében auxetikus viselkedést mutató mintadarabok esetében.

$$\Delta x = \frac{x_1 + x_2}{2}; \Delta y = \frac{y_1 + y_2}{2}. \quad (22)$$

A Poisson tényezőt minden folytonos auxetikus viselkedést mutató mintadarabnál kiszámoltam elemi cella szinten. A kezdeti Poisson tényező átlagosan -1,7 értéket vesz fel, a deformációs terhelés előrehaladtával azonban -1,0 közelébe növekszik annak értéke. A várakozásoknak megfelelően a Poisson tényező értéke is függ a geometriai paraméterektől. A 39. (b) ábra görbéit elemezve, olyan, mintha azok egymáshoz képest el lennének tolvá. Ezt a jelenséget a kezdeti geometriai paraméterek változásával magyarázom. A deformáció előrehaladtával a kezdeti geometria paraméterek változnak, egybeesve (legalábbis közelítve) más mintadarabok kezdeti geometriai paramétereivel.

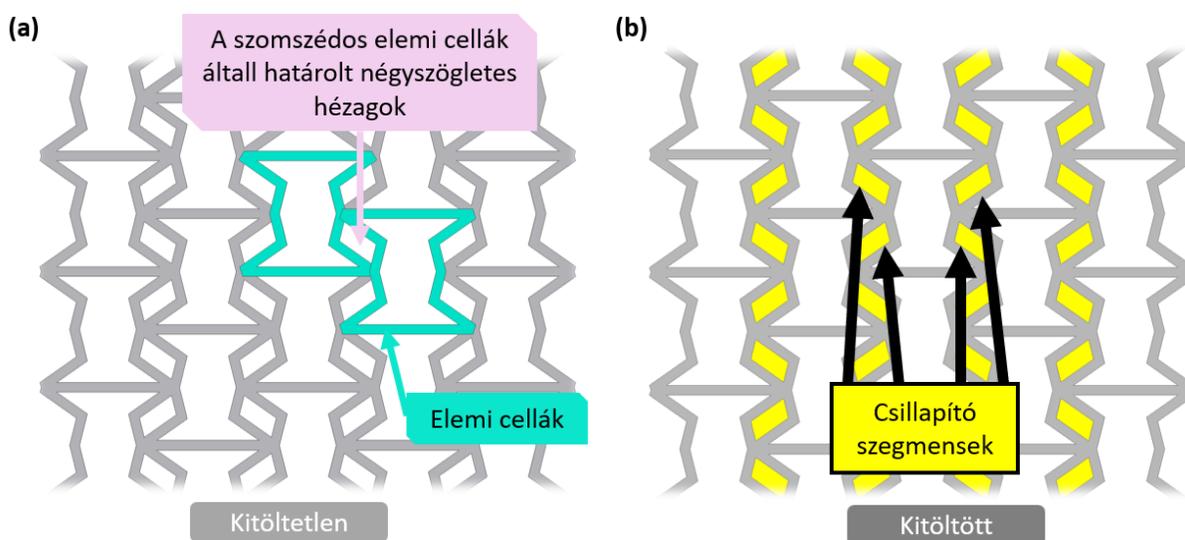
6.2 Szegmentált csillapítóelemekkel ellátott kettősen homorú geometria

Az irodalmi áttekintés során számos anyagpárosításon alapuló kutatómunkát mutattam be, melyekben a lattice struktúrák üregeit valamilyen anyaggal töltötték ki, ezzel jelentősen növelte a mechanikai tulajdonságokat. Az előző fejezetben bemutatott új, kettősen homorú auxetikus méhsejt struktúra akár előnyös tulajdonságjavulást is köszönhetne az anyagpárosításnak.

6.2.1 Szegmentált kitöltés ismertetése

Az anyagpárosítás–kitöltés során nem egy kompozit jellegű, a lattice struktúra minden üregét kitöltő megoldás hatását szerettem volna vizsgálni. Mivel alapjában nagy deformációs terhelés mellett vizsgálom a struktúrákat, éppen ezért minden üreg kitöltésével a deformációs képességüket korlátoznám.

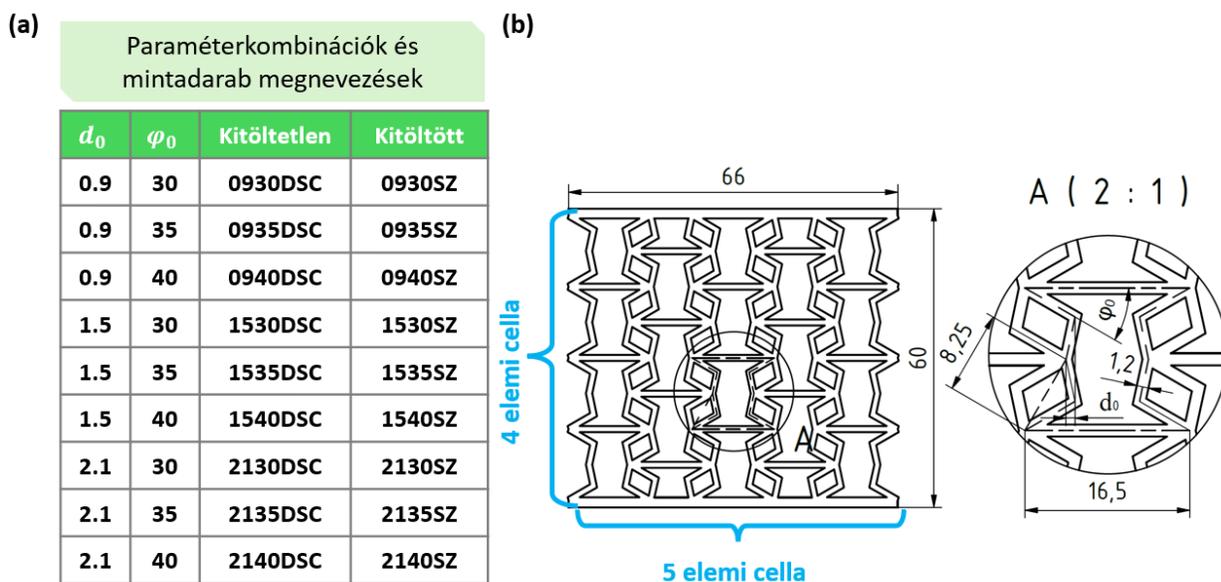
Az előzőek értelmében egy részleges kitöltést szerettem volna megvalósítani, melynek deformációt korlátozó hatása a lehető legcsekélyebb mértékű, ugyanakkor az anyagpárosítás pozitív hatásai érvényesülhetnek. Kitöltésre éppen az új szerkezet által létrehozott, a sarkokban fellelhető, az elemi cella méretéhez képest kisméretű, négyszög szegmensek kerültek megválasztásra. A négyszög régiók kitöltése minden követelményt kielégít, mivel a struktúra továbbra is jelentős porozitással (jelentős mértékű üreges térrésszel) fog rendelkezni, így deformációja nem lesz korlátozott. A deformációs viselkedésből az is belátható, hogy a szegmensekkel csillapító hatás is elérhető. Hipotézisem szerint a kitöltés főként a nagyobb deformációk esetében fog energiafelvevő képesség javulást nyújtani, míg a kezdeti, kis deformációk tartományára vélhetően nem lesz jelentős hatással, mivel ilyenkor a négyszögletes szegmens nem vesz részt a deformációban (lásd: 35. 36. ábra.)



40. ábra. A szegmentált kitöltésű kettősen homorú auxetikus méhsejt származtatása. (a) Az elemi cellák által körbehatárolt kitöltendő régió; (b) A kitöltött csillapító szegmensek megjelenítése.

A 40. (b) ábra szemlélteti a kitöltött régiókat, melyeket abszorber szegmenseknek nevezek a továbbiakban. A szilikonnal töltött mintadarabokat kitöltöttnek, míg az összehasonlítás alapját képező kitöltéssel nem rendelkező mintadarabokat kitöltetlennek fogom nevezni.

Az abszorber szegmensek hatását is egy széles paraméter tartományon kívánom elemezni, az elemi cellákat a korábban már bemutatott *offset* (d_0) és *deg* (φ_0) paraméterekkel jellemzem ezen fejlesztés esetében is. Az abszorber szegmensek a nyomtatást követően manuálisan kerülnek betöltésre a mintadarabba, a szegmensek kitölthetőségének érdekében a korábbi fejezethez képest (27. ábra) az elemi cella külső méretei, beleértve a jellemzésre használt *offset* geometriai paramétert másfélszeres nagyításon estek át, ugyanakkor a mintadarabok már csak 4x5 elemi cellából épülnek fel. Az így létrejött mintadarab méretek és a vizsgált paraméter értékek a 41. ábra szerint alakulnak. Az adott 9 paraméterkombinációhoz tartozó mintadarab kitöltött és kitöltetlen változatban is elkészült, így összesen 18 mintadarab változatot vizsgáltam. A kitöltetlen mintadarabok a „DSC” (*angol elnevezésből származtatva: Doubly re-entrant, Scaled*) jelölést kapták, ezzel jelezve a skálázott méreteket a 6.1. fejezethez képest.

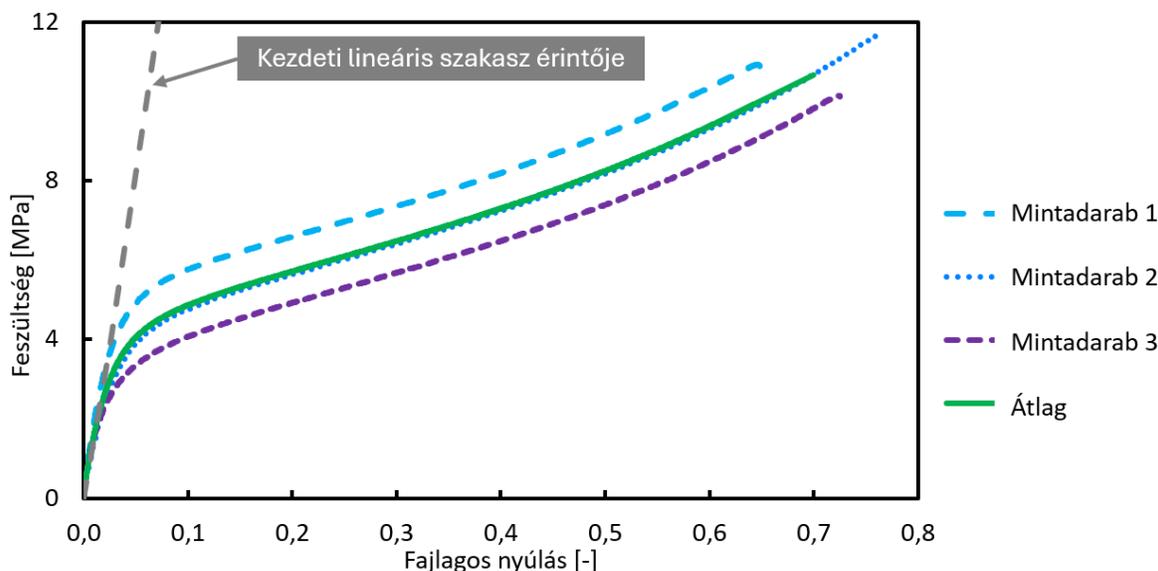


41. ábra. A kitöltött mintadarabok paraméterkombinációi és jelölései. (a) A vizsgált paraméterkombinációk, valamint az eredeti skálázott és kitöltött mintadarabok elnevezései; (b) A mintadarabok és az elemi cellák főbb méretei, alkalmazott jelölések.

6.2.2 Mintadarabok készítése

A korábbi fejlesztéshez hasonlóan a jelen fejlesztés alapanyaga is, egy egyedileg kevert, nagy rugalmasságú, ugyanakkor kellően merev alapanyag. A keverék 75% Litliq FX60 gumyszerű rugalmas (fekete színű) és 25% Litliq TH50 szívós műgyantából (átlátszó, kék színű) áll össze. Az egyedi alapanyagkeverék tulajdonságait szabványos (EN ISO 527-2) szakítóvizsgálatokkal határoztam meg (4.1.1. fejezet), melynek eredményeit a 42. ábra szemlélteti. Látható, hogy a

szakírógörbék minimálisan térnek csak el egymástól, így a három szakítógörbe eredményeinek átlagát használom a továbbiakban. Az anyag kezdeti szakaszának rugalmassági modulus értéke $E = 128.3 \text{ MPa}$, és a kezdeti rugalmas szakasz fajlagos nyúlás érték $\varepsilon_y = 0.03$.



42. ábra. Az abszorber szegmensekkel ellátott mintadarabok alapanyagkeverékének szakítóvizsgálati eredményei.

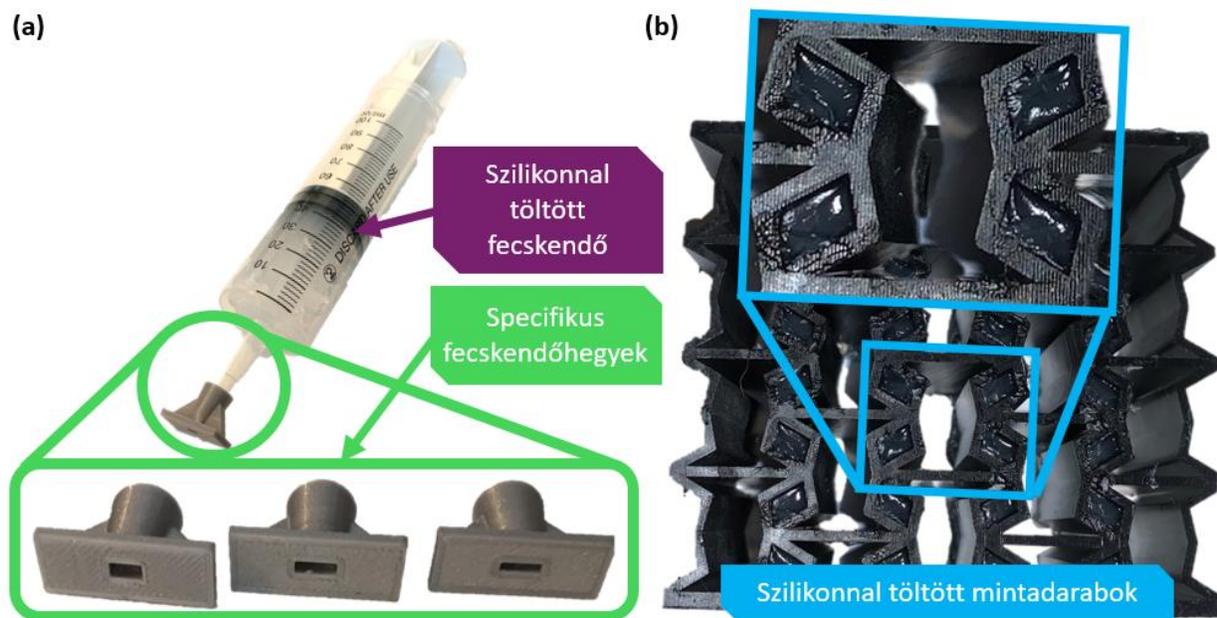
Az egyedileg kevert alapanyag nyomtatási paramétereit a 9. táblázat foglalja össze.

9. táblázat. Az abszorber elemekkel ellátott kettősen homorú auxetikus méhsejt mintadarabok nyomtatásnál beállított nyomtatási paramétereit.

Műgyanta nyomtatási paraméterek:	
Alsó réteg expozíciós idő:	40 s
Az alsó rétegek száma:	6
Általános expozíciós idő:	4 s
Réteg vastagság:	0,05 mm
Expozíció mentes nyugalmi idő:	2 s
A z irányú emelési magasság:	4,5 mm
A z irányú emelési sebesség:	0,5 mm/s
Nyomtatandó tárgy paraméterek:	
A z irányú távolság az építő asztaltól:	5 mm
Orientáció az építő asztalhoz képest:	14 fok
A támasz szerkezet sűrűsége:	Sűrű
A legalacsonyabb támasznyúlvány távolság:	0,5 mm
Az alaplemez vastagsága:	1 mm



Nyomatást követően a mintadarabok szilikonnal (*Soudal polisziloxán alapú ipari szilikon*) kerültek kitöltésre. A homogén, zárványmentes kitöltés érdekében a kitöltésre használt fecskendőhöz egyedi, a kitöltendő térfogatok méretével és alakjával megegyező egyedi fecskendő hegyeket terveztem és nyomtattam FDM (Fused Deposition Modelling) technológiával (43. (a) ábra). Kitöltés után a mintadarabokat a 43. (b) ábra ismerteti.

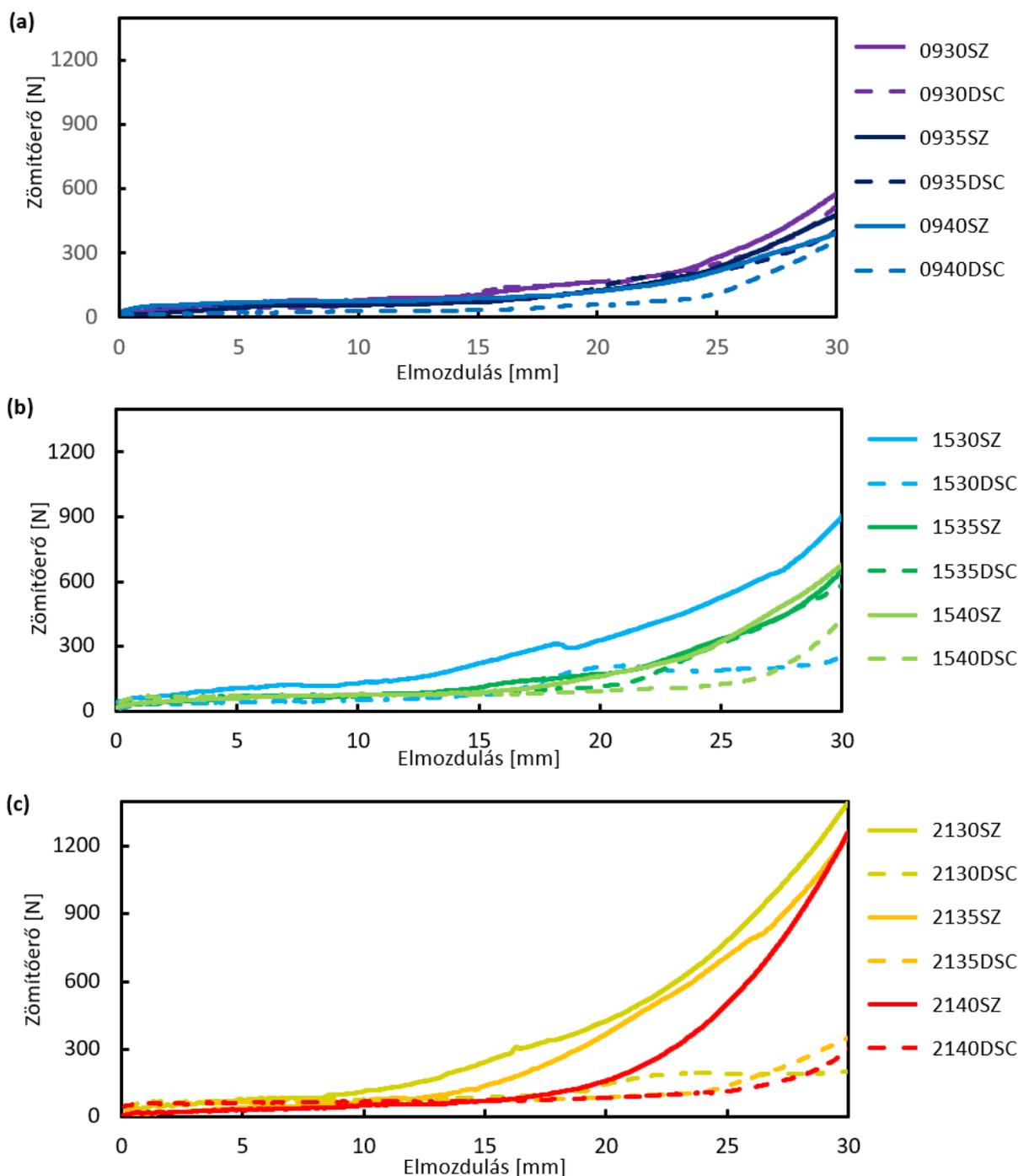


43. ábra. A mintadarabok töltésére használt fecskendők és egyedi fecskendőhegyek. (a) A kitöltésre használt fecskendő és számos specifikus töltőhegy; (b) Egy kitöltött mintadarab.

6.2.3 Az abszorber elemek hatása

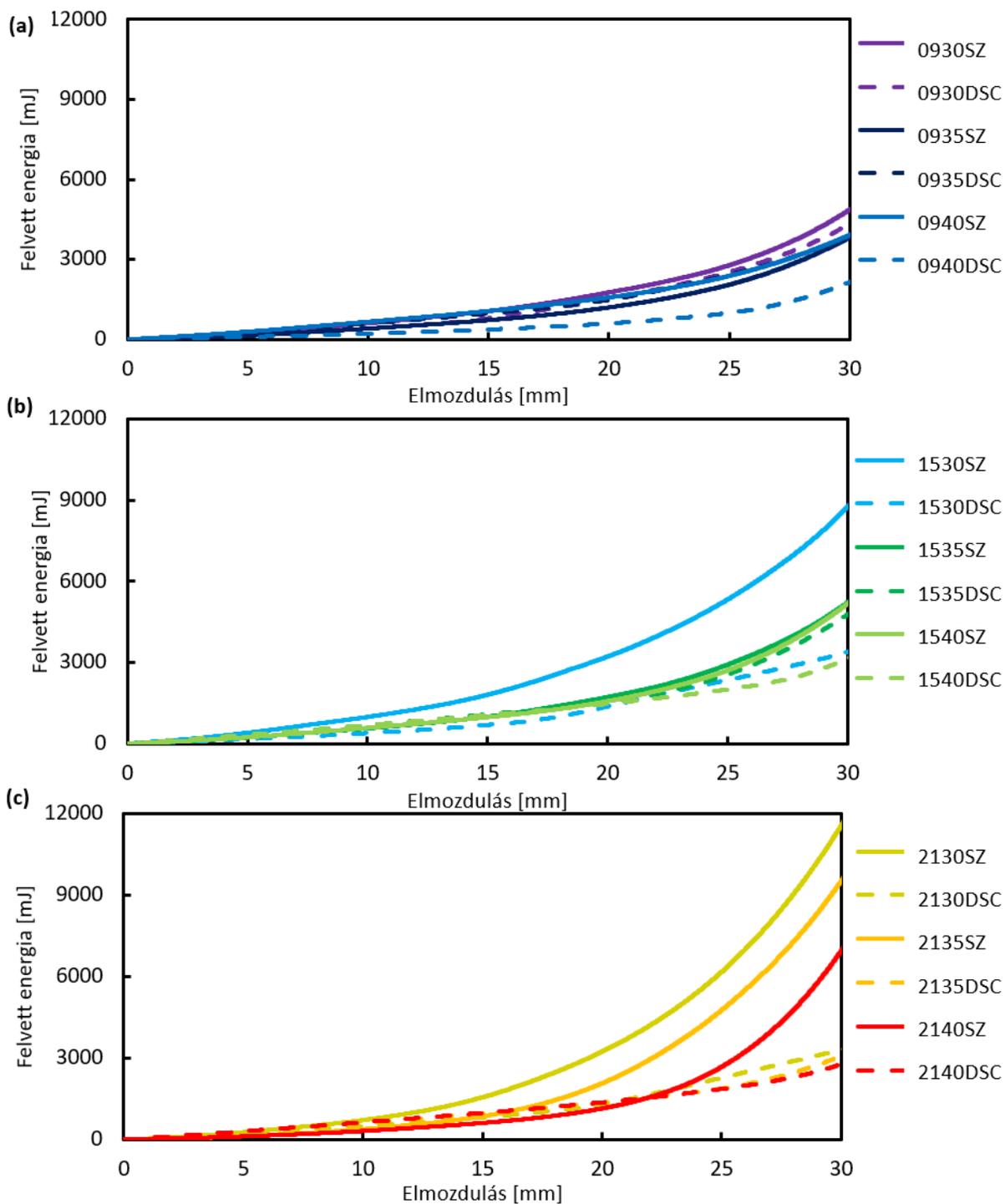
A következő ábrákon a mért erő-elmozdulás értékek kerültek ábrázolásra a vizsgált *offset* mértékek függvényében ($d_0 = 0.9 \text{ mm}$; 1.5 mm és 2.1 mm) 3 grafikonon az eredmények áttekinthetősége érdekében. A zömítő vizsgálat eredményei a kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra is ábrázolásra kerültek.

A 44.(a)-(c) ábrán megfigyelhető, hogy nagyobb *offset* értékek mellett nagyobb erő maximumok és nagyobb ütemű erőnövekedés érhető el a kitöltött mintadarabok esetében. Az erőnövekedés definiálható lenne egy N/s vagy N/mm mértékegységgel rendelkező mennyiséggel, mely alapvetően a zömítési görbe első deriváltjából adódna. Hasonló módon a nagyobb *deg* paraméter értékek nagyobb intenzitású erőnövekedést mutatnak, így a legnagyobb sebességű erőnövekedés a 2140SZ míg a legkisebb a 0930SZ jelű mintadarab esetében figyelhető meg. Ugyanakkor a legnagyobb zömítési ellenállással a 2130SZ jelű mintadarab rendelkezik. A görbéken remekül látszik, hogy a szilikon alapú kitöltés minden mintadarab esetében növelte a merevséget, különösen az *offset* = 2,1 mm értékkel jellemzett mintadarabok esetében, melynek hatását egy későbbi fejezetben ismertetem.



44. ábra. Az abszorber szegmensel ellátott mintadarabok erő-elmozdulás görbéi összehasonlítva a kitöltetlen mintadarabokéval, a kitöltött mintadarabok minden esetben folytonos vonallal jelöltek. (a) Erő-elmozdulás görbék összevetése kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra $d_0 = 0,9 \text{ mm}$ mellett; (b) Erő-elmozdulás görbék összevetése kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra $d_0 = 1,5 \text{ mm}$ mellett; (c) Erő-elmozdulás görbék összevetése kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra $d_0 = 2,1 \text{ mm}$ mellett.





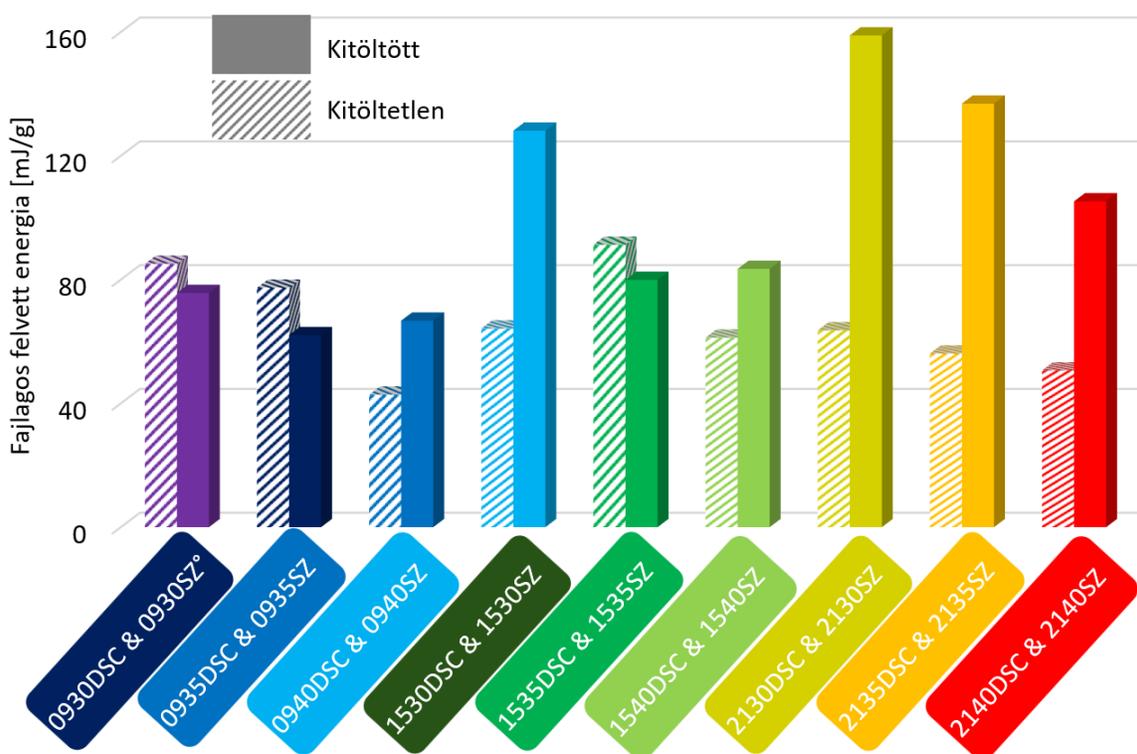
45. ábra. Az abszorber szegmessel ellátott mintadarabok energia-elmozdulás görbéi összehasonlítva a kitöltetlen mintadarabokéval, a kitöltött mintadarabok minden esetben folytonos vonallal jelöltek.
 (a) Energia-elmozdulás görbék összevetése kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra $d_0 = 0,9$ mm mellett;
 (b) Energia-elmozdulás görbék összevetése kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra $d_0 = 1,5$ mm mellett;
 (c) Energia-elmozdulás görbék összevetése kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra $d_0 = 2,1$ mm mellett.



Szintén fontos a felvett energia mértékének és az energiafelvevő képesség karakterisztikájának elemzése egy kitöltésen alapú fejlesztés esetében. Az eredményeket a 45. (a)-(c) ábrán mutatom be. A felvett energia karakterisztikák nagyban hasonlítanak az erő-elmozdulás görbékhez, így a korábban tett megállapítások jelen esetben is érvényesek.

Az energia görbék karakterisztikája, különösen a 2.1 mm *offset* értékkel jellemzett, kitöltött mintadaraboké rendkívül kedvező, bimodális. A kezdeti szakaszt relatíve nagy deformáció és kis energiafelvétel jellemzi, míg a második szakaszt egy ugrásszerűen növekvő energiafelvételi kapacitás jellemzi kismértékű deformáció mellett. Ezen karakterisztika remekül megfelel, például a védtelen közlekedési résztvevők védelmére szolgáló elvárásoknak, melyeknél kezdetben az ütközési sebesség csökkentése majd az ütközési energia elnyelése a követelmény.

Mivel nem minden mintadarab üres tömege egyezik meg, valamint az abszorber szegmensek térfogata sem állandó, elengedhetetlen az eredmények tömegre fajlagosított megjelenítése, melyet a 46. ábra mutat be.



46. ábra. A felvett energia értéke a vizsgált paramétertartományon kitöltött és kitöltetlen kettősen homorú méhsejt mintadarabokra.

A tömegre fajlagosított eredményekből is látszik, hogy az esetek többségében a kitöltés pozitívan hat a felvett energia nagyságára. A legjobb eredmények $d_0 = 2.1 \text{ mm}$ mellett figyelhetők meg, a fajlagos felvett energia értéke a 2130SZ jelű mintadarab esetében 2,5-ször nagyobb a kitöltetlen a 2130 jelű mintadarabhoz képest, mely kiugróan nagymértékű növekedésnek tekinthető.

6.2.4 Az eredmények magyarázata – deformációs viselkedés

A kitöltött mintadarabok, csak úgy, mint az előző fejezetben bemutatott kétszeresen homorú auxetikus méhsejt szerkezetek, kétfajta deformációs viselkedést, kihajló és folytonos auxetikus viselkedést mutatnak. A deformációs viselkedést a geometriai paraméterek függvényében a 10. táblázatban foglaltam össze, kitöltött és kitöltetlen mintadarabokra egyaránt.

10. táblázat. Kitöltött és kitöltetlen mintadarabok deformációs viselkedése a geometriai paraméterek függvényében.

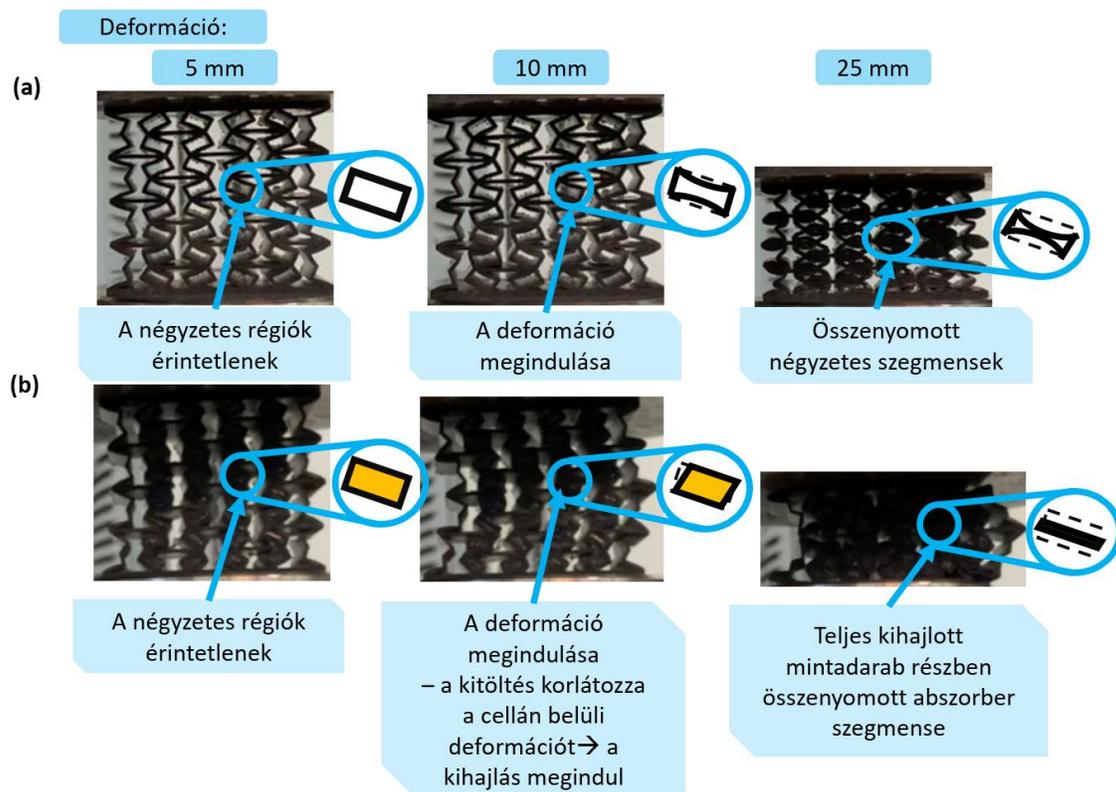
Kiinduló geometriai paraméterek									
d_0 (mm)	0,9			1,5			2,1		
φ_0 (°)	30	40	45	30	40	45	30	40	45
Kitöltetlen mintadarabok									
Deformációs viselkedés	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Folyt. auxetiku				
Kitöltött mintadarabok									
Deformációs viselkedés	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Folyt. auxetiku	Folyt. auxetiku

Látható, hogy a kitöltés hatására több mintadarab a nemkívánatos, kihajló deformációs viselkedést mutatja, azaz az alkalmazott szilikon alapú kitöltés negatív hatással van az adott szerkezet deformációs viselkedésre. A negatív deformációs hatást a következőkben a 47. ábra segítségével magyarázom.

Zömítés során a kitöltetlen mintadarabok az elemi cellák üregeinek összenyomódásával deformálódnak – tömörödnék, mint ahogy ezt a 47. (a) ábra is mutatja. Az élek egymással kapcsolatba kerülnek és lényegében eltűnik a négyzetes régió. A szilikkonnal töltött mintadarabok esetében ez a deformáció nem mehet végbe, így hajlamosabbak a kihajlásra (47. (b). ábra), ezzel magyarázva a 10. táblázatban látható nagyobb előfordulási arányú kihajlást.

Nem minden szilikkonnal töltött mintadarab esetében lép fel azonban kihajlás. A jelenség a 48. ábra segítségével magyarázható, ugyanis nagyobb *offset* értékek mellett ($d_0 = 2,1 \text{ mm}$) a tömörödés egyenletesebb az elemi cellán belül. Az elemi cellán belüli egyenletes deformációból kiindulva nem lép fel kihajlás, sőt az abszorber szegmenseknek köszönhetően, melyek kitöltöttek, jelentősen nő a szerkezet zömítési ellenállása is, így az energiafelvevő képessége is.





47. ábra. Az abszorber szegmensek deformációt korlátozó hatása. (a) Egy kitöltetlen mintadarab deformációs viselkedése; (b) Egy kitöltött mintadarab deformációs viselkedése.

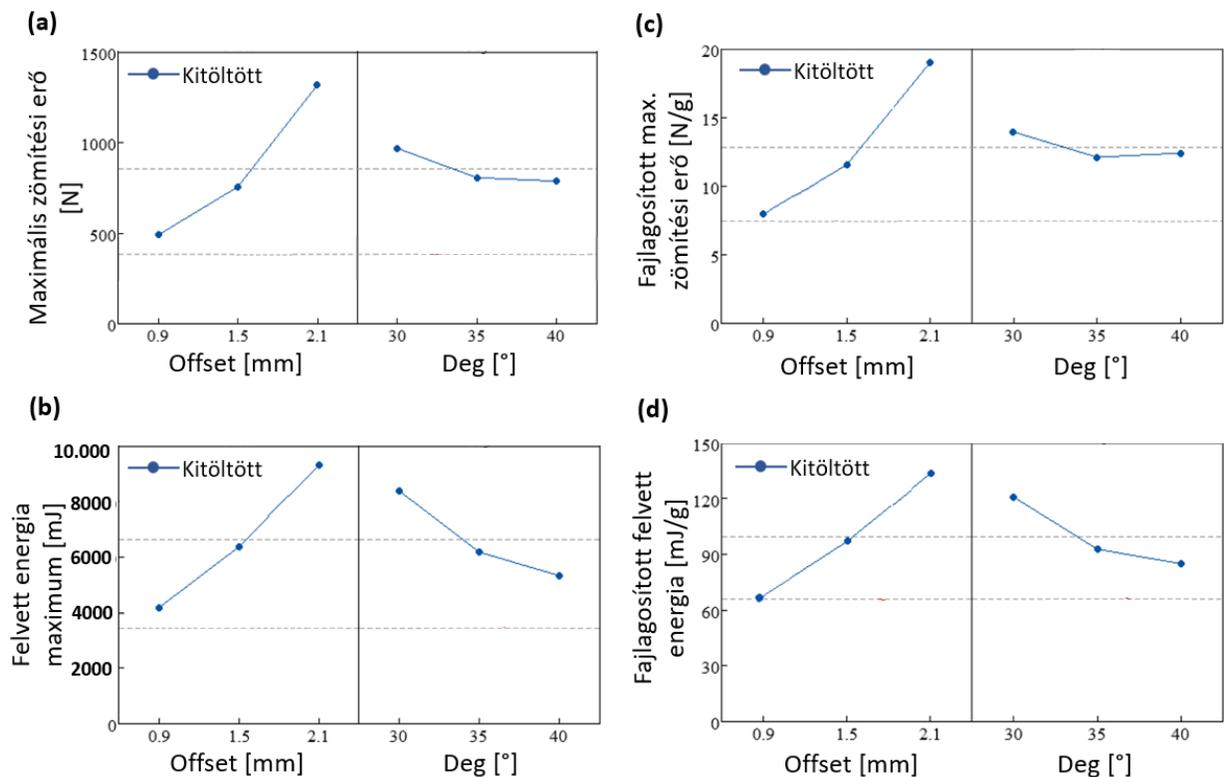


48. ábra. A kettősen homorú méhsejt deformációs viselkedésének összehasonlítása kitöltött és kitöltetlen változatokban eltérő offset paraméter értékek mellett.

Az energiának a 45. ábrán megfigyelhető progresszív növekedése éppen abból ered, hogy ezek a szilikonnal kitöltött szegmensek bekapcsolódnak a terhelés felvételébe. Érdekes még megjegyezni, hogy a kitöltő régiók növelt zömítési ellenállása kedvezőbb tulajdonságokat eredményez számos kihajlást mutató, kitöltött mintadarab esetében is a kitöltetlen mintadarabokhoz képest.

6.2.5 A tulajdonságok paraméterfüggése

A mechanikai tulajdonságok paraméterfüggését főhatás ábrákkal szemléltetem. A kitöltés növelt zömítési ellenállást eredményez az *offset* paraméter növelésével, míg a *deg* paraméter hatása nem jelentős (49.(a) ábra). A fajlagos felvett energiát tekintve az *offset* paraméter növelése jelentős energiafelvevő-kapacitás növekedést eredményez, míg a *deg* paraméter növelése csökkenti azt (49.(b) ábra). Az eredményeket tömegre fajlagosítva hasonló megállapítások érvényesek (49.(c)-(d) ábra).



49. ábra. Az abszorber szegmensessel ellátott mintadarabok tulajdonságainak paraméterfüggése. (a) A maximális zömítési erő paraméterfüggése; (b) A felvett energia maximum paraméterfüggése; (c) A fajlagosított maximális zömítési erő; (d) A fajlagosított energia maximum paraméterfüggése (d).

6.3 A paraméterfüggetlen deformációs viselkedés elérése

A korábbi fejlesztéseimnek köszönhetően jelentős tulajdonságjavulást sikerült elérnem. A fejlesztések, bár paraméterfüggően, de elkerülhetővé tették a kihajlást, míg a deformációs viselkedés tekintetében további fejlesztések javasoltak. Céлом a deformációs viselkedés paraméterfüggetlenné tétele, azaz semmilyen paraméterkombináció mellett se lépjen fel kihajlás, a geometriai paraméterek kizárólag a mechanikai tulajdonságokra legyenek hatással. A megfogalmazott célok teljesítése esetén a szerkezet széles körben alkalmazható lenne, mivel viselkedése ismert és kiszámítható, valamint a mechanikai tulajdonságok a geometriai paraméterek függvényében előre definiált tervezési irányelvek mentén változtathatók.

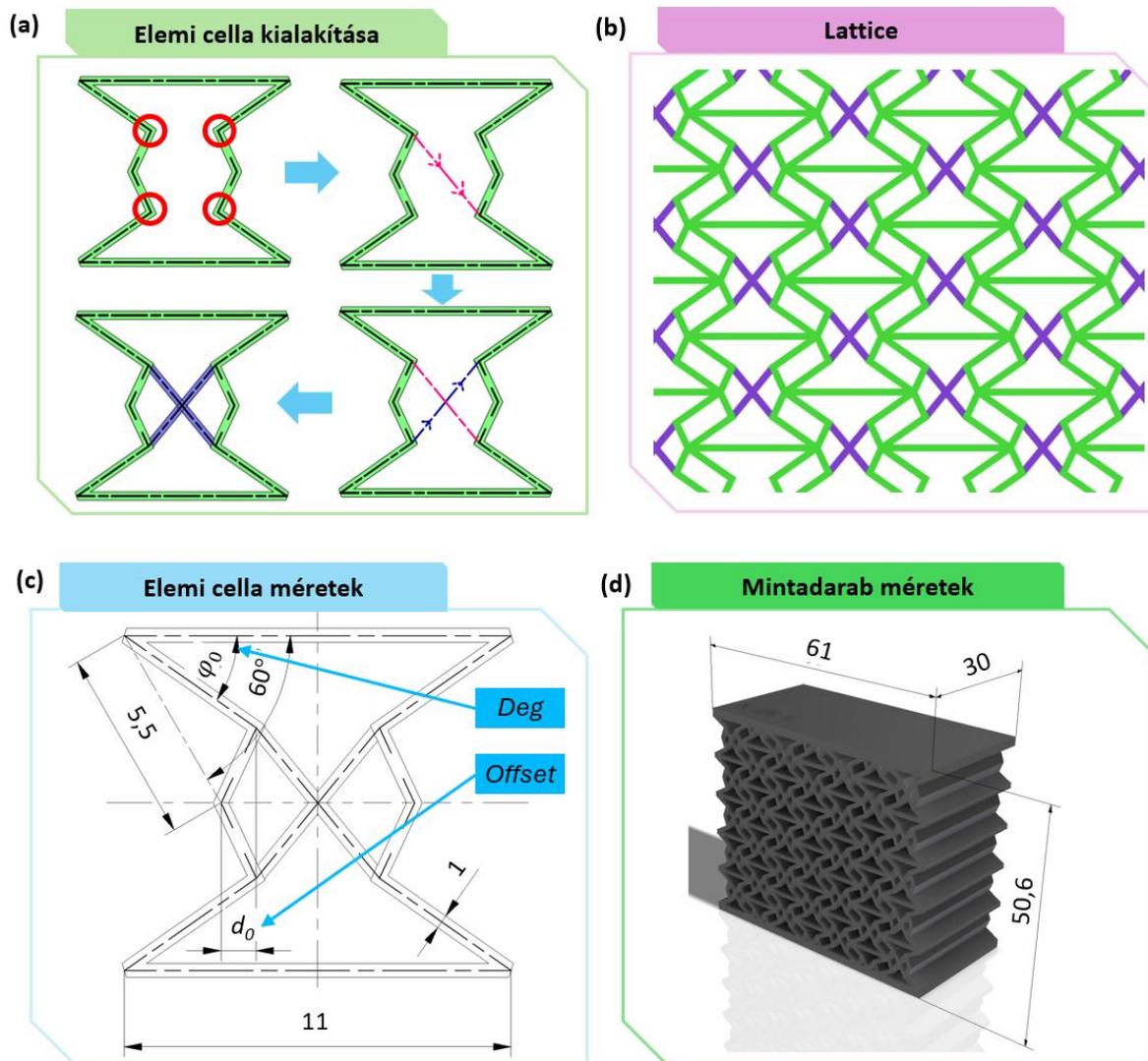
6.3.1 Hipotézis a paraméterfüggetlen deformációs viselkedés elérésére

A kettősen homorú auxetikus méhsejt létrehozása során a paraméterektől függő tervezési irányelveket fogalmaztam meg, melyekkel elkerülhető a kihajlás (6.1.6. fejezet). Az irányelvek alapján a függőleges vonalvezetés kerülésével és hangsúlyos központi régiók létrehozásával elkerülhető a kihajlás. Továbbá, az irodalomkutatás alapján a szimmetrikus, megvezetett erővonalú elemi cella kialakítások nem hajlamosak a kihajlásra.

Hangsúlyosabb központi szegmens létrehozható úgy, hogy ha a kettősen homorú auxetikus méhsejt új töréspontjait átlósan összekötjük, eredményül egy „x” alakot kapva, melyet *x-merevítésnek* nevezek a továbbiakban (50. (a) ábra). Ezen újszerű, beágyazott elemi cella struktúra stabilizálja az elemi cella központját, mivel a két újonnan beépített él pont közepén metszi egymást. A beépített „x” alak előre definiál egy szimmetrikus, kihajlásmentes deformációt, mivel az elemi cella összes alkotója egymással, egymáshoz kényszerített kapcsolatban áll. Továbbá az „x” merevítés követi a hosszabb homorú éleket, ezzel mégjobban támogatva egy stabil struktúra létrejöttét. A céлом, továbbá, egy egyszerű, a gyárthatóságot nem jelentősen befolyásoló fejlesztés volt, mely nem korlátozza a Lattice szerű viselkedést, azaz egyes elemi cellák kölcsönös szabad deformációját így semmiféle folytonos vízszintes vagy függőleges merevítés nem jöhetett szóba. Az 50. (b) ábra az elemi cellából lattice struktúrába rendezett mintáját mutatja. Mint látható, a lattice szerű viselkedést folytonos horizontális vagy vertikális szegmensek nem gátolják.

Az „x” alapú merevítés hatása az 50. (c) ábrán látható két paraméter (d_0 és φ_0) széles tartományán került vizsgálatra. Továbbá, ugyanezen paramétertartományon jelen – X-merevítésű – fejlesztés összehasonlításra került a fejlesztés alapját adó kettősen homorú auxetikus méhsejttel. A két geometriai paraméter és az elemi cella főbb méretei az 50. (c) ábrán láthatók, míg a vizsgált paraméterkombinációkat a 11. táblázat sorolja fel. A mintadarabok nevében az „ORIG” (pl.: 0630ORIG) végtag az eredeti x-merevítés nélküli mintadarabra, míg az „X” (pl.: 0630X) végtag az x-merevítéssel ellátott mintadarabokat nevesíti. Az eredeti mintadarabokat megkülönböztető ORIG végtagot a vizsgálathoz használt eltérő alapanyag miatt vezettem be.





50. ábra. Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt. (a) Az elemi cella megalkotásának menete; (b) Az x-merevítésű elemi cellákból összeállított lattice szerkezet; (c) Az elemi cella főbb méretei és paramétere; (d) Egy vizsgált mintadarab főbb méreteivel.

11. táblázat. Az x-merevítésű kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezet kapcsán vizsgált paraméterkombinációk, és elnevezések merevített és eredeti, merevítetlen kivitel esetén.

Elnevezés (eredeti)	0630ORIG	0635ORIG	0640ORIG	1030ORIG	1035ORIG	1040ORIG	1430ORIG	1435ORIG	1440ORIG
Elnevezés (x-merevítésű)	0630X	0635X	0640X	1030X	1035X	1040X	1430X	1435X	1440X
d_0 [mm]	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,4
φ_0 [mm]	30	35	40	30	35	40	30	35	40

A fejlesztés hatékonyságának értékelésére a merevített és merevítetlen mintadarabok eredményei összehasonlításra kerülnek zömítő vizsgálatokkal meghatározható energiafelvevő képesség, deformációs viselkedés és zömítési ellenállás tulajdonságok mentén. Zömítő vizsgálatoknak nem az elemi cellákat, hanem az elemi cellákból felépített (5x7 darabból) mintadarabokat vetem alá, melyek főbb méreteit az 50. (d) ábra mutatja.

6.3.2 A mintadarabok készítése

A mintadarabok a 4.2.2. fejezetben bemutatott nyomtatóberendezéssel és az ott részletesen tárgyalt utókezelési eljárással készültek. A nyomtatási paramétereket a 12. táblázat foglalja össze.

12. táblázat. Az x-merevítésű mintadarabok nyomtatásánál beállított nyomtatási paraméterek.

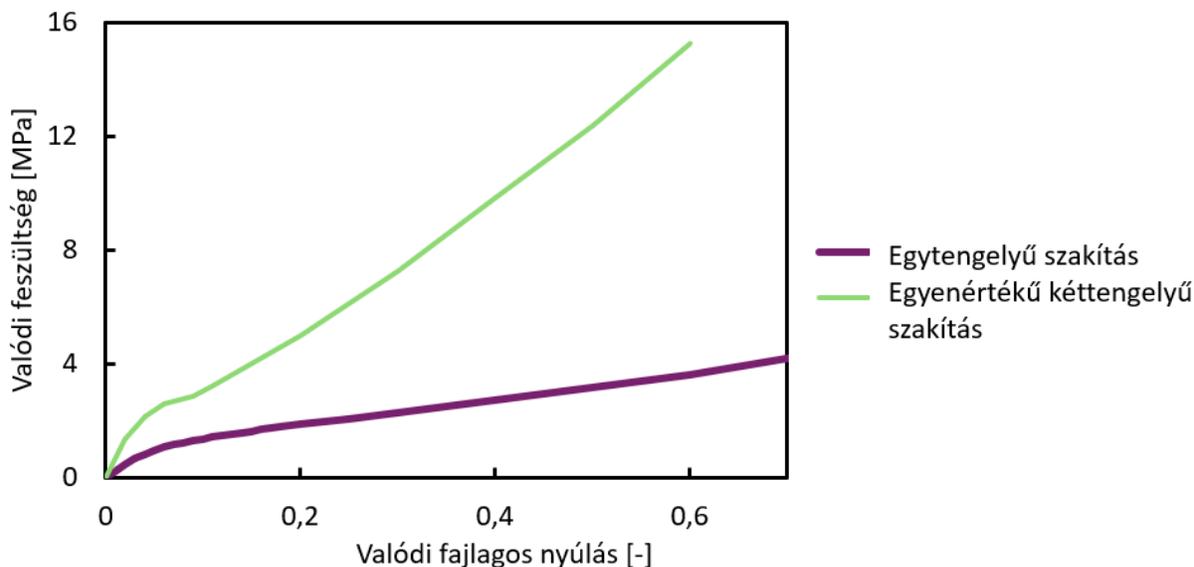
Műgyanta nyomtatási paraméterek:	
Alsó réteg expozíciós idő:	40 s
Az alsó rétegek száma:	6
Általános expozíciós idő:	4 s
Rétegvastagság:	0.05 mm
Expozíció mentes nyugalmi idő:	2 s
A z irányú emelési magasság:	4,5 mm
A z irányú emelési sebesség:	0,5 mm/s
Nyomtatandó tárgy paraméterek:	
A z irányú távolság az építő asztaltól:	5 mm
Orientáció az építő asztalhoz képest:	14°
A támasz szerkezetsűrűsége:	Sűrű
A legalacsonyabb támasznyúlvány távolság:	0,5 mm
Az alaplemez vastagsága:	1 mm

A fejlesztéshez egy új, a korábbiakhoz képest több alkotós struktúra kialakítás miatt – mely várhatóan kevésbé rugalmas viselkedésű – egy rugalmasabb anyagkeverék megalkotása volt a céloom, melynek használatával nagy deformációs terhelés mellett sem lépnek fel repedések a mintadarabban. A keverék 80% Litliq FX60 gumyszerű rugalmas (fekete színű) és 20% Litliq TH50 szívós műgyantából (átlátszó kék színű) áll össze.

A mintadarabok viselkedését végeeselemes módszerrel szeretném vizsgálni, melyhez a pontos anyagmodell felállítása elengedhetetlen, az anyag összetétele alapján hiperelasztikus anyagmodell használata szükséges. Saját tapasztalatom és releváns kutatómunkákból [155] is belátható, hogy hiperelasztikus anyagmodellek felállításához a kizárólag egy mérési elrendezésen alapuló anyagmodellek rendkívül pontatlanok.



Legalább két vizsgálati elrendezés használatával a végeelemes környezet kellően pontos anyagmodell felállítását teszi lehetővé. Az anyag mechanikai viselkedését leíró hiperelasztikus anyagmodell egy egytengelyű szakítóvizsgálat és egy egyenértékű kéttengelyű szakító vizsgálat (zömítő vizsgálat) eredményire épül. Az egyenértékű kéttengelyű szakítóvizsgálat megfeleltethető egy zömítő vizsgálattal összenyomhatatlan anyagok esetében, mindössze előjelkonverzió szükséges a mért adatokra [156]. Az egyenértékű kéttengelyű szakítóvizsgálat egy közelítés, egy igen pontos közelítés mellyel, könnyedén növelhető egy hiperelasztikus anyagmodell pontossága és stabilitása.



51. ábra. Az x -merekítésű kettősen homorú méhsejt végeelemes anyagmodelljének bemeneti értékei.

A szakítóvizsgálat az 4.1.1. fejezetben leírt paraméterekkel az EN ISO 527-2 szabvány szerint lett elvégezve. A valós feszültség és fajlagos nyúlás értékeket az 51. ábra diagramja mutatja be, melyre a végeelemes környezetben egy két paraméteres Mooney-Rivlin anyagmodellt illesztettem. Az anyagmodell paramétereit a 13. táblázatban mutatom be a zömítőgép pófáihoz beállított szerkezeti acél tulajdonságaival együtt.

13. táblázat. Az x -merekítésű kettősen homorú méhsejt végeelemes anyagmodelljének főbb paraméterei.

Jellemző	Érték	Mértékegység
Mintadarab alapanyag; 80% Litliq FX 60 & 20% Litliq TH 50		
Sűrűség	1,03	kg/m ³
Szakítószilárdság (5 mm/min)	5,31	MPa
Anyag konstans C_{10}	0,4850	MPa
Anyag konstans C_{01}	1,8065	MPa
Összenyomhatatlansági paraméter	0,434782	1/GPa



6.3.3 Az újonnan létrehozott merevített elemi cella kialakítás hatása

Ebben a fejezetben a végeselemes zömítési vizsgálatok kerülnek összevetésre a valós zömítő vizsgálatok erő-elmozdulás görbéivel. A fejlesztés hatékonyságát és a geometriai paraméterek hatását a vizsgálati eredményekből meghatározott energia, fajlagos energia és további jellemzők alapján értékelem. A nagy pontossággal felállított végeselemes modellnek köszönhetően ezen fejlesztés esetében a kiértékeléshez a végeselemes modell eredményeit használom fel, melyek pontosan követik a valós zömítés eredményeit (6.3.6. fejezet).

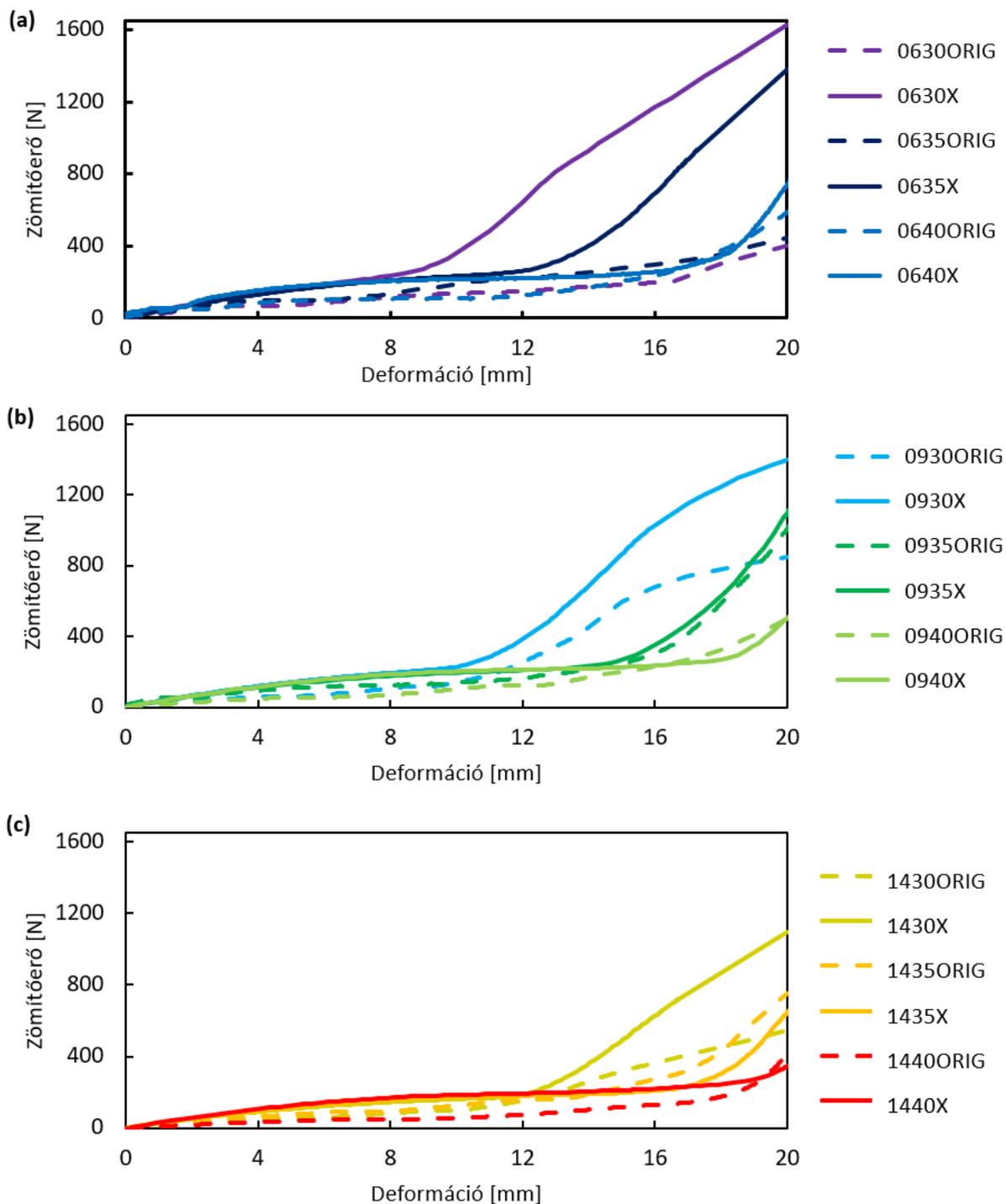
A zömítővizsgálatokat 20 mm deformációs terhelésig végeztem a 4.1.1. fejezetben bemutatott paraméterekkel. Az x -merevítésű szerkezetre az újonnan beépített alkotók miatt 20 mm deformációs terhelés felett, már nem jellemző lattice szerű viselkedés, ezért került megválasztásra ezen érték mint a nyomóterhelés vége.

6.3.4 A zömítő vizsgálat eredményei

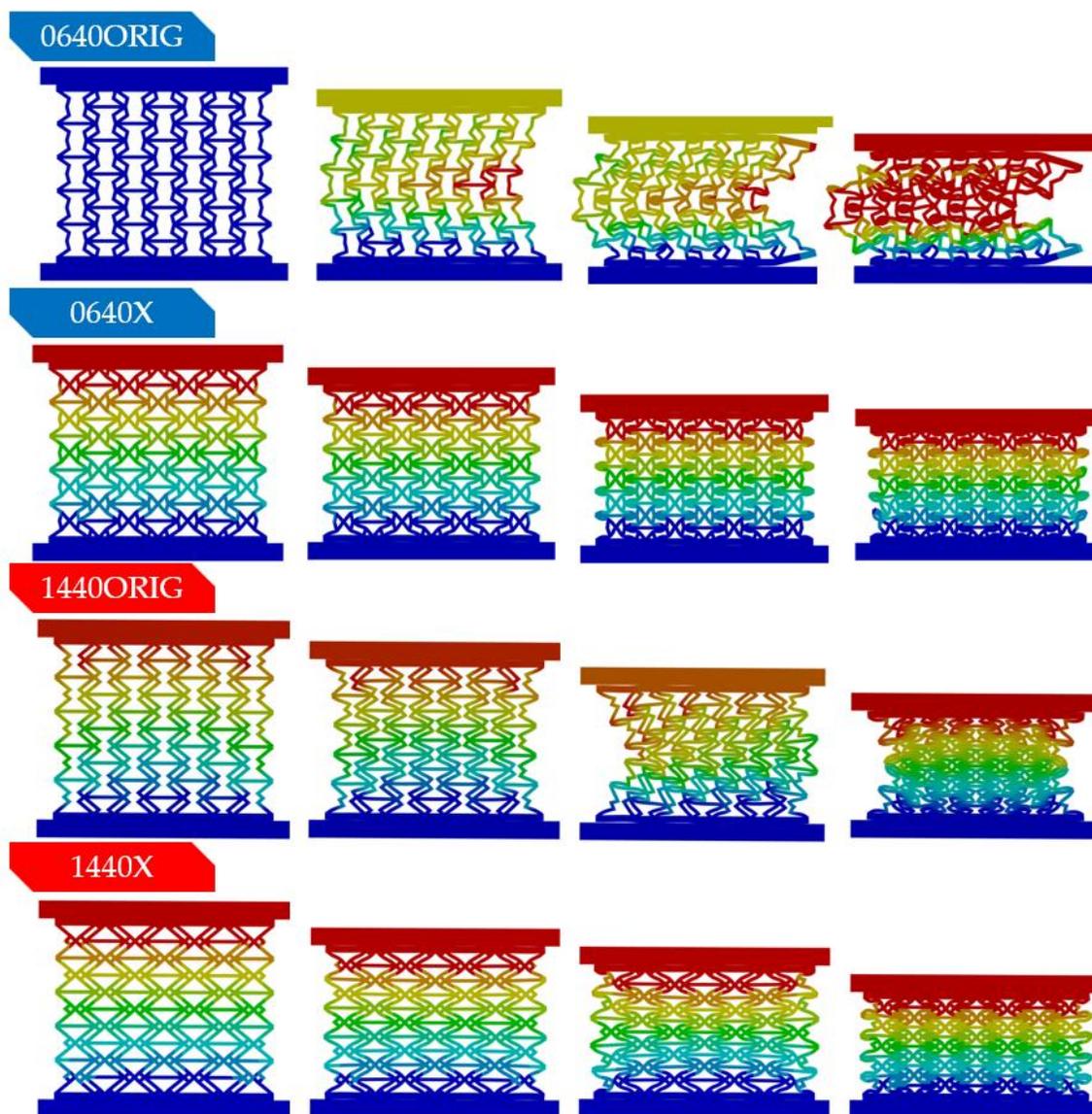
A végeselemes számításokkal kapott erő-elmozdulás görbéket az 52. (a)-(c) ábrákon ábrázoltam, a maximális zömítőellenállás értékek pedig, háromdimenziós ábrákon is bemutatásra kerülnek az 55. ábra szerint. A fejlesztés szempontjából rendkívül fontos a deformációs viselkedés alakulása; az 53. ábra az eredeti, merevítettlen és az x -merevítésű mintákat hasonlítja össze.

Első közelítésben az erő-elmozdulás görbék és a deformáció alakulása is biztató, mivel az x -merevítésű mintadarabok görbéi nagyobb erőértékeket vesznek fel, valamint a görbéken kisebb deformációs terhelésnél kezdődik a jelentős növekedéssel jellemezhető, tömörödéssel utaló szakasz, kedvezőbb energiafelvételi tulajdonságokat mutatva ezzel. A karakterisztikák stabilabbak, regresszió nélküliek, stabil deformációs viselkedést jelezve ezzel. A mintadarabok deformációs viselkedését összehasonlítva (53. ábra) látható, hogy míg a kétszeresen homorú mintadarabok esetében fellép a kihajlás, addig a merevített mintadarabok esetében nem beszélhetünk kihajlásról egyetlen paraméterkombináció mellett sem. A fejlesztés az egyik fő célkitűzését sikeresen elérte, ugyanis paraméterfüggetlen deformációs viselkedést mutat az x -merevítésű kettősen homorú méhsejt struktúra.

Az erő-elmozdulás görbék esetében a 0630X, 0635X, 0640X és a 1030X jelzésű mintadarabok mutatnak jelentős eltérést szemben az azonos paraméterekkel jellemezhető ORIG elnevezésű mintadarabokkal (52. (a)-(b) ábra). A jelenség a deformációs viselkedés javulásával magyarázható, mivel ezen mintadarabok eredetileg kihajlottak, ezzel csökkent a zömítési ellenállásuk. A deformációs viselkedést a 6.3.7. fejezetben ismertetem részletesen.

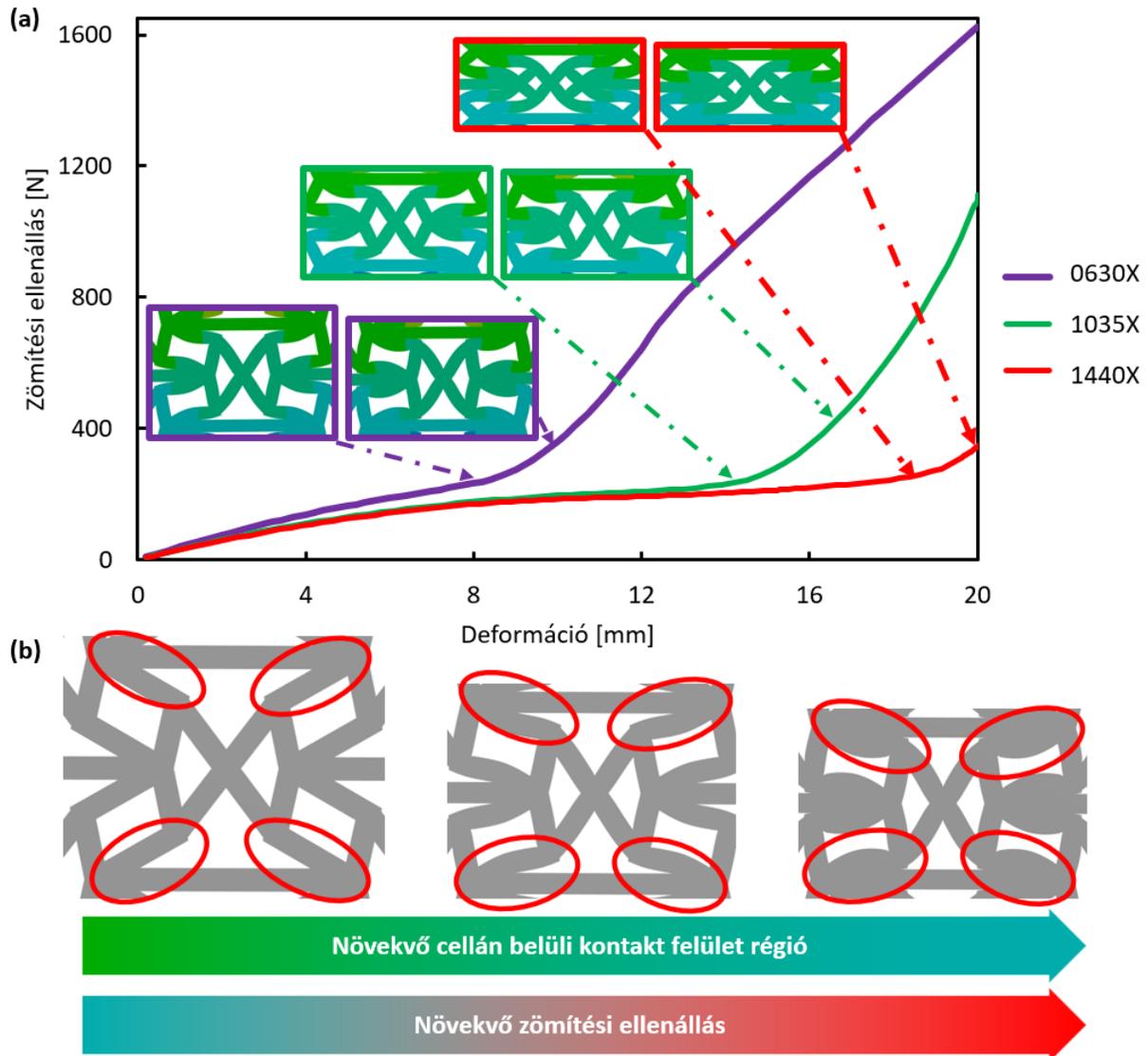


52. ábra. Az x-merevítésű mintadarabok erő-elmozdulás görbéi összehasonlítva az eredeti kettősen homorú méhsejt mintadarabokéval, a merevített mintadarabok minden esetben folytonos vonallal jelöltek. (a) Erő-elmozdulás görbék összevetése merevített és eredeti mintadarabokra $d_0 = 0,6$ mm mellett; (b) Erő-elmozdulás görbék összevetése merevített és eredeti mintadarabokra $d_0 = 0,9$ mm mellett; (c) Erő-elmozdulás görbék összevetése merevített és eredeti mintadarabokra $d_0 = 1,4$ mm mellett.



53. ábra. X-merevítésű és merevítetlen mintadarabok deformációs viselkedésének összehasonlítása kétféle paraméterkombináció mellett.

A kezdeti szakaszon megfigyelhető kis erőértékek folytonos növekedését egy még mindig folytonos, de nagy erőértékeket felvevő szakasz váltja fel. Ezen kettős karakterisztika az elemi cella deformációs viselkedés változásával magyarázható. Az 54. (a) ábra három diagramot mutat be, melyeknél eltérő pillanatokban következik be a karakterisztika változása. Az 54. (a) ábra továbbá megmutatja ezen pontokban az elemi cella deformációját, valamint a nyomó terhelés további 2 mm mértékű előrehaladásakor is. Az ábra alapján belátható, hogy a karakterisztika változása ugyan azon elemi cella szintű deformáció eredménye.

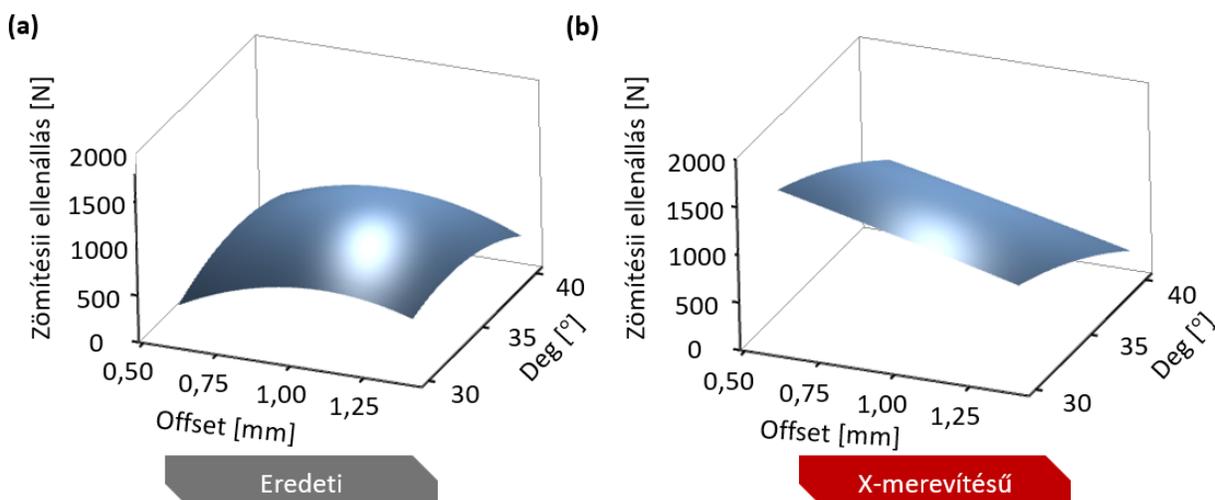


54. ábra. Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt bimodális erő-elmozdulás karakterisztikájának magyarázata. (a) Erő-elmozdulás görbék, kiemelve a karakterisztika változás pontjait elemi cella deformációs képekkel kiegészítve különböző kezdeti geometriai paraméterkombinációk mellett; (b) A bimodális deformációs viselkedés magyarázata az elemi cellán belüli deformáció alakulásával.

Az 54. (b). ábrán látható, hogy a deformáció előrehaladtával a felső homorú élek kapcsolatba lépnek a vízszintes alkotókkal, a rohamosan megnövekedett érintkezési felület nagyobb zömítési ellenállást eredményez. Az 54. (a). ábrából látható, hogy mindössze 2 mm deformációs terhelés növekmény milyen jelentős kontaktus felület növekedést eredményez. Ezen kontaktus pár egy stabil kontaktus pár, szemben a homorú méhsejtnél látottakkal. Amint kialakul az érintkezés, szétválás nem lehetséges, mivel az x-merevítés korlátozza a kifelé – befelé történő deformációt.

Az 52. (a)-(c) és az 54. (a) ábra alapján egyértelmű, hogy az x-merevítésű struktúrában *deg* paraméter növelése a bimodális erő-elmozdulás görbék intenzív erőnövekedést mutató szakaszát

a nagyobb deformációs terheléske irányába tolja el, ezzel azt eredményezve, hogy a maximális zömítési ellenállás csökken. A jelenség a várakozásainknak megfelel, mivel a kontakt (érintkezési kapcsolat) kialakulásának pillanata a homorú és vízszintes élek között kizárólag a kiinduláskori szög értékétől függ, ami a *deg* paraméter (50. (c) ábra). Az *offset* paraméter hatása az 52. ábra alapján nem teljesen egyértelmű, így a geometriai paraméterek hatásai a maximális zömítési erő vonatkozásában az 55. ábrán háromdimenziós görbéken kerültek ábrázolásra. Az 55. ábra alátámasztja a korábbi megállapítást, azaz az *x*-merevítésű struktúrákban a *deg* paraméter értékének csökkentése növeli a maximális erő értékét. A másik oldalon kijelenthető, hogy az *offset* paraméter csökkentése is növeli a maximális erő értékét.



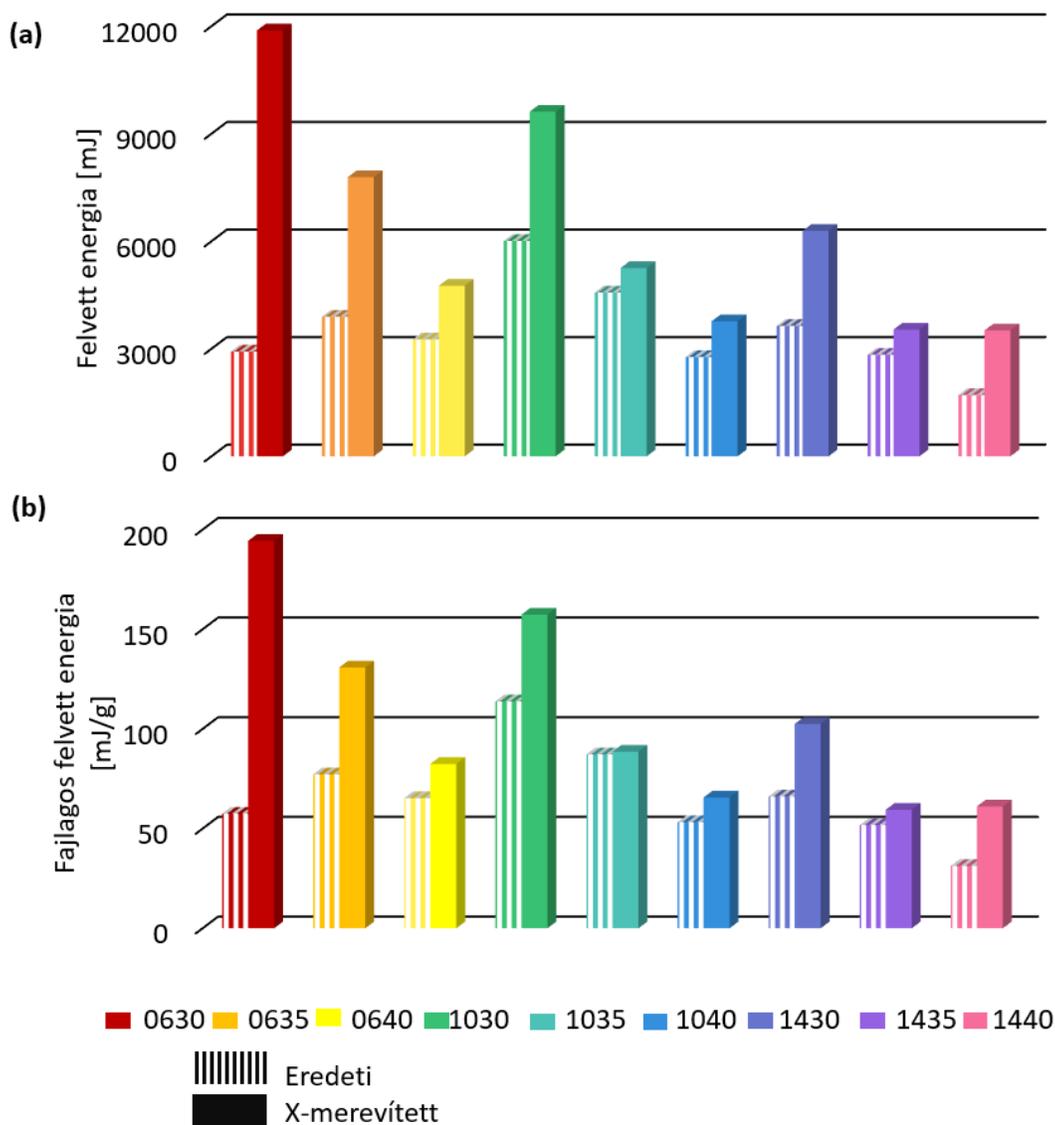
55. ábra. Az *x*-merevítésű és merevítetlen kettősen homorú méhsejt mintadarabok zömítési ellenállásának paraméterfüggése. (a) Az eredeti, merevítés nélküli kettősen homorú méhsejt mintadarabok zömítési ellenállásának paraméter függése; (b) Az *x*-merevített kettősen homorú méhsejt mintadarabok zömítési ellenállásának paraméterfüggése.

A 3D ábrákból egyértelműen látszik, hogy a legkisebb *offset* és *deg* paraméter érték esetén lesz a zömítési ellenállás a legnagyobb, a 0630X jelzésű mintadarab esetén. A szóbanforgó mintadarab eredetileg merevítés előtt kihajlást mutatott, így nem lehetett a szerkezet előnyeit kihasználni, ezért különösen fontos, nem kizárólag a mechanikai, hanem deformációs viselkedést befolyásoló paraméterek javítása is.

6.3.5 A felvett energia értékek elemzése

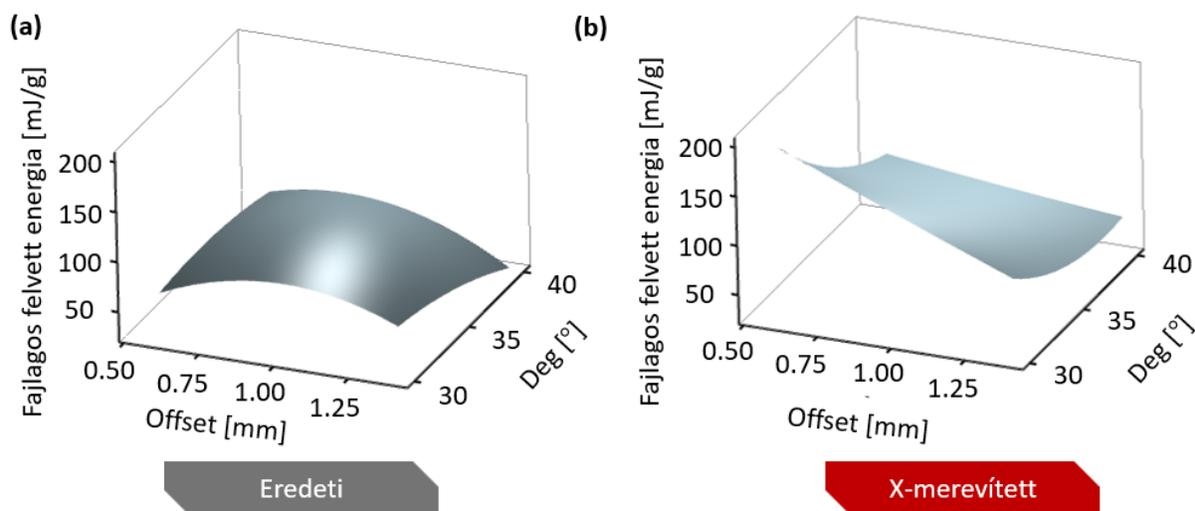
A felvett és fajlagos felvett energia értékeket az 56. (a)-(b) ábrán mutatom be. Mivel az *x*-alapú merevítés növeli a mintadarabok tömegét, ezért a hatás egyértelmű elemzése érdekében tömegre fajlagosítva is szükséges az energiaértékek vizsgálata. Az 56. (a)-(b) ábrák alapján egyértelműen látszik, hogy minden paraméter kombináció mellett kedvezőbb a merevített változat, még a fajlagosított eredmények tekintetében is. Mivel a felvett energia az erő-elmozdulás görbék alatti területtel definiált, ezért szoros kapcsolat várható a két jellemző között.

Adott *offset* paraméter érték mellett, kisebb *deg* paraméter értékek alacsonyabb deformációs terhelés mellett jelentősen növekvő és nagyobb maximális zömítő erő értékeket elérő erő-elmozdulás görbét eredményeztek (52. ábra). Az előzőek, így magasabb felvett energia értékeket eredményeznek és ez pontosan így is alakult az 57. ábra szerint, azaz az alacsonyabb *deg* paraméterrel jellemzett mintadarabok magasabb energiafelvevő képességgel jellemezhetők.



56. ábra. A felvett energia alakulása az eredeti és az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt mintadarabok esetében. (a) Felvett energia értékek x-merevítésű és az eredeti mintadarabok esetében; (b) Fajlagos felvett energia értékek x-merevítésű és az eredeti mintadarabok esetében

Az x-merevítésű mintadarabok esetében (szemben az eredeti, merevítés nélküli mintadarabokkal) egyértelmű a *deg* és az *offset* paraméterek hatása a fajlagos felvett energia tekintetében. A geometriai paraméterek értékének csökkentése tehát energiafelvevő képesség növekedést eredményez.

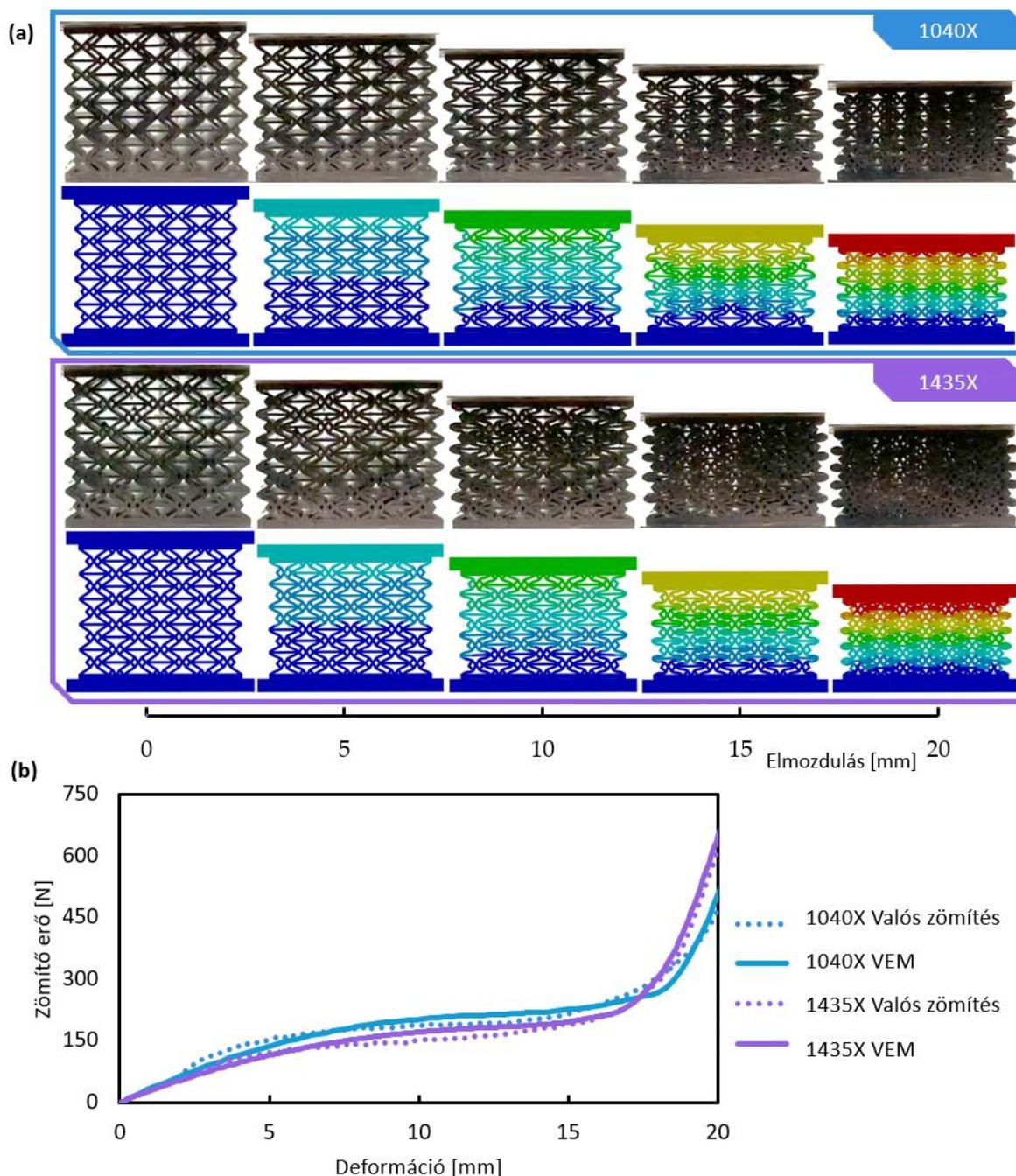


57. ábra. Az x-merevítésű és merevítetlen, kettősen homorú méhsejt mintadarabok felvett energiájának paraméterfüggése. (a) Az eredeti, merevítés nélküli kettősen homorú méhsejt mintadarabok felvett energiájának paraméterfüggése; (b) Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt mintadarabok felvett energiájának paraméterfüggése

A korábban bemutatott (38. ábra), a kettősen homorú méhsejt paraméter függését bemutató háromdimenziós ábrázolása és az 57. ábra. közti eltérés, az eltérő zömítési terhelésből és eltérő alapanyagból adódik. Ahogyan korábban is említettem, az x-merevítésű mintadarabok esetében kisebb deformációnál lép fel a tömörödés (mivel több alkotót tartalmaznak), ezért a zömítővizsgálatokat csak 20 mm terhelésig végeztem el.

6.3.6 A végeelemes eredmények validálása

A felállított végeelemes modell eredményeinek pontosságát valós zömítővizsgálatokkal vetettem össze az 58. ábra szerint. Az 58. (a) ábra szerint a deformációs képek (elemi cella és mintadarab szinten is), valamint az 58. (b) ábra szerint az erő-elmozdulás értékek is közel 100%-os egyezést mutatnak, így a felállított végeelemes modell pontosnak tekinthető, köszönhetőn az anyagmodellnek és az érintkezési tartományok megfelelő leírásának.



58. ábra. A végelelemes szimulációk validálása az x -merekítésű kettősen homorú méhsejt esetén. (a) Valós és végelelemes deformációs képek összevetése; (b) Valós és végelelemes erő-elmozdulás értékek összevetése.

6.3.7 A deformációs viselkedés és Poisson tényező elemzése

Az x -merekítésű fejlesztésem fő célja egy paraméterfüggetlen deformációs viselkedés elérése volt. A korábbi fejezetben megállapítottam, hogy mind az eredeti, mind az új, kettősen homorú auxetikus méhsejt kihajlásra hajlamos, bár az utóbbi jelentősen megnövelt stabilitással és akár folytonos auxetikus viselkedéssel is rendelkezhet.

Az egyes, adott paraméter kombinációjú mintadarabok deformációs viselkedését a 14. táblázat foglalja össze. A táblázat és az 53. ábra és 58. ábra alapján látható, hogy a fejlesztés elérte a célját, paraméterfüggetlen, kihajlás nélküli deformációs viselkedéssel rendelkezik az x -merevítésű szerkezet a vizsgált paramétertartományon.

14. táblázat. Az x -merevítésű kettősen homorú méhsejt deformációs viselkedése a vizsgált paramétertartományon összehasonlítva az eredeti, merevítetlen szerkezet deformációs viselkedésével.

Mintadarab megnevezés	Kettősen homorú méhsejt	X-merevítésű kettősen homorú méhsejt
0630X/ORIG	Kihajlás	Enyhe oldalirányú tágulás
0635X/ORIG	Kihajlás	Enyhe oldalirányú tágulás
0640X/ORIG	Kihajlás	Enyhe oldalirányú tágulás
1030X/ORIG	Kihajlás	Enyhe oldalirányú tágulás
1035X/ORIG	Folytonos auxetikus	Enyhe oldalirányú tágulás
1040X/ORIG	Folytonos auxetikus	Enyhe oldalirányú tágulás
1430X/ORIG	Folytonos auxetikus	Enyhe oldalirányú tágulás
1435X/ORIG	Folytonos auxetikus	Enyhe oldalirányú tágulás
1440X/ORIG	Folytonos auxetikus	Enyhe oldalirányú tágulás

Szemben a kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezettel, az x -merevítésű szerkezet nem mutat auxetikus viselkedést. A struktúra Poisson tényezőjét 12 pontból lekért deformációs komponensekkel határoztam meg, mint Yang és tsai. [157] az 59. (a) ábra szerint. Az x és y irányú deformáció komponensek a végeselemes modellből kerültek meghatározásra. Definíció szerint a Poisson tényező a keresztirányú és hosszirányú nyúlás negatív hányadosa, mely a (23) egyenlet szerint számítható.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \quad (23)$$

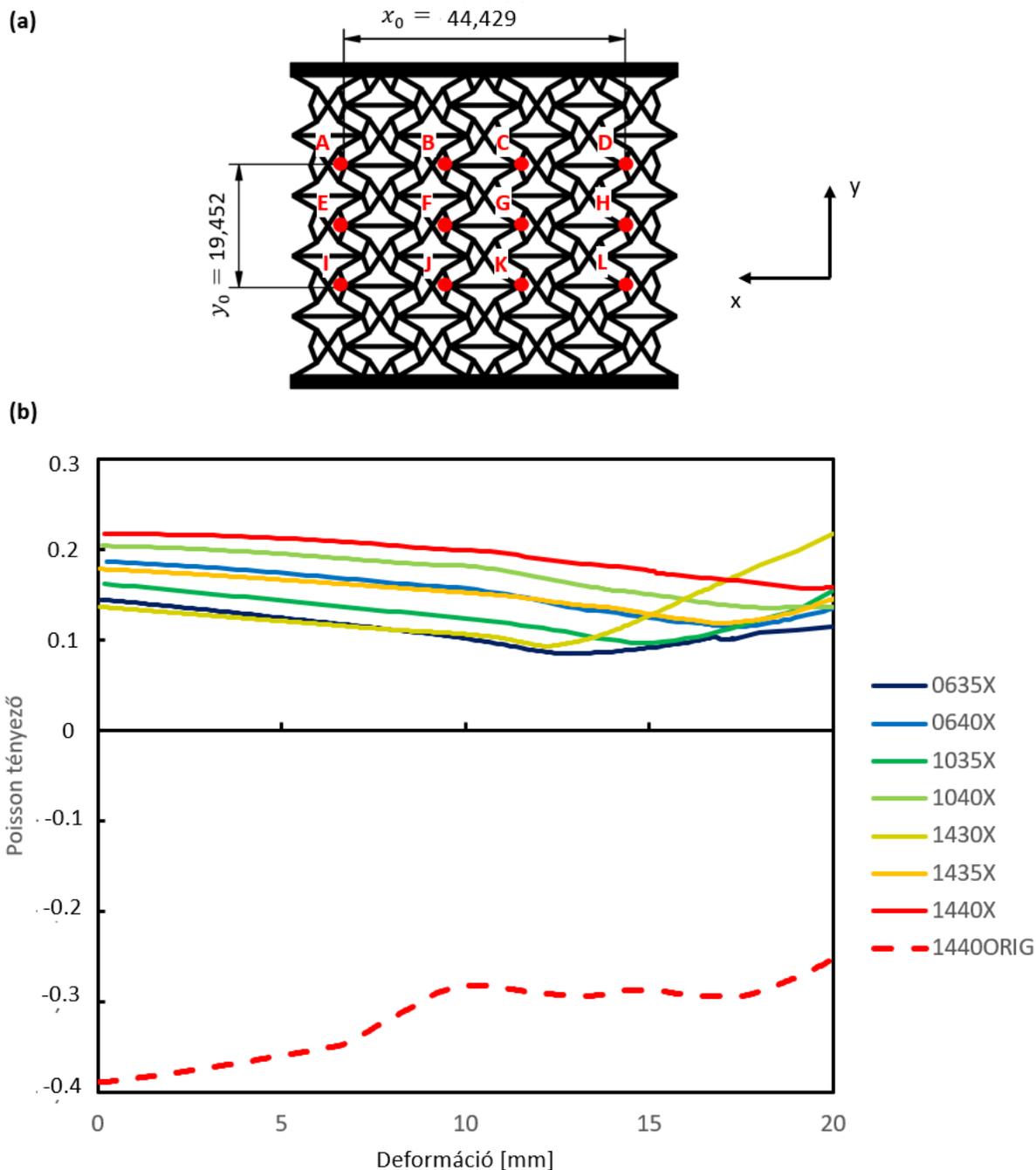
Zömítés során a keresztirányú nyúláskomponensek a következők: ε_{AD} ; ε_{EH} ; ε_{IL} ; míg az axiális irányú komponensek: ε_{AI} ; ε_{BJ} ; ε_{CK} ; ε_{DL} . A keresztirányú nyúlásértékek átlaga az x irányú nyúlásnak, míg a tengely irányú nyúláskomponensek átlaga az y irányú nyúlásnak felel meg ((24)-(25) egyenlet).

$$\varepsilon_{xAVG} = \frac{\varepsilon_{AD} + \varepsilon_{EH} + \varepsilon_{IL}}{3}, \quad (24)$$

$$\varepsilon_{yAVG} = \frac{\varepsilon_{AI} + \varepsilon_{BJ} + \varepsilon_{CK} + \varepsilon_{DL}}{4}. \quad (25)$$



Érdekes a Poisson tényezőt a deformációs terhelés függvényében ábrázolni, amely számos paraméterkombinációra az x-merevítésű szerkezet esetén az 59. (b) ábra szerint alakul. Az ábrán egy kettősen homorú, merevítés nélküli szerkezet eredményei is fel vannak tüntetve az összehasonlítás érdekében.

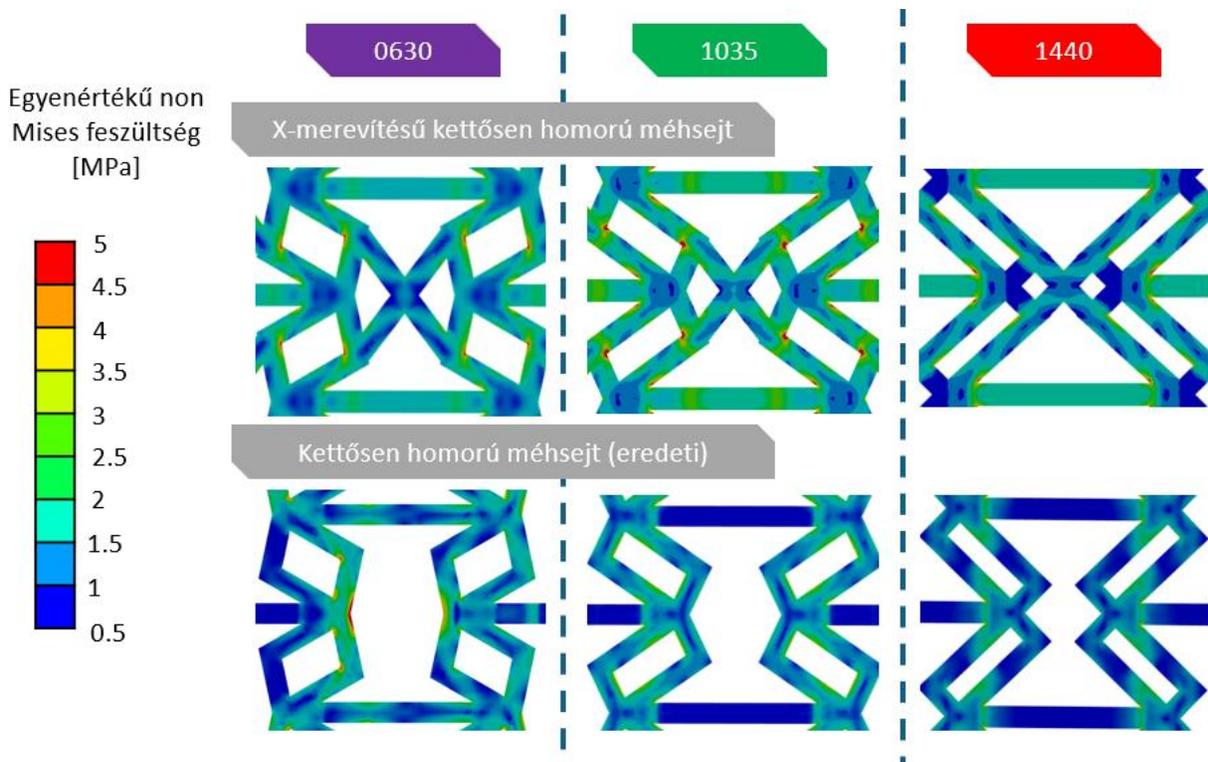


59. ábra. Poisson tényező meghatározása az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt mintadarabokra. (a) Deformáció komponens gyűjtőpontok; (b) Poisson tényező értéke a deformációs terhelés függvényében számos paraméterkombinációra kiszámítva és összevetve egy merevítés nélküli minta eredményével.

Szemben a kettősen homorú méhsejttel, az x -mervítésű szerkezetek kicsi, de pozitív Poisson tényezővel rendelkeznek. A Poisson tényező átlagosan 0,144, a legkisebb mért érték pedig 0,08 a 0635X jelű mintadarab esetében. Jelentős tömörödés 20 mm deformációnál indul meg ($\varphi_0 = 30^\circ$ *deg* paraméter értékkel rendelkező mintadarabok esetében hamarabb) melyet a Poisson tényező értékének ugrászerű megváltozása jelez előre. Az eredmények a várakozásoknak megfelelőek, az x -mervítés ugyan növeli a stabilitást, kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat eredményez, kihajlás nélküli deformációt kölcsönöz a szerkezetnek, de ugyanakkor a cellán belüli auxetikus viselkedést meggátolja. A Poisson tényező összehasonlításánál még fontos megemlíteni, hogy az x -mervítésű szerkezet Poisson tényezője stabilabb, szinte állandó értékű, azaz a teljes deformációs folyamat stabil.

6.3.8 A feszültség eloszlás elemzése

A végelemes módszerrel meghatározott feszültségértékek potenciális tönkremeneteli régiókat jelezhetnek elő. A 60. ábra az eredeti kettősen homorú és az x -mervítésű struktúra egyenértékű von Mises feszültségeloszlását hasonlítja össze 20 mm deformáció esetén.



60. ábra. X -mervített és mervítés nélküli kettősen homorú méhsejt elemi cellák feszültségeloszlásnak összehasonlítása.

Az értelmezhetőség érdekében, a feszültségeloszlás a deformálatlan elemi cella alakon kerül megjelenítésre.

Ahogy az ábrán is látható, az eredeti, kettősen homorú szerkezet feszültségeloszlása közel egyenletes, szignifikánsan nagy, lokálisan vagy globálisan kiugró feszültségértékek nem figyelhetők meg, melyek repedést vagy törést jelezhetnének elő, ezzel szemben az x -merevített szerkezet esetében lokalizált, nagy feszültségkoncentrációjú régiók figyelhetők meg a sarokpontokban.

Ezek a kritikus helyek éppen azok a sarokpontok, amelyek az x -merevítéssel össze lettek kötve, így korlátozzák az auxetikus viselkedést, aminek következtében eltérő lesz a feszültség eloszlás. Ezek a lokalizált feszültség régiók repedések, tönkremeneteli pontok kiindulásai lehetnek, bár a valós zömítések során nem lépett fel tönkremenetel. A 0630 merevítetlen jelű mintadarab esetében ugyanakkor nagyobb feszültség értékeket tartalmazó, kiterjedtebb feszültség zónákat figyelhetünk meg, míg az x -merevített mintadarab esetében, ezek jelentősen kisebb mértékűek és elosztottak. Az eltérés a deformációs viselkedés eltéréséből adódik, ezen merevítetlen mintadarab kihajlott deformáció során oldal irányban, így egyenetlen lokalizált feszültség csúcsok jelennek meg. A kihajlásra hajlamos mintadarabok esetében előnyösebb az x -merevítésű minták feszültség eloszlása, mégha ezen merevített szerkezet tönkremenetelre hajlamosabb is.



7 Összefoglalás

Kutatómunkám során a homorú méhsejt deformációs és mechanikai tulajdonságának javítását tűztem ki célul. A fejlesztést az alapoktól, az alapvető hatások megismerésétől és vizsgálatától kezdtem.

Az elemszám és alkotók igénybevételei hatásának párhuzamos, összehasonlítható elemzésére egy fraktál ihletésű, önismétlődő matematikai-leírás alapú környezetet hoztam létre. A vizsgálati elrendezésnek köszönhetően eltérő, elemszám és az alkotók eltérő igénybevétele mellett is, bármely mintadarab, bármely másik mintadarabbal összehasonlítható. A kidolgozott elrendezésben elvégzett zömítővizsgálatoknak köszönhetően megállapítottam, hogy az elemszám növelésének van egy határértéke (amely 36 elemszámra adódott a vizsgált elrendezésben és paramétertartományban), mely felett nem beszélhetünk jelentős mechanikai tulajdonság javulásról. A határérték ismeretében pontosan megállapítható a szükséges additív technológia kívánt felbontása, gyártási pontossága, vagy egy optimum (gazdasági – pontosági) meghatározható. Hasznos eredménynek tartom, hogy ezen határérték egybeesett a karcsúsági tényező határértékét megközelítő elemszámmal. Mivel a lattice szerkezetek porózus (üreges) szerkezetek, ezért értelmezhető a karcsúsági tényező.

Az alkotók igénybevételi állapotát tekintve, a várákosoknak megfelelően a tisztán nyomott igénybevételű alkotókból álló mintadarabok nagyobb zömítési ellenállással rendelkeztek, szemben a komplex, hajlításhoz is kitett alkotókból álló mintadarabokéval. A lattice szerkezeteket ugyanakkor nem kizárólag olyan mechanikai tulajdonságok alapján választjuk meg, mint zömítési ellenállás és az energia felvevőképesség, hanem a deformációs viselkedés is kiemelkedően fontos. A tisztán nyomott alkotókból álló mintadarabokat oldalirányú kihajlás jellemzi, szemben az eltolt elrendezésű komplex igénybevételű mintadarabokkal melyek önmagukba roskadó viselkedést mutatnak. A kihajlás, egy nem kiszámítható viselkedés, ezért a nagy teljesítőképességű lattice szerkezetekben nem fordulhat elő kihajló viselkedéssel.

A széles körben alkalmazott, kiemelkedő energiafelvevő képességgel rendelkező auxetikus homorú méhsejt szerkezet kedvező tulajdonságainak ellenére, kihajlásra hajlamos a deformáció növekedésével. A kihajlás fellépéséből adódóan auxetikus viselkedése és kedvező tulajdonságai csak egy szűk deformációs tartományon jellemzők a szerkezetre. A homorú méhsejt fejlesztésével egy új, kettősen homorú méhsejt elemi cellát dolgoztam ki, mely a homorú méhsejten alapul és annak egy geometriai módosítással létrehozott változata. Az új szerkezet jóságát a geometriai módosítás leírására használt két paraméter (*offset* és *deg*) széles tartományán vizsgáltam. A fejlesztés rendkívül eredményesnek mondható, mivel megfelelő paraméterkombináció esetén nem lép fel kihajlás, folytonos auxetikus deformációs viselkedés jellemzi a mintadarabokat. A módosítás hatására a zömítési ellenállás jelentősen megnőtt, továbbá a tömre fajlagosított energiafelvevő kapacitás is mintegy ötszörösére nőtt (paraméter függően).



Még a kihajlást okozó paraméter kombinációk mellett is felülmúlják az új szerkezet mechanikai tulajdonságai az eredeti homorú méhsejtet.

Az energia felvevőkapacitás további növelése céljából irodalom és lattice trendek kutatásai alapján a szegmentált kitöltés hatását is vizsgáltam. A kettősen homorú elemi cellák által közrefogott négyszögletes régiókat szilikonnal kitöltve abszorber szegmensekké alakítottam az energiafelvevő képesség javulásának érdekében. A kitöltés hatására a deformációs viselkedés romlott azon mintadarabok esetében, melyek egyenetlen tömörödést mutattak. Ugyanakkor a nagyobb *offset* értékű mintadarabok közel további háromszoros energiafelvevő kapacitás növekedést mutattak. A számszerű növekedés mellett, egy rendkívül egyedi, bimodális erő-elmozdulás karakterisztikát is eredményezett a kitöltés. Ezt a szerkezetet kezdeti nagy deformáció mellett alacsony energia felvétel jellemzi, melyet egy hirtelen megugró energia felvevő kapacitás vált fel, ami kimondottan előnyös például ütközési energia felvétele esetén.

Ahhoz, hogy egy lattice szerkezet széles körben, valós termékekben alkalmazható legyen számos olyan követelménynek kell megfelelnie, mint a kiszámítható deformációs viselkedés és előre definiált tervezési irányelvek testreszabható egyéb mechanikai tulajdonságok. Az általam megalkotott *x*-merevítésű kettősen homorú méhsejt struktúra képes ezen tulajdonságok elérésére. Az *x*-merevítés egy stabil, önmagába tömörödő, paraméterfüggetlen, kis Poisson tényezővel jellemezhető deformációs viselkedést eredményezett. A mechanikai tulajdonságok jelentősen javultak és geometriai paraméterek mentén állíthatók a felhasználó igényeihez. A fejlesztésekhez pedig egy rendkívül pontos végeeselemes környezetet állítottam fel és alkalmaztam.

A bemutatásra került fejlesztéseknek köszönhetően sikerült új elemi cella struktúrák és fejlesztéseik keresztül a homorú méhsejtet a nagyteljesítőképességű lattice szerkezetek tárházába emelnem.



8 Új tudományos eredmények – tézisek

8.1 Bevezető gondolatok

A lattice struktúrák deformációs viselkedését, mechanikai tulajdonságait (zömítési ellenállás, energiatároló képesség) számos tulajdonság befolyásolja. Kutatómunkám során az alapvető jellemzők hatásának megismerése mellett geometria fejlesztésekkel kívántam javítani a lattice struktúrák tulajdonságait. Kutatómunkámban egy fraktál ihletésű négyzetes elemi cellából felépített, önismétlődő geometriát hoztam létre és vizsgáltam, valamint az alapvető jellemzők vizsgálata mellett célul tűztem ki, a homorú méhsejt struktúra (lásd a mellékelt ábrán) deformációs viselkedésének javítását is.

Mivel a homorú méhsejt szerkezet a jelentős porozitásából és homorú deformációs viselkedéséből adódóan kihajlásra hajlamos, ezért a deformációs tulajdonságok javítása mellett az egyéb mechanikai tulajdonságok javítása is célt volt, elsősorban a zömítési ellenállás növelése és az energiatároló kapacitás növelése. Az elérni kívánt célokat geometriai módosításokkal és az üregek kitöltésével kívántam elérni.

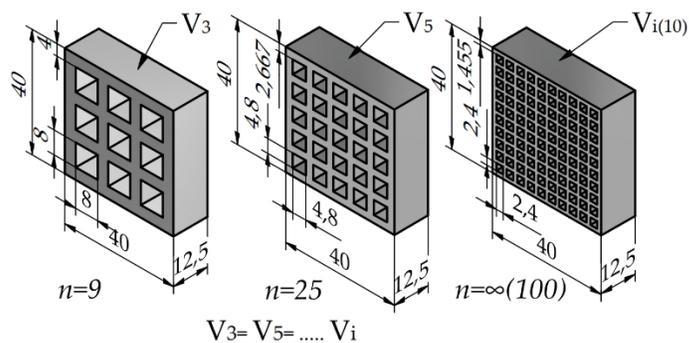
A homorú méhsejt struktúra deformációs viselkedése és más mechanikai tulajdonságai hatékonyan javíthatók, amennyiben a központi szerkezeti zóna hangsúlyosabb kialakítású.

Az alapvető jellemzők hatáselemzése, valamint a homorú méhsejt deformációs és más mechanikai tulajdonságának javítása vonatkozásában az alábbi új tudományos eredményeket fogalmazom meg:



8.2 I. Tézis

Létrehoztam egy olyan új, fraktál ihletésű, négyzetes elemi cellákból felépülő geometriai elrendezést, amelyben az elemszám növelésétől függetlenül (*azonos befoglaló méretek mellett*) azonos térfogattal és tömeggel rendelkeznek a mintadarabok (I. ábra). Megállapítottam, hogy az elemszám növelése, – mely az elemi cellák méretének csökkenésével jár – a zömítési ellenállás és az energiafelvevő kapacitás javulását eredményezi. A létrehozott mintadarabok (*40x40x12,5 mm méretű, SLA technológiával, ProX PA alapanyagból létrehozottl; 50%-os relatív páratartalom mellett végzet vizsgálatok*) esetében definiálható egy karcsúsági tényező, mely a függőleges alkotók magasság – vastagság arányaként értelmezhető. Megállapítottam, hogy az elemszám növelésének, ezzel együtt a definiált karcsúsági tényezőnek létezik egy határértéke, amely felett a vizsgált mechanikai tulajdonságok – a zömítési ellenállás és az energiafelvevő képesség – nem változnak jelentősen (jelen négyzetes alapú, fraktál ihletésű vizsgálati környezetben). Ezt a megállapítást az $n = 4 \dots 100$ elemszám terjedelemben bizonyítottam. A karcsúsági tényező határértékének ismeretében meghatározható az adott geometriájú mintadarab készítéséhez szükséges additív gyártástechnológiai pontosság, melynek ismeretében gazdaságosabb technológia választható.



I. ábra. Fraktál ihletésű, négyzetes elemi cellákból felépülő mintadarabok eltérő elemszám mellett, a főbb méretek és tulajdonságok feltüntetésével.

Az I. tézis az alábbi publikációkra épít: [S1] [S5].

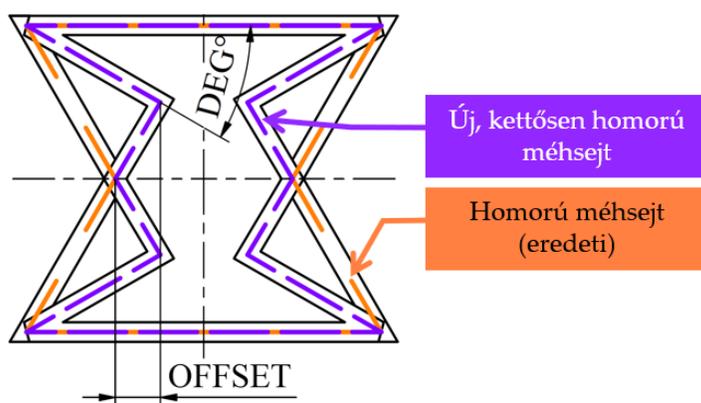
8.3 II. Tézis

A kihajlásra hajlamos homorú méhsejt deformációs és egyéb mechanikai tulajdonságainak javítására létrehoztam egy módosított, kettősen homorú méhsejt struktúrát. Az új struktúra a homorú méhsejten alapul, a geometriai módosítást az *offset* és a *deg* paraméterekkel jellemeztem (II. ábra). A kettősen homorú kialakítás által bevitt új töréspontok nagyobb deformációs szabadságot kölcsönöznek a struktúrának, ezzel ösztönözve a folyamatos auxetikus viselkedést nyomóterhelés esetén. Továbbá, a kétszeresen homorú méhsejt leírására használt *offset* és *deg* paraméterek értékének növelése a kihajlással szemben a folytonos auxetikus viselkedés felé tolja a szerkezet deformációs viselkedésének tulajdonságait.

- a) Az *offset* és *deg* paraméter értékek növelése a vizsgált tartományban (*offset* = 0,6...1,4 mm; *deg* = 30 ... 40°) fokozatosan javuló, az eredeti szerkezet tulajdonságait minden vizsgált paraméter kombináció mellett felülmúló mechanikai tulajdonságokat eredményeznek.

A 37% Photocentric U DLP és 63% Resione F69 anyagkeverékből maszkolt sztereolitográfia technológiával létrehozott, új kettősen homorú (50.6x60x30mm befoglaló méretű) méhsejt szerkezet fajlagos energiafelvevő képességének maximális növekedése elérheti az 514%-ot, míg a maximális zömítési ellenállás növekedése az 1750%-ot az alkalmazott *offset-deg* paramétertől függően.

- b) A létrehozott, új, kettősen homorú méhsejt struktúra kihajlása a következő öt *offset-deg* paraméterkombinációi esetén bizonyítottan elkerülhető: 1mm – 35°, 1mm – 40°, 1,4mm – 30°, 1,4mm – 35°, 1,4mm – 40°.

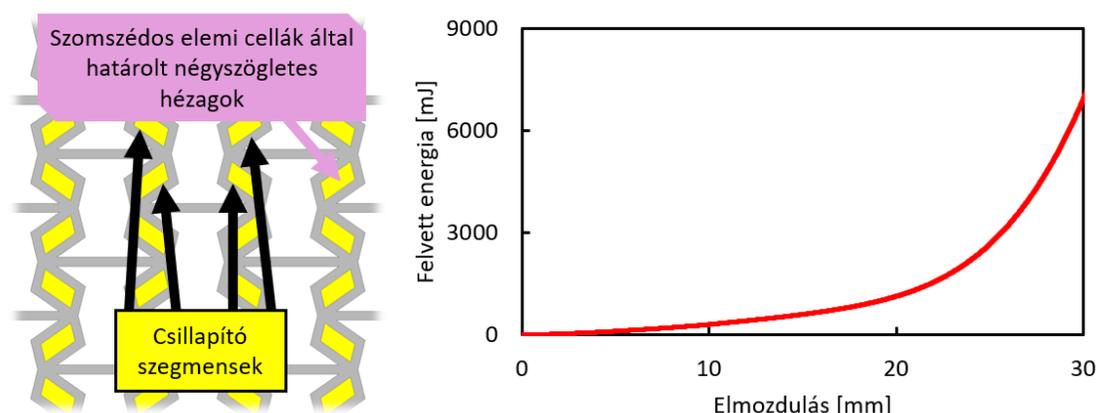


II. ábra. Az új kettősen homorú méhsejt struktúra származtatása, jellemzésre használt paraméterek bemutatása

A II. tézis az alábbi publikációkra épít: [S2].

8.4 III. Tézis

A 75% Litliq FX60 és 25% Litliq TH50 3D nyomtató gyanta anyagkeverékből maszkolt sztereolitográfia technológiával létrehozott kettősen homorú méhsejt elemi cella rácsszerkezeti elemeinek kitöltés útján megvalósított részleges abszorber elemekké alakítása hatással van a szerkezet energiafelvevő képességére nyomóigénybevétel esetén. Az abszorber elemek kialakítása megvalósítható a szomszédos elemek által közrezárt téglalap alakú szegmensek rugalmas (*Soudal polisziloxán alapú ipari szilikon*) anyaggal történő kitöltésével (III. ábra). Az abszorber elemek hatására a szerkezet energia felvételi karakterisztikája bimodális jellegűvé válik, amelynek első szakasza nagy deformációval és kis energiafelvétellel jellemezhető, majd ezt követően egy fokozatosan növekvő energiafelvételi képességre utaló, ún. csillapítási szakasz jelenik meg, mikor a kitöltött régiók fokozatosan bekapcsolódnak a terhelés felvételbe. Az abszorber elemek beépítésével olyan célszerűen megtervezett energiafelvételi karakterisztika hozható létre, amelynek kezdeti szakaszába az ütközési sebesség csökkentése, majd az ütközési energia hatékony elnyelése valósul meg.



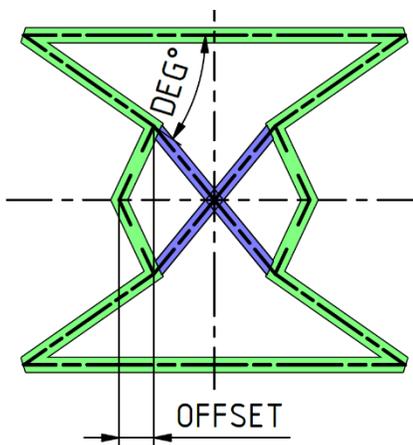
III. ábra. A kettősen homorú méhsejt szegmentált kitöltésének bemutatása, a csillapító szegmensek megszületése; a csillapító elemek beépítésével elért két-szegmentált energia felvevő karakterisztika.

A III. tézis az alábbi publikációkra épít: [S3].

8.5 IV. Tézis

A II. tézisben ismertetett új, kettősen homorú méhsejt továbbfejlesztéseként központi merevítő szegmensek beépítésével, létrehoztam egy új lattice struktúrát melyet x-merevítésű kettősen homorú méhsejtnek neveztem el. Jellemzésére és hatásvizsgálatára nyomóvizsgálatokat és szintén az *offset* és a *deg* paramétereket használtam fel (IV. ábra).

- a) A 80% Litliq FX60 és 20% Litliq TH50 3D nyomtató gyanta anyagkeverékből maszkolt sztereolitográfia technológiával létrehozott (50.6x61x30mm befoglaló méretű) x-merevítésű kettősen homorú méhsejt struktúra önmagába zömölű teljesen kihajlásmentes, kis és stabil Poisson tényezőt biztosító deformációs viselkedést eredményez. A Poisson tényező értéke a 0,1-0,22 tartományban mozog a geometriai paraméterektől függően. Egy adott paraméterkombinációval jellemezhető mintadarab esetében 40% deformáció elérésekor is maximum 30%-kal változik a Poisson tényező értéke.
- b) Bizonyítottam a vizsgált paraméter tartományra, hogy a geometriai paraméterek kizárólag a vizsgált mechanikai tulajdonságokra vannak hatással. A deformáció független az *offset* és a *deg* paraméterek értékeitől a vizsgált paraméter tartományon (vizsgálati tartomány: *offset* = 0,6...1,4 mm; *deg* = 30...40°).



IV. ábra. Az x-merevítésű kettősen homorú méhsejt szerkezet bemutatása

A IV. tézis az alábbi publikációkra épít: [S4].

9 Summary

My research work was aimed at improving the mechanical and deformational properties of the re-entrant honeycomb. I started my research from the basics, understanding and examining fundamental effects. I created a fractal-inspired, self-repeating mathematical description-based environment for a parallel and comparable analysis on the effects of element number and component load state. Specimens were manufactured in an *ordered* (pure compression load state) and *offset* (complex load state) layout, the unit cell number ranged from 4-100. Owing to the analysis setup, any specimen can be compared with any other specimen even with different number of elements and different component load state. Based on compression test results, I found that there is a limit to increasing the number of elements (36 elements were obtained for the layout and parameter range evaluated), above which no significant mechanical property (such as energy absorption capacity or compressive resistance improvement) improvement can be observed. Knowing this limit value, one can precisely determine the required additive manufacturing resolution. The studied lattice structures are porous structures; thus, slenderness ratio can be determined, whose limit value coincides with the limit value of element number increase.

In terms of component load state, as expected, specimens consisting of purely compressed components had higher compression resistance compared to specimens consisting of components subjected to complex load and bending. However, lattice structures were not evaluated solely along the investigated mechanical parameters, deformation behaviour is also of paramount importance. Specimens consisting of purely compressed components are characterised by lateral buckling, as opposed to specimens consisting of components under complex loading in the offset arrangement exhibiting self-collapsing behaviour.

Deflection is an unpredictable behaviour; therefore, high-performance lattice structures should not exhibit it. Despite its favourable properties, the widely used re-entrant honeycomb structure with its outstanding energy absorption capacity is prone to buckling as deformation progresses. Due to buckling, auxetic behaviour and favourable properties are only characteristic over a narrow deformation range. In my thesis I proposed a novel doubly re-entrant honeycomb structure based on the original re-entrant structure. The novel doubly re-entrant structure was created by a partial geometrical modification characterized by two parameters, namely *offset* and *deg*. The development is found to be highly effective, since with the right parameter combination no buckling occurs, specimens are characterized by continuous auxetic deformation. Novel, doubly re-entrant specimens showed a significant increase in compression resistance and in specific energy absorption capacity (5 times increase was observed). Even with parameter combinations resulting in buckling, novel specimens outperformed the original re-entrant structure.



To further increase the energy absorption capacity I investigated the effect of segmented filling inspired by literature and lattice trend research. Rectangular segments enclosed by neighbouring doubly re-entrant unit cells were filled with silicone transforming them into absorber segments. Filling worsened the deformation behaviour of specimens showing uneven compaction prior to filling. At the same time, specimens with greater offset parameter values showed an almost threefold increase in energy absorption capacity. Filling also resulted in a unique bimodal energy absorption characteristic. An initial stage of large deformation is accompanied with low energy absorption, followed by a stage with sudden increase of energy absorption capacity. This characteristic is desired in impact energy absorption, for example in the protection of vulnerable road users.

A lattice structure to be widely used in real life applications, must meet several criteria, such as predictable deformation behaviour and mechanical properties that can be tailored according to predefined design guidelines. The x-reinforced doubly re-entrant honeycomb structure I proposed can achieve these properties. X-reinforcement resulted in stable, self-compacting, parameter independent deformation behaviour characterized by a low Poisson's ratio. Mechanical properties have been significantly improved and can be adjusted along parameters to meet the needs of the user. All my developments, investigations were supported by a highly accurate finite element environment, that I set up to accurately represent real life tests.

Owing to the developments presented, through novel unit cell designs, I managed to raise the re-entrant honeycomb into the realm of high-performance lattice structures.



10 A tudományos eredmények hasznosulása

Jelen értekezésemben alapvetően módszertanokat és konkrét fejlesztéseket mutattam be, eredményeim konkrét gyakorlati alkalmazásban vagy további kutatómunkák alapjaként hasznosulhatnak.

A fraktál ihletésű kísérleti elrendezés egy remek példa arra kutatótársaim számára, hogy hogyan lehet eltérő fundamentális jellemzők között kapcsolatot teremteni, hatásukat párhuzamosan, összehasonlítható módon alkalmazni. A fraktál ihletésű vizsgálati tér számos más egyéb tudományterületen alkalmazható, vagy éppen kiterjeszthető a jelen vizsgálatom más lattice struktúrákra is.

A homorú méhsejt szerkezet az irodalmi áttekintésben bemutatottak szerint számos előnyös tulajdonsága mellett kihajlásra hajlamos így annak gyakorlati alkalmazása jelentős szimulációs és számítási előkészítő munkát igényel. Az értekezésemben bemutatott kettősen homorú méhsejt szerkezet megtartotta a szerkezet előnyös auxetikus deformációs viselkedését jelentős (több mint 50% mértékű) deformációs terhelés mellett, így minden olyan területen, ahol az auxetikus viselkedés, a jelentős energiafelvevő képesség fontos, az eredeti homorú méhsejt mellett alkalmazható ez az új struktúra.

A szegmentált kitöltés eredményeként létrehozott abszorber elemekkel ellátott szerkezet mind módszertani szempontból, mind gyakorlati szempontból hasznosítható. A szegmentált kitöltéssel kutató társaimnak megmutattam, hogy bár a kitöltés alapú tulajdonságjavítás egy aktívan kutatott terület, eltérve a trendektől (jelen esetben a részleges kitöltéssel) újszerű eredmények érhetők el. A szegmentált kitöltéssel egy programozható karakterisztika elérése volt a célom, az abszorber elemek épp úgy helyezkednek el, hogy azok csak később a terhelés előrehaladtával kapcsolódnak be a terhelésvételbe. Az eredményül megalkotott bimodális energiafelvételi karakterisztika hatékonyan alkalmazható például védtelen közlekedési résztvevők védelmére, ahol első lépésben az ütközési sebesség jelentős csökkentése, majd az ütközési energiafelvétel a cél. A megalkotott szerkezet a jövőben akár kisebb kísérleti járművek lengéscsillapítójaként is elképzelhető, mivel additív gyártástechnológiával gyártható, így akár a járművel együtt, utólagos szerelést nem igényelve is gyártható.

Kutatómunkám kezdetétől fogva célom volt az egyes lattice struktúrák széleskörű gyakorlati elterjedésének elérése. Ehhez paraméterfüggetlen deformációs viselkedést és paraméterek függvényében egyértelműen állítható mechanikai tulajdonságokat kellett elérnem. A kitűzött célt az x-merevítésű, kettősen homorú méhsejt struktúrával értem el. A megalkotott struktúra deformációja önmagába zömölő, így a beépítése – betervezése során a tervező mérnöknek nem feladata komplex szimulációkat elvégeznie, a meghatározott terhelési értékekre pedig a geometria paraméterek segítségével állítja be a lattice struktúrát.

Az auxetikus szerkezet magas porozitásából adódóan terhelhetőségük korlátozott, eredményeimmel rámutattam, hogy központosan hangsúlyos elemi cella struktúrákkal növelhető a szerkezetek terhelhetősége és deformációs stabilitása is. Az általam stabilizációs irányelvnek keresztelt megállapításom számos további auxetikus lattice szerkezet tulajdonságát javíthatja.

Vizsgálataim kardinális részét képezték a végeeselemes vizsgálatok is. A felállított végeeselemes modellek mind szimulációs mind pedig az anyagmodellek tekintetében kellően pontos lekövezték a valós vizsgálati eredményeket. A bemutatott problémák, és a problémákra kínált megoldások, módszertanok oktatási célból használhatók a nemlineáris végeeselemes vizsgálatok témakörében.



Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném köszönetemet kifejezni szüleimnek, barátaimnak folyamatos támogatásukért, türelmükért.

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Horváth Richárdnak, aki elvállalt engem és a témát. Témavezetőm mindig odaadón támogatta kutatómunkám előrehaladását, maximálisan felismerve, építve és továbbfejlesztve képességeimet és hiányosságaimat. Fáradhatatlanul válaszolt egyszerűbb, adminisztratívabb kérdéseimre, objektíven értékelte munkáim, eredményesen irányt mutatott a számomra még ismeretlen publikáció készítés világába.

Köszönet illeti Dr. Rádics János Pétert, korábbi témavezetőmet, aki megismertette és megszerettette velem az additív gyártástechnológiák – metaanyagok világát. Korábbi közös munkáink hatalmas szakmai és emberi fejlődést eredményeztek számomra.

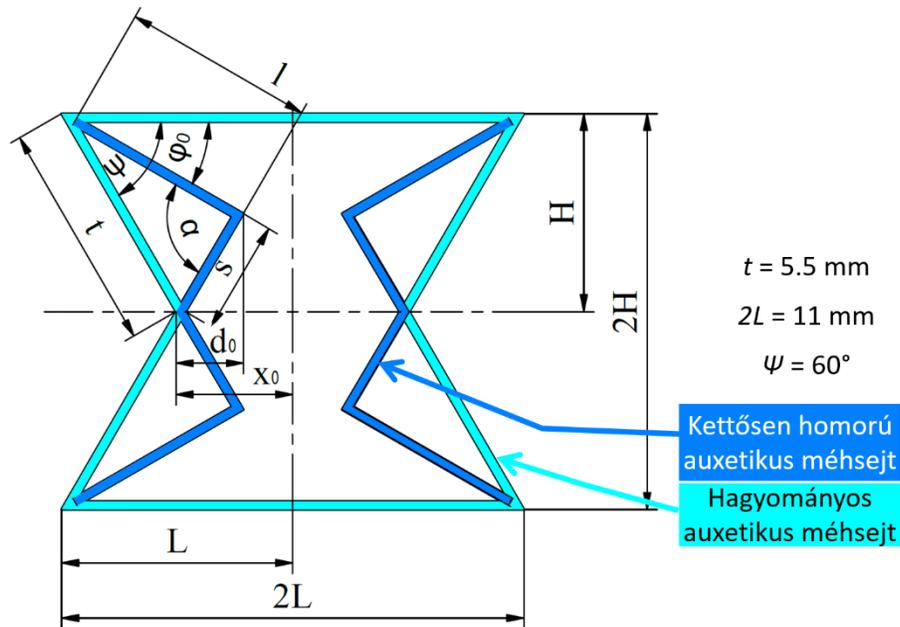
Köszönöm Dr. Cveticanin Livia odaadó munkáját az új lattice struktúrák viselkedésének analitikus leírásában.

Köszönet illet még az Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola valamennyi munkatársát, akik segítségemre voltak a kutatásomban.

11 Mellékletek

1. Melléklet: A várható viselkedés előrejelzése analitikus közelítéssel

Az új kettősen homorú auxetikus méhsejt szerkezet várható deformációs és egyéb mechanikai tulajdonságait analitikus módszerrel is közelítettem. Az egyenletekhez felhasznált jelölések és méretek a 61. ábra szerinti. Az ismert méretek a következők: $t = 5,5$ mm, $2L = 11$ mm és $\psi = 60^\circ$. A korábban (27. (a) ábra) bemutatott *offset* és *deg* paraméterek d és φ jelölést kaptak. A deformáció előrehaladtával belátható, hogy ezen paraméterek értéke változni fog, ezért a kiinduláskori értéküket d_0 és φ_0 jelölésekkel különböztettem meg.



61. ábra. Méretek és jelölések az analitikus jellemzéshez

Az elemi cella ismeretlen méretei az ismert méretek alapján a következő egyenletekkel írható le:

$$H = t \sin \psi = l \sin \varphi_0 + \sqrt{s^2 - d_0^2}, \quad (26)$$

$$x_0 = L - t \cos \psi = L - l \cos \varphi_0 + d_0. \quad (27)$$

Ahol l és s értéke továbbra is ismeretlen, értékeik a kezdeti paraméterek *offset* d_0 és *deg* φ_0 értékektől függenek a következők szerint:

$$l = \frac{L - x_0 + d_0}{\cos \varphi_0}, \quad (28)$$

$$s = \sqrt{(H - (L - x_0 + d_0) \tan \varphi_0)^2 + d_0^2}. \quad (29)$$

Az ismert méretek alapján kiszámítható, hogy $H = 4,763$ mm és $x_0 = 2,75$ mm. A kiinduláskori paraméterek függvényében meghatározásra kerültek az elemi cellát jellemző további méretek (15. táblázat).

15. táblázat. Az elemi cellák paraméterfüggő geometriai méretei

Elnevezés	0630D	0635D	0640D	1030D	1035D	1040D	1430D	1435D	1440D
φ_0 (°)	30	35	40	30	35	40	30	35	40
d_0 (mm)	1,4	1,4	1,4	1	1	1	0,6	0,6	0,6
l (mm)	4,792	5,066	5,417	4,330	4,578	4,895	3,868	4,089	4,373
s (mm)	2,750	2,326	1,898	2,784	2,360	1,901	2,892	2,91	2,42

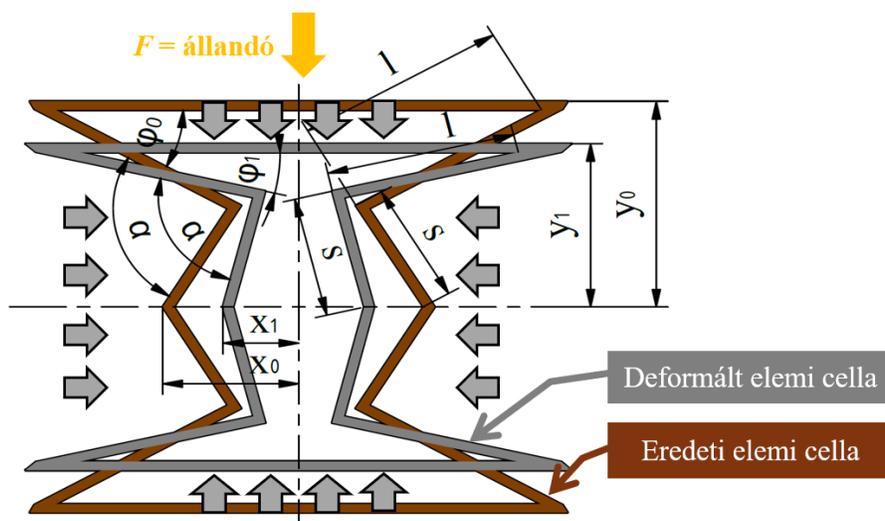
Az analitikus megközelítés tovább egyszerűsíthető, mivel a kezdeti *offset*, d_0 paraméter kifejezhető a kezdeti *deg*, φ_0 paraméterrel:

$$d_0 = s \cos(\alpha - \varphi_0). \quad (30)$$

Ahol α az l és az s hosszúságú élek által bezárt szög (lásd 61. ábra). Az analitikus megközelítés során ez a szögérték állandónak tekinthető.

$$\cos\alpha = \frac{l^2 + s^2 - t^2}{2ls}. \quad (31)$$

A deformáció a konstans függőleges irányú erő hatására indul meg, mely a cella felső élén fejt ki hatását. A terhelés hatására az elemi cella magassága (y) csökken, valamint szélességében (x) összehúzódás figyelhető meg (62. ábra.).



62. ábra. A kettősen homorú elemi cella deformációs viselkedésének bemutatása terhelés hatására.

A terhelés hatására fellépő deformációs változások az x és y irányban felírhatók azon két paraméter segítségével (d_0 és φ_0) melyeket az elemi cella jellemzésére, a geometriai módosítás jellemzésére is használtam a (32)-(33) egyenletek alapján.

$$y = l \sin \varphi + \sqrt{s^2 - d^2}, \quad (32)$$

$$x = L - l \cos \varphi + d. \quad (33)$$

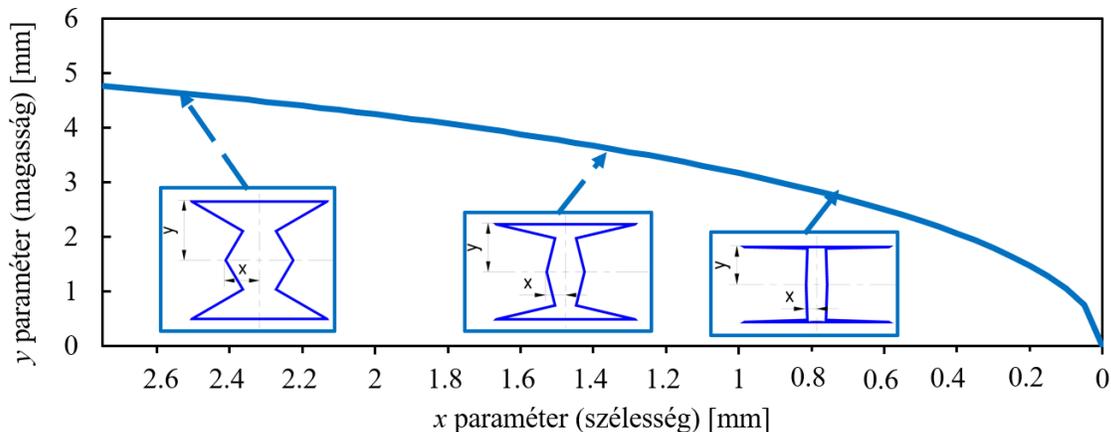
Az *offset* és *deg* paraméter általánosított kapcsolata (30) egyenlet alapján:

$$d = s \cos (\alpha - \varphi). \quad (34)$$

A (32) és (33) számú egyenletek alapján az x - y kapcsolat a következők szerint alakul:

$$y = \sqrt{l^2 + s^2 - 2ls \cos \alpha - (L - x)^2}. \quad (35)$$

A 63. ábra az x - y kapcsolatot ábrázolja, a (35) számú egyenlet alapján a deformálatlan elemi cellától indulva. A diagram egyértelműen mutatja, hogy ahogy a magasság (y) csökken, úgy csökken a szélesség is (x). A 62. ábra jelöléseit használva, az elemi cella magassága y_0 -ról y_1 -re csökken, így φ_0 értéke φ_1 -re csökken. Ahogy a szög értéke csökken, úgy a koszinusz függvény értéke nő, így x_0 értéke x_1 -re csökken. Továbbá, az *offset* paraméter értéke is kisebb lesz (34).



63. ábra. Az y (magasság) és az x (szélesség) méret értékek változása a deformáció hatására a (35) számú egyenlet szerint.

A fentiek tükrében az elemi cella fajlagos deformációja az x és y irányban (36)-(37) pozitív, így a Poisson tényező (38), ami a kereszt- és tengelyirányú fajlagos deformáció negatív hányadosa, szintén negatív.

$$\varepsilon_x = \frac{x_0 - x}{x_0} 100\%. \quad (36)$$

$$\varepsilon_y = \frac{H - y}{H} 100\%, \text{ (ahol } H = y_0). \quad (37)$$

$$\mu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} < 0. \quad (38)$$

Azaz, kijelenthető, hogy az új kettősen homorú szerkezet megőrizte az auxetikus viselkedést.

Az elemi cella kihajlásának vizsgálata

Az elemi cella deformációja nem határok nélküli. Mint ahogy a 62. ábrán is látható, a deformáció előrehaladtával az s hosszúságú élek közelítik a függőleges pozíciót, mely kritikus deformációs állapotnak tekinthető, mivel az auxetikus viselkedés helyett kihajlás léphet fel. Azaz, az analitikus megközelítés két lehetséges deformációs viselkedés meglétét feltételezi.

A kritikus deformációs állapotot leíró x -irányú (x_m) és y -irányú (y_m) deformációk a (39) és (40) egyenlet felhasználásával számíthatók ki:

$$x_m = l \cos \varphi^*, \quad (39)$$

$$y_m = l \sin \varphi^* + s. \quad (40)$$

A kritikus deformációhoz tartozó szögérték (φ^*):

$$\varphi^* = \alpha - 90^\circ. \quad (41)$$

A felírt összefüggésekből látszik, hogy a kritikus deformációs állapot fellépésnek pillanata függ a kiindulási paraméterektől. A kritikusnak ítélt állapotot elért elemi cellák egy függőleges rudat formálnak, melyek nyomó igénybevételnek vannak kitéve. A kérdés az, hogy fellép-e a kihajlás. Euler [158,159] elmélete szerint, az n elemből álló rúd karcsúsági tényezője a következők szerint alakul:

$$\lambda = n(2y_m) \sqrt{\frac{S}{I_{min}}}. \quad (42)$$

Ahol, n a függőleges rudat alkotó elemi cellák száma, S a keresztmetszet, míg I_{min} a minimális tehetetlenségi nyomaték. A minimális tehetetlenségi nyomaték a kritikus deformáció pillanatában értelmezett.

$$S = bw. \quad (43)$$

$$I_{min} = 2 \cdot \left(\frac{1}{12} bw^3 + x_m^2 bw \right). \quad (44)$$

A kihajlás a kritikus karcsúsági tényező ismeretében előre jelezhető:



$$\lambda_g = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}}. \quad (45)$$

Ideálisan rugalmasnak tekintve az anyagot, a 28. ábra alapján az anyagjellemzők tekintetében a kritikus karcsúsági tényező meghatározható:

$$\lambda_g = \pi \sqrt{\frac{13,55}{5,31}} = 5,010. \quad (46)$$

Egy adott paraméterekkel jellemzett mintadarab karcsúsági tényezőjét összevetve a kritikus karcsúsági tényezővel a (47) számú egyenlet alapján determinálható a kihajlás fellépése:

$$\lambda \geq \lambda_g. \quad (47)$$

A kihajlás alapján a nyomóterhelés hatására lép fel. A kritikus terhelő zömítő erő a következő egyenlet alapján számítható:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{min}}{(2ny_m)^2}. \quad (48)$$

A (42) számú egyenletet behelyettesítve (48) számú egyenletbe:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 ES}{\lambda^2}. \quad (49)$$

Azaz, a kritikus erő értéke függ a karcsúsági tényezőtől és a keresztmetszettől.

Az analitikus közelítés során felírt egyenletek eredményeit és a deformációs viselkedésre vonatkozó levonható következtetéseket a 16. táblázatban foglaltam össze.



16. táblázat. A vizsgált minták analitikusan előrejelzett paramétereit, viselkedési mechanizmusait

Specimen no.	1430	1435	1440	1030	1035	1040	0630	0635	0640
φ_0 (°)	30	35	40	30	35	40	30	35	40
d_0 (mm)	1,4	1,4	1,4	1	1	1	0,6	0,6	0,6
l (mm)	4,792	5,066	5,417	4,330	4,578	4,895	3,868	4,089	4,373
s (mm)	2,743	2,326	1,898	2,784	2,360	1,901	2,892	2,491	2,042
α (°)	89,31	87,99	82,47	98,94	99,93	98,26	108,1	111,06	112,9
x_m (mm)	0,708	0,437	0,129	1,223	0,985	0,656	1,798	1,684	1,471
y_m (mm)	2,692	2,149	1,188	3,461	3,117	2,849	4,089	3,960	3,744
ε_y krit	43,40	54,82	75,02	27,24	34,46	40,11	14,05	16,75	21,29
λ	6,197	4,957	2,744	7,914	7,154	6,561	9,245	8,978	8,525
Várt deformációs viselkedés	Kihajlás	Folytonos auxetikususság	Folytonos auxetikususság	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás	Kihajlás

A fenti táblázat szerint belátható, hogy a 0640-1030 elnevezésű mintadarabok kihajlása alacsony deformáció mellett lép fel, míg az 1435 és az 1440 jelzésű mintadarabok esetében nem várható kihajlás. Az analitikus közelítés pontosságát valós zömítési eredményekkel összevetve tudjuk értékelni. A (49) egyenlet alapján a kritikus erő értéke, melynél fellép a kihajlás: $F_{cr} = 153,7$ N.

Az analitikus leírás végeztével fontos megemlítenem, hogy a közelítés kizárólag a lattice szerű viselkedés leírására alkalmas, mivel nem veszi figyelembe az alkotó élek kapcsolatát.



2. Melléklet: Optimumkeresés

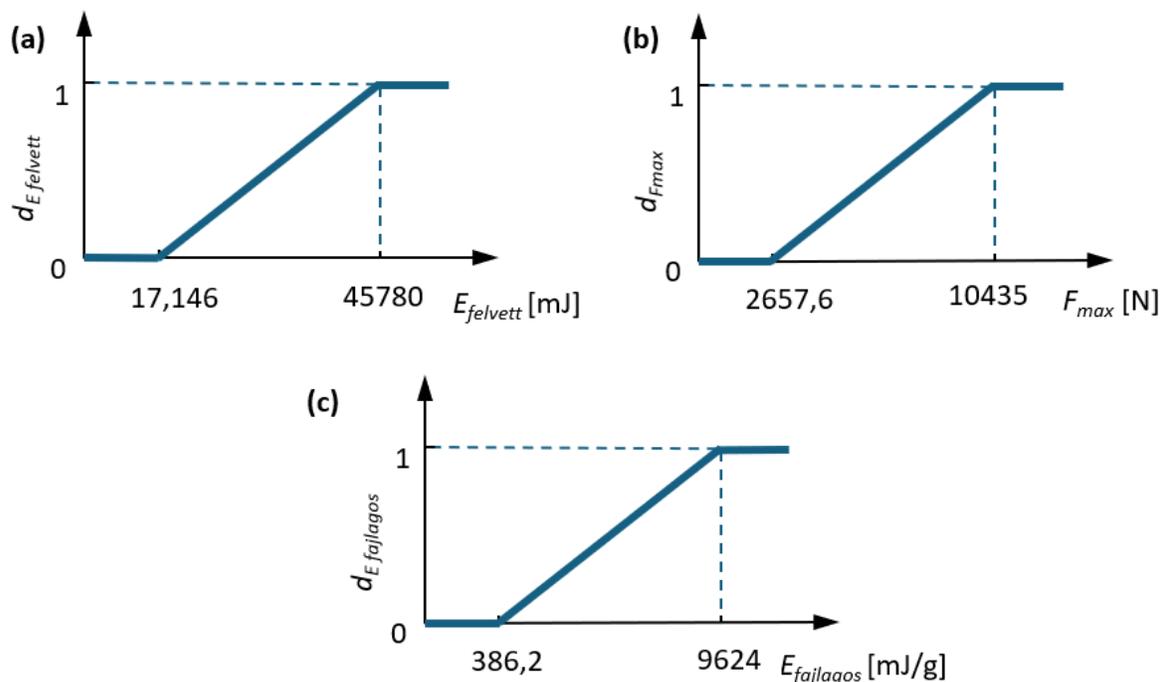
Az optimumkeresés három függvénye:

$$\text{Felvett energia} \rightarrow \text{MAX} \quad (50)$$

$$\text{Fajlagos felvett energia} \rightarrow \text{MAX} \quad (51)$$

$$\text{Zömítési erő} \rightarrow \text{MAX} \quad (52)$$

A három függvény optimuma a kívánatossági függvény módszer felhasználásával határozható meg [160]. A kívánatossági függvény a (0,1) intervallumból vesz fel értéket; minél nagyobb a kívánatossági érték, annál közelebb van az optimumhoz. Vizsgálatomban a kiválasztott kívánatossági függvények a következők: $d_{E_{felvett}}$, $d_{F_{max}}$ és $d_{E_{fajlagos}}$ (64. ábra). A kívánatossági függvény határértékeit a mérések során meghatározott maximum és minimum értékei adják. A függvényeket a 64. ábra ábrázolja.

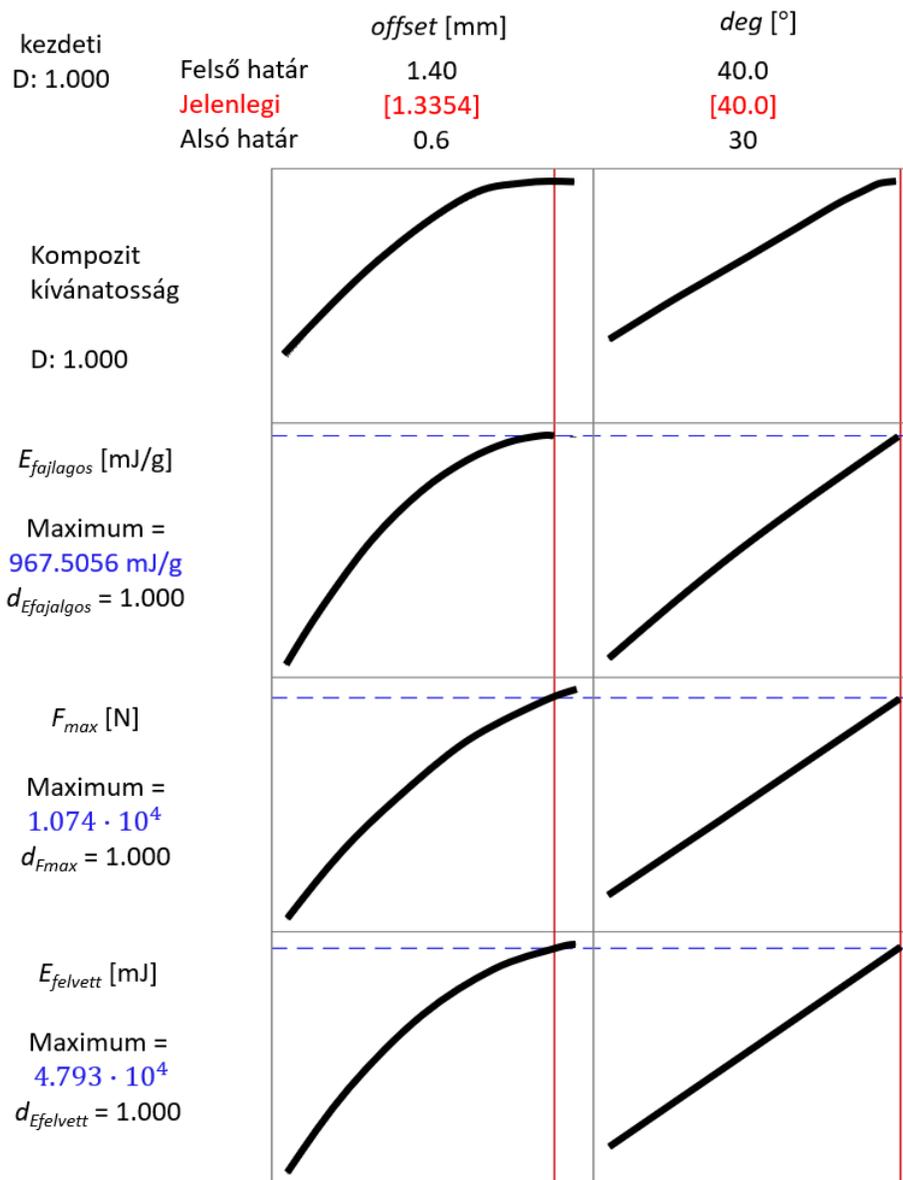


64. ábra. Az optimumkereséshez használt kívánatossági függvények. (a) A felvett energia kívánatossági függvénye; (b) A maximális zömítési erő kívánatossági függvénye; (c) A fajlagos felvett energia kívánatossági függvénye.

A kompozit kívánatossági függvény (D), melynek maximuma alapján megtalálható az optimális geometriai kialakítás, az alábbiak alapján határozható meg:

$$D = \sqrt[3]{d_{E_{felvett}} \cdot d_{F_{max}} \cdot d_{E_{fajlagos}}} \quad (53)$$

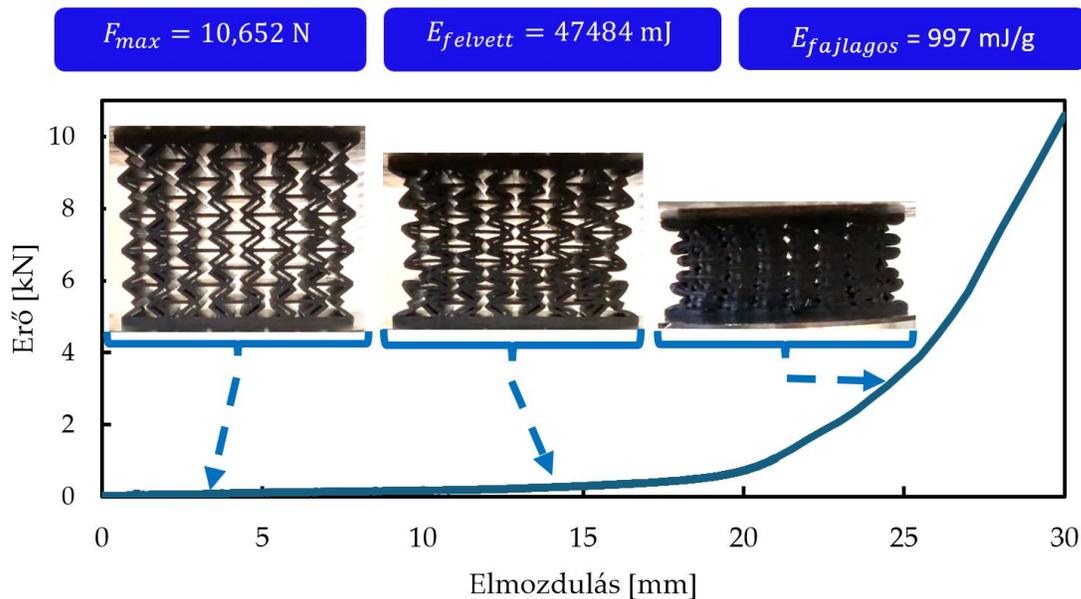
Az előzőekben bemutatott optimum keresési módszer alapján az optimális geometriai paraméterek értékei (a vizsgált tartományon) a következők: $deg = 40^\circ$ és $offset = 1.33$ mm. Az optimális geometriai paraméterekkel jellemzett mintadarab várhatóan a következő mechanikai tulajdonságokkal jellemezhető: $E_{felvett} = 47933$ mJ; $F_{max} = 10741$ N; és $E_{fajlagos} = 967,5$ mJ/g.



65. ábra. Az optimalálás eredménye

A meghatározott optimális geometriai paraméterek (lásd 65. ábra) alapján nyomtattam egy mintadarabot, melyen zömítő vizsgálatnak vettem alá. A zömítő vizsgálat eredményeit a 66. ábra mutatja, feltüntetve a mért maximális zömítési erőt, felvett energiát és fajlagos felvett energiát.





66. ábra. Az optimális geometria paraméterekkel jellemzett mintadarab zömítési görbéje

A valós zömítővizsgálat eredményei kellően pontosan közelítik az előrejelzett optimális értékeket, továbbá a mintadarab deformációs viselkedése folytonosan auxetikus. Kijelenthető, hogy az új, kettősen homorú méhsejt struktúra rendelkezik optimummal.

12 Disszertációval kapcsolatos publikációk

12.1 Folyóirat közlemények:

- [S1] Széles Levente; Horváth Richárd; Rádics János Péter: Design and Study of Fractal-Inspired Metamaterials with Equal Density Made from a Strong and Tough Thermoplastic
POLYMERS 15 12 p. 2650. (2023); <https://doi.org/10.3390/polym15122650>
Lektorált külföldi folyóirat IF:5.0 (Q1 – Chemistry, Polymers and Plastics)
- [S2] Széles Levente; Horváth Richárd; Cveticanin Livija: Analysis of Mechanical Properties and Parameter Dependency of Novel, Doubly Re-Entrant Auxetic Honeycomb Structures
POLYMERS 16 12 p. 2650. (2024); <https://doi.org/10.3390/polym16172524>
Lektorált külföldi folyóirat IF:4.7 (Q1 – Chemistry, Polymers and Plastics)
- [S3] Széles Levente; Horváth Richárd; Cveticanin Livija: Research on Auxetic Lattice Structure for Impact Absorption in Machines and Mechanisms
MATHEMATICS (2227-7390): 12 13 p. 1983. (2024); <https://doi.org/10.3390/math12131983>
Lektorált külföldi folyóirat IF:2.3 (Q2 - Computer Science, Engineering, Mathematics)
- [S4] Széles Levente; Horváth Richárd; Réger Mihály: Parameter-Independent Deformation Behaviour of Diagonally Reinforced Doubly Re-Entrant Honeycomb
POLYMERS 16 : 21 p. 3082 (2024); <https://doi.org/10.3390/polym16213082>
Lektorált külföldi folyóirat IF:4.7 (Q1 – Chemistry, Polymers and Plastics)
- [S5] Széles Levente; Horváth Richárd: Eltérő elemszám mellett is azonos térfogattal rendelkező fraktál inspirált metaanyagok tervezése és zömítéssel szembeni mechanikai tulajdonságai
Anyagvizsgálók lapja, Lektorált magyar folyóirat

12.2 Konferencia kiadványok:

- [S6] Széles Levente, Rádics János Péter: Általános 3D nyomtatási tervezési irányelvek kidolgozása, egy meglévő gyártórendszer fejlesztéséhez; *Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság – EMT, XXVIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT 2020 pp. 129-132*
- [S7] Rádics János Péter, Szeles Levente: Investigating The Load-Bearing Capacity Of Additively Manufactured Lattice Structures; *Proceedings of the 35th ECMS International Conference on Modelling and Simulation ECMS 2021; pp. 133-138*
<https://doi.org/10.7148/2021-0133>
- [S8] Széles Levente, Oldal István: Additív gyártástechnológiára tervezett bukósisak végsemleges vizsgálata; *GT3 Innovation; GT3 innovációs konferencia és szakkiallítás, 2022, pp. 14-19*
- [S9] Szalai Marcell; Széles Levente; Kőfalvi Tamás: Auxetikus anyagok vizsgálata hatékonyabb energiafelvevő képesség érdekében; *GT3 Innovation; GT3 innovációs konferencia és szakkiallítás, 2022, pp. 33-38*
- [S10] Szigeti Gréta; Széles Levente; Kőfalvi Tamás: Kerékpárra felszerelhető passzív védelmi gyermekülés fejlesztése; *GT3 Innovation; GT3 innovációs konferencia és szakkiallítás, 2022, pp. 57-62*
- [S11] Széles Levente; Kőfalvi Tamás: Determination of the optimal FEM test environment for the characterization of large deformation Lattice behavior for 2.5 dimensional structures; *ESB 2022; ISBN: 9789634493068, pp. 46-51*
- [S12] Széles Levente; Kőfalvi Tamás: Passzív védelmi rendszer fejlesztése személygépjármű hátsó ülésorának utasai számára; *ESB 2022; ISBN: 9789634493068, pp. 264-269*
- [S13] Széles Levente; Horváth Richárd: The effect of symmetrical horizontal gradient design on a novel lattice structure; *ESB 2023, ISBN: 9789634493594, pp. 200-209*

13 Felhasznált irodalom

- [1] G. SHI, C. GUAN, D. QUAN, D. WU, L. TANG, T. GAO, An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing, *Chinese Journal of Aeronautics* 33 (2020) 1252–1259. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.006>.
- [2] J. ZHU, H. ZHOU, C. WANG, L. ZHOU, S. YUAN, W. ZHANG, A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges, *Chinese Journal of Aeronautics* 34 (2021) 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020>.
- [3] F. Barthelat, Architected materials in engineering and biology: fabrication, structure, mechanics and performance, *International Materials Reviews* 60 (2015) 413–430. <https://doi.org/10.1179/1743280415Y.0000000008>.
- [4] V. Veselago, L. Braginsky, V. Shklover, C. Hafner, Negative Refractive Index Materials, *J Comput Theor Nanosci* 3 (2006) 189–218. <https://doi.org/10.1166/jctn.2006.3000>.
- [5] A. Askari, M. Jamalzadeh, A Comprehensive Review of the Computational Methods for Determining the Mechanical Behavior of Lattice Metamaterials and Topology Optimization, (n.d.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11087.05284>.
- [6] H. Yin, W. Zhang, L. Zhu, F. Meng, J. Liu, G. Wen, Review on lattice structures for energy absorption properties, *Compos Struct* 304 (2023) 116397. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116397>.
- [7] N.A. Fleck, V.S. Deshpande, M.F. Ashby, Micro-architected materials: past, present and future, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 466 (2010) 2495–2516. <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0215>.
- [8] H. Cho, D. Seo, D.N. Kim, Mechanics of auxetic materials, in: *Handbook of Mechanics of Materials*, Springer Singapore, 2019: pp. 733–757. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6884-3_25.
- [9] M. Shokri Rad, H. Hatami, R. Alipouri, A. Farokhi Nejad, F. Omidinasab, Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures, *Mechanics and Industry* 20 (2019). <https://doi.org/10.1051/meca/2019019>.
- [10] J. Liu, T. Chen, Y. Zhang, G. Wen, Q. Qing, H. Wang, R. Sedaghati, Y.M. Xie, On sound insulation of pyramidal lattice sandwich structure, *Compos Struct* 208 (2019) 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.013>.
- [11] A.H. Reddy, S. Davuluri, D. Boyina, 3D Printed Lattice Structures: A Brief Review, in: *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, IEEE, 2020: pp. 02SAMA10-1-02SAMA10-5. <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309680>.



- [12] C. Wang, Y. Li, W. Zhao, S. Zou, G. Zhou, Y. Wang, Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure, *Int J Mech Sci* 138–139 (2018) 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.032>.
- [13] S. Yin, H. Chen, Y. Wu, Y. Li, J. Xu, Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood, *Compos Struct* 201 (2018) 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.038>.
- [14] A. Spadoni, M. Ruzzene, Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils, *J Mech Mater Struct* 2 (2007) 965–981. <https://doi.org/10.2140/jomms.2007.2.965>.
- [15] S. Wu, P. Sikdar, G.S. Bhat, Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches, *Defence Technology* 21 (2023) 33–61. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.06.007>.
- [16] L. Foster, P. Peketi, T. Allen, T. Senior, O. Duncan, A. Alderson, Application of Auxetic Foam in Sports Helmets, *Applied Sciences* 8 (2018) 354. <https://doi.org/10.3390/app8030354>.
- [17] O. Al-Ketan, R. Rowshan, A.H. Alami, Biomimetic Materials for Engineering Applications, in: *Encyclopedia of Smart Materials*, Elsevier, 2022: pp. 25–34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00019-X>.
- [18] L.J. Gibson, M.F. Ashby, B.A. Harley, *Cellular materials in nature and medicine*, n.d.
- [19] L. Riva, P.S. Ginestra, S. Pandini, C. Pasini, Production and characterization of the Poisson's ratio of cellular structured metamaterials by additive manufacturing, *Procedia CIRP* 110 (2022) 378–382. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.06.067>.
- [20] Y. Zhu, S. Jiang, Q. Zhang, J. Li, C. Yu, C. Zhang, A novel monoclinic auxetic metamaterial with tunable mechanical properties, *Int J Mech Sci* 236 (2022) 107750. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107750>.
- [21] S. Guo, R. Gao, X. Tian, S. Liu, A 3D metamaterial with negative stiffness for six-directional energy absorption and cushioning, *Thin-Walled Structures* 180 (2022) 109963. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109963>.
- [22] D. Sharma, S.S. Hiremath, N.B. Kenchappa, Bio-inspired Ti-6Al-4V mechanical metamaterials fabricated using selective laser melting process, *Mater Today Commun* 33 (2022) 104631. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104631>.
- [23] X. Zhang, X. He, L. Wu, Experimental investigation of thermal architected metamaterials for regulating transient heat transfer, *Int J Heat Mass Transf* 193 (2022) 122960. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122960>.



- [24] W. Sha, M. Xiao, M. Huang, L. Gao, Topology-optimized freeform thermal metamaterials for omnidirectionally cloaking sensors, *Materials Today Physics* 28 (2022) 100880. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100880>.
- [25] L. Zhang, Z. Bai, Y. Chen, Dual-functional hierarchical mechanical metamaterial for vibration insulation and energy absorption, *Eng Struct* 271 (2022) 114916. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114916>.
- [26] W. Jiang, G. Yin, L. Xie, M. Yin, Multifunctional 3D lattice metamaterials for vibration mitigation and energy absorption, *Int J Mech Sci* 233 (2022) 107678. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107678>.
- [27] P. Zhao, K. Zhang, L. Qi, Z. Deng, 3D chiral mechanical metamaterial for tailored band gap and manipulation of vibration isolation, *Mech Syst Signal Process* 180 (2022) 109430. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109430>.
- [28] A. Zolfagharian, M. Bodaghi, R. Hamzehei, L. Parr, M. Fard, B.F. Rolfe, 3D-Printed Programmable Mechanical Metamaterials for Vibration Isolation and Buckling Control, *Sustainability* 14 (2022) 6831. <https://doi.org/10.3390/su14116831>.
- [29] A. Jha, G. Cimolai, I. Dayyani, Crashworthiness and dimensional stability analysis of zero Poisson's ratio Fish Cells lattice structures, *Int J Impact Eng* 184 (2024) 104809. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104809>.
- [30] V.A. Barynin, V.A. Bunakov, A.F. Rasin, V. V Vasiliev, AEROSPACE COMPOSITE LATTICE STRUCTURES, n.d.
- [31] M. Dumas, P. Terriault, V. Brailovski, Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials, *Mater Des* 121 (2017) 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.021>.
- [32] L.J. Gibson, Cellular Solids, *MRS Bull* 28 (2003) 270–274. <https://doi.org/10.1557/mrs2003.79>.
- [33] K.R. Olympio, F. Gandhi, Zero Poisson's Ratio Cellular Honeycombs for Flex Skins Undergoing One-Dimensional Morphing, *J Intell Mater Syst Struct* 21 (2010) 1737–1753. <https://doi.org/10.1177/1045389X09355664>.
- [34] J.S. Jurvelin, J.P.A. Arokoski, E.B. Hunziker, H.J. Helminen, Topographical variation of the elastic properties of articular cartilage in the canine knee, *J Biomech* 33 (2000) 669–675. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00007-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00007-5).
- [35] J. Huang, W. Liu, A. Tang, Effects of fine-scale features on the elastic properties of zero Poisson's ratio honeycombs, *Materials Science and Engineering: B* 236–237 (2018) 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2018.11.005>.



- [36] S. Aggen, *Metals Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys*, ASM International, 2005.
- [37] W. Sas, K. Gabrys, A. Szymański, Determination of Poisson's ratio by means of resonant column tests., *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities* 16 (2013) 1–11.
- [38] K.E. Evans, Auxetic polymers: a new range of materials, *Endeavour* 15 (1991) 170–174. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(91\)90123-S](https://doi.org/10.1016/0160-9327(91)90123-S).
- [39] S.K. Bhullar, Three decades of auxetic polymers: a review, *E-Polymers* 15 (2015) 205–215. <https://doi.org/10.1515/epoly-2014-0193>.
- [40] M. Shokri Rad, H. Hatami, R. Alipouri, A. Farokhi Nejad, F. Omidinasab, Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures, *Mechanics & Industry* 20 (2019) 302. <https://doi.org/10.1051/meca/2019019>.
- [41] K.L. Alderson, A.P. Pickles, P.J. Neale, K.E. Evans, Auxetic polyethylene: The effect of a negative poisson's ratio on hardness, *Acta Metallurgica et Materialia* 42 (1994) 2261–2266. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90304-2](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90304-2).
- [42] J. Li, Y. Wei, H. Wu, X. Shen, M. Yuan, Experimental crushing behavior and energy absorption of angular gradient honeycomb structures under quasi-static and dynamic compression, *Defence Technology* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.02.002>.
- [43] R.P. Bohara, S. Linforth, T. Nguyen, A. Ghazlan, T. Ngo, Anti-blast and -impact performances of auxetic structures: A review of structures, materials, methods, and fabrications, *Eng Struct* 276 (2023) 115377. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115377>.
- [44] R. Lakes, Foam Structures with a Negative Poisson's Ratio, *Science* (1979) 235 (1987) 1038–1040. <https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038>.
- [45] J.B. Choi, R.S. Lakes, Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis, *Int J Fract* 80 (1996) 73–83. <https://doi.org/10.1007/BF00036481>.
- [46] K.W. Wojciechowski, Constant thermodynamic tension Monte Carlo studies of elastic properties of a two-dimensional system of hard cyclic hexamers, *Mol Phys* 61 (1987) 1247–1258. <https://doi.org/10.1080/00268978700101761>.
- [47] K E Evans, B D Caddock, Microporous materials with negative Poisson's ratios. II. Mechanisms and interpretation, *J Phys D Appl Phys* 22 (1989) 1883–1887. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/22/12/013>.
- [48] K.W. Wojciechowski, Two-dimensional isotropic system with a negative poisson ratio, *Phys Lett A* 137 (1989) 60–64. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(89\)90971-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(89)90971-7).



- [49] Z. Wang, H. Hu, Auxetic materials and their potential applications in textiles, *Textile Research Journal* 84 (2014) 1600–1611. <https://doi.org/10.1177/0040517512449051>.
- [50] J.B. Choi, R.S. Lakes, Non-linear properties of polymer cellular materials with a negative Poisson's ratio, *J Mater Sci* 27 (1992) 4678–4684. <https://doi.org/10.1007/BF01166005>.
- [51] D.R. Veronda, R.A. Westmann, Mechanical characterization of skin—Finite deformations, *J Biomech* 3 (1970) 111–124. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(70\)90055-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(70)90055-2).
- [52] L.M. Frolich, M. LaBarbera, W.P. Stevens, Poisson's ratio of a crossed fibre sheath: the skin of aquatic salamanders, *J Zool* 232 (1994) 231–252. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1994.tb01571.x>.
- [53] Y. Li, The anisotropic behavior of Poisson's ratio, Young's modulus, and shear modulus in hexagonal materials, *Physica Status Solidi (a)* 38 (1976) 171–175. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210380119>.
- [54] D.J. Gunton, G.A. Saunders, The Young's modulus and Poisson's ratio of arsenic, antimony and bismuth, *J Mater Sci* 7 (1972) 1061–1068. <https://doi.org/10.1007/BF00550070>.
- [55] A. Yeganeh-Haeri, D.J. Weidner, J.B. Parise, Elasticity of α -Cristobalite: A Silicon Dioxide with a Negative Poisson's Ratio, *Science* (1979) 257 (1992) 650–652. <https://doi.org/10.1126/science.257.5070.650>.
- [56] A. Montazeri, A. Saeedi, E. Bahmanpour, M. Safarabadi, Enhancing the compressive properties of re-entrant honeycombs by line defects with insight from nature, *Mater Today Commun* 38 (2024) 107700. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107700>.
- [57] C. He, P. Liu, A.C. Griffin, Toward Negative Poisson Ratio Polymers through Molecular Design, *Macromolecules* 31 (1998) 3145–3147. <https://doi.org/10.1021/ma970787m>.
- [58] D. Kang, M.P. Mahajan, S. Zhang, R.G. Petschek, C. Rosenblatt, C. He, P. Liu, A.C. Griffin, Pretransitional behavior above the nematic-isotropic phase transition of an auxetic trimer liquid crystal, *Phys Rev E* 60 (1999) 4980–4982. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.60.4980>.
- [59] Andrew Alderson, A triumph of lateral thought, *Chem Ind* 17 (1999) 384–391.
- [60] B.J. Sahariah, A. Namdeo, P. Khanikar, Composite-inspired multilattice metamaterial structure: An auxetic lattice design with improved strength and energy absorption, *Mater Today Commun* 30 (2022) 103159. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103159>.
- [61] C.W. Smith, J.N. Grima, K.E. Evans, A novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams: missing rib foam model, *Acta Mater* 48 (2000) 4349–4356. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00269-X](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00269-X).



- [62] X. Huang, S. Blackburn, Developing a New Processing Route to Manufacture Honeycomb Ceramics with Negative Poisson's Ratio, *Key Eng Mater* 206–213 (2001) 201–204. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.206-213.201>.
- [63] G. Chen, Y. Cheng, P. Zhang, S. Cai, J. Liu, Blast resistance of metallic double arrowhead honeycomb sandwich panels with different core configurations under the paper tube-guided air blast loading, *Int J Mech Sci* 201 (2021) 106457. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106457>.
- [64] F. Arifurrahman, R. Critchley, I. Horsfall, Experimental and numerical study of auxetic sandwich panels on 160 grams of PE4 blast loading, *Journal of Sandwich Structures & Materials* 23 (2021) 3902–3931. <https://doi.org/10.1177/1099636220961756>.
- [65] Y. Zhu, D. Gao, Y. Shao, H. Chen, C. Yu, Q. Wang, A novel prefabricated auxetic honeycomb meta-structure based on mortise and tenon principle, *Compos Struct* 329 (2024) 117782. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117782>.
- [66] J.N. Grima, D. Attard, B. Ellul, R. Gatt, An Improved Analytical Model for the Elastic Constants of Auxetic and Conventional Hexagonal Honeycombs, *Cellular Polymers* 30 (2011) 287–310. <https://doi.org/10.1177/026248931103000602>.
- [67] F. Scarpa, P. Panayiotou, G. Tomlinson, Numerical and experimental uniaxial loading on in-plane auxetic honeycombs, *J Strain Anal Eng Des* 35 (2000) 383–388. <https://doi.org/10.1243/0309324001514152>.
- [68] I.G. Masters, K.E. Evans, Models for the elastic deformation of honeycombs, *Compos Struct* 35 (1996) 403–422. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(96\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00054-2).
- [69] L.L. Hu, H. Deng, Indentation resistance of the re-entrant hexagonal honeycombs with negative poisson's ratio, *Materials Research Innovations* 19 (2015) S1-442-S1-445. <https://doi.org/10.1179/1432891715Z.0000000001588>.
- [70] Y. Prawoto, Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio, *Comput Mater Sci* 58 (2012) 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012>.
- [71] X. Hou, S. Zhou, Z. Cheng, Z. Zhu, Y. Wang, Z. Deng, Buckling of regular and auxetic honeycombs under a general macroscopic stress state in symplectic system, *Appl Math Model* 109 (2022) 318–340. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.04.033>.
- [72] M. Sarafraz, H. Seidi, F. Kakavand, N.S. Viliani, Free vibration and buckling analyses of a rectangular sandwich plate with an auxetic honeycomb core and laminated three-phase polymer/GNP/fiber face sheets, *Thin-Walled Structures* 183 (2023) 110331. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110331>.



- [73] D. Zhu, Y. Wei, X. Shen, K. Yan, M. Yuan, S. Qi, A novel elliptical annular re-entrant auxetic honeycomb with enhanced stiffness, *Int J Mech Sci* 262 (2024) 108732. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108732>.
- [74] Y. Zhu, Y. Luo, D. Gao, C. Yu, X. Ren, C. Zhang, In-plane elastic properties of a novel re-entrant auxetic honeycomb with zigzag inclined ligaments, *Eng Struct* 268 (2022) 114788. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114788>.
- [75] C. Qi, F. Jiang, S. Yang, A. Remennikov, Multi-scale characterization of novel re-entrant circular auxetic honeycombs under quasi-static crushing, *Thin-Walled Structures* 169 (2021) 108314. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108314>.
- [76] X. Zhang, C. An, Z. Shen, H. Wu, W. Yang, J. Bai, Dynamic crushing responses of bio-inspired re-entrant auxetic honeycombs under in-plane impact loading, *Mater Today Commun* 23 (2020) 100918. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100918>.
- [77] K. Zied, M. Osman, T. Elmahdy, Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores, *Physica Status Solidi (b)* 252 (2015) 2685–2692. <https://doi.org/10.1002/pssb.201552164>.
- [78] Z.-X. Lu, X. Li, Z.-Y. Yang, F. Xie, Novel structure with negative Poisson's ratio and enhanced Young's modulus, *Compos Struct* 138 (2016) 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.036>.
- [79] M.-H. Fu, Y. Chen, L.-L. Hu, A novel auxetic honeycomb with enhanced in-plane stiffness and buckling strength, *Compos Struct* 160 (2017) 574–585. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.090>.
- [80] M.-H. Fu, Y. Chen, L.-L. Hu, Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs, *Compos Struct* 175 (2017) 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.007>.
- [81] Y. Chen, M.-H. Fu, Design and modeling of a combined embedded enhanced honeycomb with tunable mechanical properties, *Applied Composite Materials* 25 (2018) 1041–1055. <https://doi.org/10.1007/s10443-017-9650-4>.
- [82] T. Baran, M. Öztürk, In-plane elasticity of a strengthened re-entrant honeycomb cell, *European Journal of Mechanics - A/Solids* 83 (2020) 104037. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2020.104037>.
- [83] H. Jiang, Y. Ren, Q. Jin, G. Zhu, Y. Hu, F. Cheng, Crashworthiness of novel concentric auxetic reentrant honeycomb with negative Poisson's ratio biologically inspired by coconut palm, *Thin-Walled Structures* 154 (2020) 106911. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106911>.



- [84] M.S. Tatlier, M. Öztürk, T. Baran, Linear and non-linear in-plane behaviour of a modified re-entrant core cell, *Eng Struct* 234 (2021) 111984. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111984>.
- [85] R. Jafari Nedoushan, Y. An, W.-R. Yu, New auxetic materials with stretch-dominant architecture using simple trusses, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 30 (2023) 609–625. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.2020940>.
- [86] Z. Chen, J. Li, B. Wu, X. Chen, Y. Min Xie, Enhanced mechanical properties of re-entrant auxetic honeycomb with self-similar inclusion, *Compos Struct* 331 (2024) 117921. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.117921>.
- [87] S. Zhu, J. Hu, X. Tan, B. Wang, S. Chen, L. Ma, Mechanics of sandwich panels with a buckling-dominated lattice core: The effects of the initial rod curvatures, *Compos Struct* 251 (2020) 112669. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112669>.
- [88] E. Etemadi, A.M.M. Zamani, F. Scarpa, M. Zeeshan, M. Hosseinabadi, H. Hu, Modified re-entrant auxetic metamaterials with energy absorption enhancement, *Mater Today Commun* 38 (2024) 108079. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108079>.
- [89] M.-F. Guo, H. Yang, L. Ma, Design and analysis of 2D double-U auxetic honeycombs, *Thin-Walled Structures* 155 (2020) 106915. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106915>.
- [90] K. Meena, S. Singamneni, A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects, *Mater Des* 173 (2019) 107779. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107779>.
- [91] K.M. Bora, S.K. Varshney, C.S. Kumar, Rounded corner thicken strut re-entrant auxetic honeycomb: Analytical and numerical modeling, *Mech Res Commun* 136 (2024) 104246. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2024.104246>.
- [92] R. Jafari Nedoushan, Y. An, W.-R. Yu, M.J. Abghary, Novel triangular auxetic honeycombs with enhanced stiffness, *Compos Struct* 277 (2021) 114605. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114605>.
- [93] W. Zhang, Z. Yan, J. Zhang, H. Wang, F. Han, P. Jiang, T. Wu, Q. Qin, On in-plane crushing behavior of an improved double-arrow auxetic metamaterial with two-step deformation mode, *Eng Struct* 303 (2024) 117482. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117482>.
- [94] A. Seharing, A.H. Azman, S. Abdullah, A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts, *Advances in Mechanical Engineering* 12 (2020) 168781402091695. <https://doi.org/10.1177/1687814020916951>.



- [95] A. Seharing, A.H. Azman, S. Abdullah, A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts, *Advances in Mechanical Engineering* 12 (2020) 168781402091695. <https://doi.org/10.1177/1687814020916951>.
- [96] M. Zhao, F. Liu, H. Zhou, T. Zhang, D.Z. Zhang, G. Fu, Effect of the direction of the gradient on the mechanical properties and energy absorption of additive manufactured Ti-6Al-4 V functionally graded lattice structures, *J Alloys Compd* 968 (2023) 171874. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171874>.
- [97] L. Yang, R. Mertens, M. Ferrucci, C. Yan, Y. Shi, S. Yang, Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and mechanical properties, *Mater Des* 162 (2019) 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.12.007>.
- [98] I. Maskery, N.T. Aboulkhair, A.O. Aremu, C.J. Tuck, I.A. Ashcroft, R.D. Wildman, R.J.M. Hague, A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A* 670 (2016) 264–274. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.013>.
- [99] H.-T. Liu, M.-R. An, In-plane crushing behaviors of a new-shaped auxetic honeycomb with thickness gradient based on additive manufacturing, *Mater Lett* 318 (2022) 132208. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132208>.
- [100] N. Ma, S. Han, Q. Han, C. Li, Design and compressive behaviors of the gradient re-entrant origami honeycomb metamaterials, *Thin-Walled Structures* 198 (2024) 111652. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111652>.
- [101] L.G. Blok, M.L. Longana, H. Yu, B.K.S. Woods, An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites, *Addit Manuf* 22 (2018) 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039>.
- [102] P. Parandoush, D. Lin, A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites, *Compos Struct* 182 (2017) 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
- [103] D. Yavas, Q. Liu, Z. Zhang, D. Wu, Design and fabrication of architected multi-material lattices with tunable stiffness, strength, and energy absorption, *Mater Des* 217 (2022) 110613. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110613>.
- [104] S. Li, J.-S. Yang, R. Schmidt, L.-Z. Wu, K.-U. Schröder, Compression and hysteresis responses of multilayer gradient composite lattice sandwich panels, *Marine Structures* 75 (2021) 102845. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102845>.
- [105] B.J. Ramirez, U. Misra, V. Gupta, Viscoelastic foam-filled lattice for high energy absorption, *Mechanics of Materials* 127 (2018) 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2018.08.011>.



- [106] H. Taghipoor, A. Eyvazian, F. Musharavati, T.A. Sebaey, A. Ghiaskar, Experimental investigation of the three-point bending properties of sandwich beams with polyurethane foam-filled lattice cores, *Structures* 28 (2020) 424–432. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.082>.
- [107] G. Zhang, B. Wang, L. Ma, L. Wu, S. Pan, J. Yang, Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels, *Compos Struct* 108 (2014) 304–310. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.040>.
- [108] D. Tomlinson, A. Fam, Axial response of flax fibre reinforced polymer-skinned tubes with lightweight foam cores and bioresin blend, *Thin-Walled Structures* 155 (2020) 106923. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106923>.
- [109] L. Wang, W. Liu, Y. Fang, L. Wan, R. Huo, Axial crush behavior and energy absorption capability of foam-filled GFRP tubes manufactured through vacuum assisted resin infusion process, *Thin-Walled Structures* 98 (2016) 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.004>.
- [110] A. Baroutaji, M. Sajjia, A.-G. Olabi, On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, *Thin-Walled Structures* 118 (2017) 137–163. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.05.018>.
- [111] R.D. Hussein, D. Ruan, G. Lu, I. Sbarski, Axial crushing behaviour of honeycomb-filled square carbon fibre reinforced plastic (CFRP) tubes, *Compos Struct* 140 (2016) 166–179. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.064>.
- [112] G. Gao, Y. Hu, H. Jia, P. Liu, P. Du, D. Xu, Acoustic and dielectric properties of epoxy resin/hollow glass microsphere composite acoustic materials, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 135 (2019) 109105. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2019.109105>.
- [113] S. Black, A. Tzagiollari, S. Mondal, N. Dunne, D.B. MacManus, Mechanical behaviour of gel-filled additively-manufactured lattice structures under quasi-static compressive loading, *Mater Today Commun* 35 (2023) 106164. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106164>.
- [114] A.S. Chahar, P. Pal, Study on various properties of reinforced concrete – A review, *Mater Today Proc* 65 (2022) 597–602. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.193>.
- [115] Z.-M. Yang, J. Chen, F. Wang, J. Wang, Seismic performance of circular concrete-filled steel tube columns reinforced with inner latticed steel angles, *J Constr Steel Res* 205 (2023) 107908. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107908>.
- [116] Y.-S. Liu, X.-H. Zhou, Y.-H. Wang, Y. Zhou, Y.-S. Lan, Q. Li, Seismic behavior of prestressed concrete filled steel tubular lattice tower subjected to combined compression-bending-torsion, *J Constr Steel Res* 204 (2023) 107883. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107883>.



- [117] L. Yang, H. Fang, H. Xie, B. Li, Compressive behaviour of concrete-filled multi-cell GFRP pultruded square columns reinforced with lattice-webs, *Eng Struct* 279 (2023) 115584. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115584>.
- [118] M.J. Prajapati, A. Kumar, S.-C. Lin, J.-Y. Jeng, Multi-material additive manufacturing with lightweight closed-cell foam-filled lattice structures for enhanced mechanical and functional properties, *Addit Manuf* 54 (2022) 102766. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102766>.
- [119] M.J. Prajapati, A. Kumar, S.-C. Lin, J.-Y. Jeng, Reducing mechanical anisotropy in material extrusion process using bioinspired architected lattice structures, *Addit Manuf* 66 (2023) 103480. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103480>.
- [120] W.A. Chapkin, D.L. Simone, G.J. Frank, J.W. Baur, Mechanical behavior and energy dissipation of infilled, composite Ti-6Al-4V trusses, *Mater Des* 203 (2021) 109602. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109602>.
- [121] A. Bandyopadhyay, B. Heer, Additive manufacturing of multi-material structures, *Materials Science and Engineering: R: Reports* 129 (2018) 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.04.001>.
- [122] T.S. Lumpe, J. Mueller, K. Shea, Tensile properties of multi-material interfaces in 3D printed parts, *Mater Des* 162 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.024>.
- [123] V.S. Deshpande, M.F. Ashby, N.A. Fleck, Foam topology: bending versus stretching dominated architectures, *Acta Mater* 49 (2001) 1035–1040. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00379-7).
- [124] J.C. Maxwell, L. *On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 27 (1864) 294–299. <https://doi.org/10.1080/14786446408643668>.
- [125] E. Chen, S. Luan, S. Gaitanaros, On the compressive strength of brittle lattice metamaterials, *Int J Solids Struct* 257 (2022) 111871. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111871>.
- [126] C. de Jonge, H. Kolken, A. Zadpoor, Non-Auxetic Mechanical Metamaterials, *Materials* 12 (2019) 635. <https://doi.org/10.3390/ma12040635>.
- [127] M.A. Wagner, T.S. Lumpe, T. Chen, K. Shea, Programmable, active lattice structures: Unifying stretch-dominated and bending-dominated topologies, *Extreme Mech Lett* 29 (2019) 100461. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100461>.
- [128] M. Al Nashar, A. Sutradhar, Design of Hierarchical Architected Lattices for Enhanced Energy Absorption, *Materials* 14 (2021) 5384. <https://doi.org/10.3390/ma14185384>.



- [129] R. Zhong, M. Fu, X. Chen, B. Zheng, L. Hu, A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression-torsion properties, *Compos Struct* 226 (2019) 111232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111232>.
- [130] L. Wang, H.-T. Liu, 3D compression–torsion cubic mechanical metamaterial with double inclined rods, *Extreme Mech Lett* 37 (2020) 100706. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100706>.
- [131] B.-B. Zheng, R.-C. Zhong, X. Chen, M.-H. Fu, L.-L. Hu, A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect, *Mater Des* 171 (2019) 107700. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107700>.
- [132] H.A. AlQaydi, K. Krishnan, J. Oyebanji, D.W. Lee, S.A. Alneyadi, N. Ghisi, L. Kindleyside, N.T. Aboulkhair, Hybridisation of AlSi10Mg lattice structures for engineered mechanical performance, *Addit Manuf* 57 (2022) 102935. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102935>.
- [133] X. Yang, Q. Yang, Y. Shi, L. Yang, S. Wu, C. Yan, Y. Shi, Effect of volume fraction and unit cell size on manufacturability and compressive behaviors of Ni-Ti triply periodic minimal surface lattices, *Addit Manuf* 54 (2022) 102737. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102737>.
- [134] Z. Xiao, Y. Yang, R. Xiao, Y. Bai, C. Song, D. Wang, Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting, *Mater Des* 143 (2018) 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.023>.
- [135] M. Bolan, M. Dean, A. Bardelcik, The Energy Absorption Behavior of 3D-Printed Polymeric Octet-Truss Lattice Structures of Varying Strut Length and Radius, *Polymers (Basel)* 15 (2023) 713. <https://doi.org/10.3390/polym15030713>.
- [136] M.M. Osman, M. Shazly, E.A. El-Danaf, P. Jamshidi, M.M. Attallah, Compressive behavior of stretched and composite microlattice metamaterial for energy absorption applications, *Compos B Eng* 184 (2020) 107715. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107715>.
- [137] L.H. Olivas-Alanis, A.A. Fraga-Martínez, E. García-López, O. Lopez-Botello, E. Vazquez-Lepe, E. Cuan-Urquizo, C.A. Rodriguez, Mechanical Properties of AISI 316L Lattice Structures via Laser Powder Bed Fusion as a Function of Unit Cell Features, *Materials* 16 (2023) 1025. <https://doi.org/10.3390/ma16031025>.
- [138] K.-M. Park, K.-S. Min, Y.-S. Roh, Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements, *Materials* 15 (2021) 97. <https://doi.org/10.3390/ma15010097>.
- [139] E. Truskiewicz, A. Thalhamer, M. Rossegger, M. Vetter, G. Meier, E. Rossegger, P. Fuchs, S. Schlögl, M. Berer, Mechanical behavior of 3D-printed polymeric



- metamaterials for lightweight applications, *J Appl Polym Sci* 139 (2022). <https://doi.org/10.1002/app.51618>.
- [140] International Organization for Standardization, Determination of Tensile Properties—Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics ISO 527-2:2012, 2012.
- [141] P.I. Braileanu, A. Calin, T.G. Dobrescu, N.-E. Pascu, Comparative Examination of Friction Between Additive Manufactured Plastics and Steel Surface, *Materiale Plastice* 60 (2023) 48–57. <https://doi.org/10.37358/MP.23.3.5675>.
- [142] F. Van De Velde, P. De Baets, The friction and wear behaviour of polyamide 6 sliding against steel at low velocity under very high contact pressures, *Wear* 209 (1997) 106–114. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07500-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07500-X).
- [143] 3D Systems - DuraForm ProX Pa adatlap - <https://www.3dsystems.com/materials/duraform-prox-pa-sls>, (n.d.).
- [144] A. Lindberg, J. Alfthan, H. Pettersson, G. Flodberg, L. Yang, Mechanical performance of polymer powder bed fused objects – FEM simulation and verification, *Addit Manuf* 24 (2018) 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.009>.
- [145] Clifford Pickover, *The Math Book: From Pythagoras to the 57th Dimension, 250 Milestones in the History of Mathematics*, Sterling Publishing Company, Inc, 2009.
- [146] J.W. Cannon, B.B. Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature., *The American Mathematical Monthly* 91 (1984) 594. <https://doi.org/10.2307/2323761>.
- [147] R.N. Goldman, S. Schaefer, D. Levin, R. Goldman, Subdivision Schemes and Attractors. Subdivision Schemes and Attractors, 2005. <https://www.researchgate.net/publication/221316579>.
- [148] M. Majewski, A tutorial on the realistic visualization of 3D Sierpinski fractals, *Comput Graph* 22 (1998) 129–142. [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(97\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(97)00088-5).
- [149] Armin Bunde, Shlomo Havlin, *Fractals in Science*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1994. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77953-4>.
- [150] B. Ghanbarian-Alavijeh, H. Millán, G. Huang, A review of fractal, prefractal and pore-solid-fractal models for parameterizing the soil water retention curve, *Can J Soil Sci* 91 (2011) 1–14. <https://doi.org/10.4141/cjss10008>.
- [151] Photocentric UV DLP Firm műgyanta terméklap - <https://photocentricgroup.com/product/uv-dlp-firm-resin/>, (n.d.).
- [152] Resione F69 műgyanta termék lap - <https://www.resione.com/products/f69-black-flexible-rubber-like-3d-printer-resin->

1kg?srsltid=AfmBOooNoDcUHoOaOTF18Eptx0t3OWDtGJSLOXUdfWJZszD3nuo87HAj,
(n.d.).

- [153] M. Mooney, A Theory of Large Elastic Deformation, J Appl Phys 11 (1940) 582–592. <https://doi.org/10.1063/1.1712836>.
- [154] Large elastic deformations of isotropic materials IV. further developments of the general theory, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 241 (1948) 379–397. <https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0024>.
- [155] R. Keerthiwansa, J. Javorik, J. Kledrowetz, P. Nekoksa, Elastomer testing: the risk of using only uniaxial data for fitting the Mooney-Rivlin hyperelastic-material model, Materiali in Tehnologije 52 (2018) 3–8. <https://doi.org/10.17222/mit.2017.085>.
- [156] Mechanics of Solid Polymers, Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-15493-1>.
- [157] Y. Zhang, L.-H. Ma, H.-Q. Xu, W. Zhou, A novel anti-missing-rib lozenge lattice metamaterial with enhanced mechanical properties, Mater Today Commun 38 (2024) 108151. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108151>.
- [158] L. Euler, R. Daudet, F.P.J.I. Delamonce, B. Dibner, Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive, Solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti, Apud Marcum-Michaelem Bousquet & Socios, Genevæ, 1744. <https://doi.org/10.5479/sil.318525.39088000877480>.
- [159] Robert M. Jones, Buckling of bars, plates, and shells, Bull Ridge Publishing, Blacksburg, Va., 2006.
- [160] Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson-Cook, Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 4th ed., 2016.