

SZAKDOLGOZAT

Szabó Krisztofer
Mechatronikai mérnöki BSc

Gödöllő
2025



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Mechatronikai mérnöki BSc szak

Meta-anyag vizsgálat szimulációs eszközökkel

Belső konzulens: Dr. Pataki Tamás István
egyetemi docens

Készítette: **Szabó Krisztofer**
CNM9LF
Mechatronikai mérnöki,
nappali

Intézet/Tanszék: Műszaki Intézet

Gödöllő
2025

Tartalom

1.	Bevezetés.....	1
1.1.	A meta-anyagok jelentősége és alkalmazási területei	1
1.2.	Célkitűzés	1
2.	Szakirodalom feldolgozása	2
2.1.	Meta-anyagok elméleti áttekintése	2
2.1.1.	Történeti áttekintés	2
2.2.	A meta-anyagok főbb típusai	3
2.2.1.	Elektromágneses meta-anyagok	3
2.2.2.	Akusztikus meta-anyagok	5
2.2.3.	Termikus meta-anyagok	6
2.2.4.	Mechanikai és szerkezeti meta-anyagok	8
2.3.	Elméleti alapelvek a meta-anyag szerkezetek mögött.....	11
2.3.1.	Elektromágneses elvek	11
2.3.2.	Topológiai és geometriai optimalizáció	12
2.3.3.	Dinamikus és programozható viselkedés	12
2.3.4.	Mechanikai elvek	12
2.4.	Meta-anyagok mikroszerkezetének modellezési módszerei	14
2.4.1.	Rács alapú modellezés	14
2.4.2.	Origami alapú modellezés	15
2.4.3.	A modellezési módszerek összehasonlítása	17
2.5.	Meta-anyagok gyártási technológiái	17
2.5.1.	Additív gyártás (3D nyomtatás)	17
2.5.2.	Fotolitográfia	20
2.6.	Meta-anyagok szimulációja és modellezése	21
2.6.1.	A szimuláció szerepe a meta-anyagok tervezésében.....	21
2.6.2.	A numerikus modellezés (lehetőségei és kihívásai).....	22
2.6.3.	Szimulációs szoftverek és eszközök (COMSOL, CST, Ansys HFSS)	22
2.7.	A meta-anyagok fejlődési irányai és jövőbeli lehetőségek	23
2.8.	Összefoglalás.....	23
3.	Anyag és módszertan	25

3.1.	Modellek és geometriai felépítés.....	25
3.2.	Anyagjellemzők	28
3.3.	Hálózás (Mesh)	28
4.	Elvégzett szimulációk típusai és közös peremfeltételeik	29
5.	Eredmények és kiértékelés	31
5.1.	Felületnyomás	31
5.1.1.	Elmozdulás-vezérelt szimuláció.....	32
5.1.2.	Erő-vezérelt szimuláció.....	35
5.2.	Saroknyomás	38
5.2.1.	Elmozdulás-vezérelt szimuláció.....	40
5.2.2.	Erő-vezérelt szimuláció.....	42
5.3.	Modal és Harmonic response rezgésvizsgálatok.....	44
5.3.1.	Modal Analysis	45
5.3.2.	Harmonic Response.....	46
6.	Összefoglalás.....	49
7.	Summary	50
8.	Nyilatkozat	51
9.	Irodalomjegyzék.....	56

1. Bevezetés

1.1. A meta-anyagok jelentősége és alkalmazási területei

A meta-anyagra úgy tekinthetünk, mint egy mesterségesen felépített anyagra. Míg a természet atomokat használ az anyagok felépítésére, addig a meta-anyagokat olyan szabályosan kialakított mikro- és nanoszerkezetek hozzák létre, amelyek az alapanyagtól függetlenül különleges tulajdonságokat biztosítanak. Tekintettel a szinte végtelen számú lehetőségre a szerkezetek terén, rendkívüli tervezési rugalmasság áll fent, amelyet a korszerű gyártási technológiák, mint például a litográfiás eljárások és a fejlett 3D nyomtatási technikák is elősegítenek. Ezen különleges szerkezeteknek köszönhetően olyan abnormális tulajdonságok érhetőek el, amelyek a természetes anyagoknál nem találhatók meg, ez számos problémára jelenthet megoldást. Ezek az ember által tervezett anyagok kiemelkedő tulajdonságokat mutattak az elektromágneses, a termodinamika, az akusztika és a mechanika területén.

Nem található olyan iparág, ahol a meta-anyagok fejlődése ne bírna forradalmasító hatással. Az orvostudományban új meta-anyagok lehetővé tehetik az ultrahangos hullámok áthaladását olyan területeken, ahol korábban ez nem volt lehetséges, ezáltal biztonságosabb, sugárzásmentes képalkotási módszerek fejlődhetnek. Jobb protézisekre és implantátumokra jelenthet megoldást. Az elektromágneses hullámok precízebb irányításával gyorsabb és hatékonyabb vezeték nélküli kommunikáció jöhet létre. Speciális hőelnyelő és vezető meta-anyagok számos energiahatékonysági, fenntarthatósági problémára jelenthetnek megoldást. Ütésálló és ultrakönnyű szerkezetek hozhatóak létre velük, valamint hangszigetelésre és rezgéscsillapításra is rendkívül kedvező megoldást nyújthatnak. És ez mind csak a kezdet, a meta-anyagok fejlődésébe számos lehetőség rejlik, ezért is tartom fontosnak a vizsgálatukat.

1.2. Célkitűzés

Olyan szerkezeti kialakítások meghatározása és vizsgálata, amelyek kiemelkedő rezgéscsillapító, hangszigetelő és hangcsillapító hatásokkal rendelkeznek. Ennek érdekében különböző struktúrák keresése és alkalmazásának értékelése szimulációs és modellezési módszerek, valamint esetleges kísérleti mérések segítségével. A fő cél annak meghatározása, hogy az egyes struktúrák milyen mértékben képesek ezen nem kívánt hatások csökkentésére.

2. Szakirodalom feldolgozása

2.1. Meta-anyagok elméleti áttekintése

A mélyebb és átfogóbb áttekintés érdekében az irodalom feldolgozásom ezen részét egy rövid történelmi áttekintéssel kezdem.

2.1.1. Történelmi áttekintés

Az anyagok tulajdonságainak mesterséges szintetizálására tett legkorábbi kísérletek több, mint egy évszázadra nyúlnak vissza. Az elektromágneses tulajdonságok manipulálásának vizsgálata egészen Bose 1898-as és Lindman 1914-es úttörő munkásságáig vezethető vissza [1].

Korábban még csak „bal kezű anyagokként” (LHM) emlegetett koncepciót először Vaselago, orosz kutató vetette fel 1968-ban még csak elméleti síkon. Úgy vélte, hogy léteznek olyan anyagok, amelyek egyszerre rendelkeznek negatív permeabilitással és permittivitással is. A permeabilitás (μ) egy fizikai mennyiség, amely egy anyag mágneses térre adott válaszát írja le. Azt mutatja meg, hogy az adott anyag mennyire engedi át magán a mágneses mezőt, vagyis mennyire képes azt „vezetni” vagy felerősíteni. A permittivitás (ϵ) pedig egy anyag elektromos térrel szembeni viselkedését írja le, azt mutatja meg, hogy az adott anyag mennyire képes tárolni az elektromos energiát. Ha mindkettő értéke negatív, akkor az anyag a mágneses és elektromos térre szokatlan módon reagál: a hullám elektromos és mágneses komponensei ellentétes fázisban változnak, így az elektromágneses hullám terjedése az anyagban fordított irányú lehet, és a törésmutató negatívvá válik. Ezzel Vaselago elméletileg megjósolta a negatív törésmutatójú anyagok létezését. Jelentős áttörés következett be 1999-ben, amikor is John Pendry meghatározott egy gyakorlati módszert a koncepció kifejlesztésére, a „split-ring” rezonátor (SRR) struktúrát, amelynek köszönhetően ezen anyagok nem követik a szokványos jobbkezes-szabályt, amely a vezetőben folyó áram és a keletkező mágneses mező iránya közötti kapcsolatot adja meg. Ennek következtében a mágneses polarizáció iránya ellentétes a hagyományos anyagokban megszokottól. Ez a felfedezés megnyitotta az utat a negatív permeabilitást és permittivitást egyszerre mutató anyagok kifejlesztéséhez. Másik jelentős előrelépést jelentett, amikor a University of California, San Diego (UCSD) egyetem kutatói, többek között Smith 2001-ben bemutatott egy új, ezen tulajdonságokkal rendelkező LHM-t,

amely huzal és SRR tömbökből épült fel, és kísérleti vizsgálatokat végzett annak egyedi jellemzőinek tesztelésére [1], [2].

Ezek az áttörések lehetővé tették a szokatlan elektromágneses tulajdonságokkal rendelkező meta-anyagok kifejlesztését, amely széleskörű alkalmazásukhoz vezetett különféle területeken, mint például az orvostudományban, az autópiparban, a repülőgépiparban és a védelmi szektorban is.

A meta-anyagok területén azonban az igazi áttörést az additív gyártási technológiák hozták meg, amely lehetővé tette ezen szerkezetek rétegenkénti felépítését, amelyeknek köszönhetően különleges tulajdonságok érhetőek el mind az elektromágneses, a hőátvitel, az akusztika és a mechanika területén.

2.2. A meta-anyagok főbb típusai

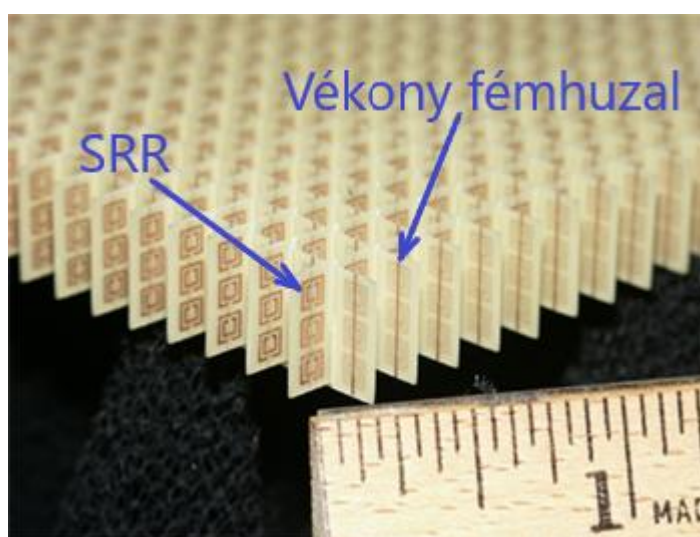
A korábban emlegetett szinte végtelen számú különböző kialakítású nanoszerkezeteknek köszönhetően különböző tulajdonságú meta-anyagok hozhatóak létre, meghatározott célokkal. Ezen tulajdonságok alapján különböző osztályokba sorolhatóak ezek a mesterséges anyagok. A következő fejezetben ezeket fogom részletezni.

2.2.1. Elektromágneses meta-anyagok

A természetes anyagok elektromágneses tulajdonságai az atomok elrendezésének fizikai korlátjai miatt nem eléggé rugalmasak ahhoz, hogy pontosan manipulálni tudják az elektromágneses hullámokat. Azonban a periodikus vagy kvázi periodikus egységcellákból felépülő meta-anyagok meghaladják ezt a korlátot, utat nyitva az elektromágneses hullámok manipulálása felé. Az egységcellák geometriai alakjának, méretének és térbeli elrendezésének megváltoztatásával módosítható a meta-anyag elektromágneses válasza, lehetővé téve az elektromágneses hullámok sugárzásának, szórásának és terjedésének igénye szerinti irányítását [3].

Ezen anyagok egyik fő jellemzője, hogy negatív áteresztőképességgel és negatív vagy nagyon magas permeabilitással rendelkeznek, különösen a rádió- és mikrohullámú frekvenciatartományban, amelynek köszönhetően képesek befolyásolni az elektromágneses hullámokat [4].

Az elektromágneses meta-anyagok gyakori építőelemei közé tartoznak a „split-ring” rezonátorok (SRR) és vékony huzaltömbök. A SRR-ek hézagokkal rendelkező gyűrűkből állnak, amelyek meghatározott frekvencián rezonálnak, negatív permeabilitást hozva létre. Rácsos szerkezetben elhelyezett vékony fémhuzalok segítségével negatív permittivitás érhető el. Ezen vékony huzaltömbök SRR-ekkel való kombinálásával olyan kettős negatív meta-anyag hozható létre, amely egyszerre mutat negatív permittivitást és permeabilitást is [2], [4]. A szerkezeti felépítésére az 1. ábrán látható egy példa.



1. ábra

SRR és vékony fémhuzal kombinációjából felépülő elektromágneses meta-anyag szerkezete (forrás: By Jeffrey.D.Wilson@nasa.gov (Glenn research contact) - NASA Glenn Research, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7455771>)

Gyakoriak még a csavar vagy spirál szerkezetű kialakítások. Központi hengeres vagy kúpos mag köré tekert vezető spirálokból állnak, amelyet szigetelő réteg választ el. Ezen szerkezeti kialakításnak köszönhetően irányított hullámterjedés érhető el [4].

Az elektromágneses meta-anyagok egy gyorsan fejlődő területet képviselnek, és jelentős potenciállal rendelkeznek a jövő technológiai fejlesztéseiben, beleértve a telekommunikációt, az orvosi képalkotást és a védelmi ipart. Számos alkalmazási lehetősége van, kezdve a tökéletes lencsétől, a láthatatlan köpenyeken és antennákon át a különböző típusú érzékelőkig [2], [4].

2.2.2. Akusztikus meta-anyagok

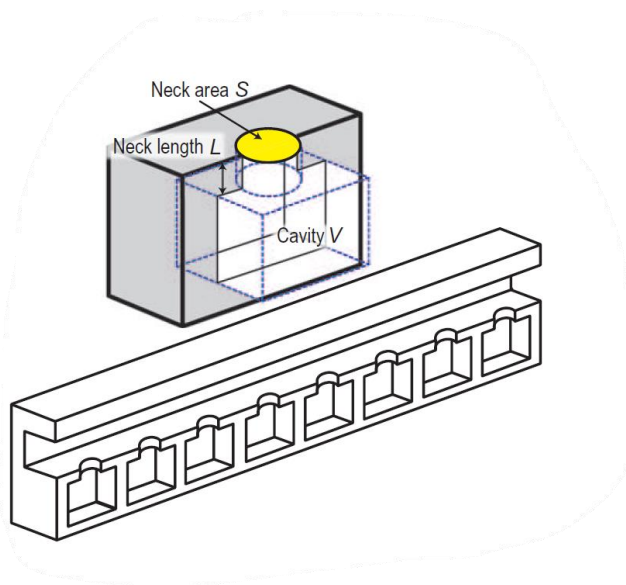
Az akusztikus meta-anyagok olyan tervezett anyagok, amelyek olyan módon képesek a hanghullámokat manipulálni, ami a hagyományos anyagok hátárain túlmutat. Ezt a hullámhossznál kisebb, jellemzően rezonátorokból álló szerkezetük révén érik el, amelyek lehetővé teszik az olyan jelenségek megjelenését, mint például a negatív tömegsűrűség, a negatív rugalmassági modulusz, a zérus törésmutató vagy ezek együttes előfordulását, a kettős negativitást [5], [6].

Ezek a tulajdonságok lehetővé tesznek olyan alkalmazásokat, mint a hangszigetelés, abszorpció, álcázás, valamint akusztikus fókuszálás [7].

Ezen mesterséges anyagok két fő csoportra bonthatóak, passzív és aktív akusztikus meta-anyagok. A passzív meta-anyagok rögzített szerkezeti kialakításokon alapulnak, míg az aktív meta-anyagok külső ingerforrások révén, mint például piezoelektromosság, mechanikai nyomás, folyadékkal való feltöltés vagy a hőmérséklet változtatásával lehetővé teszik az akusztikus tulajdonságok, mint például az impedancia, a rezonanciafrekvencia vagy az elnyelés valós idejű hangolását [7], [5].

A passzív akusztikus meta-anyagok rezonancia mechanizmusokra támaszkodnak a kívánt hatások eléréséhez, gyakran olyan szerkezeteket alkalmazva, mint a Helmholtz-rezonátorok, membránrezonátorok és a labirintusszerű, úgynevezett „tér-tekerceselő” (space-coiling) kialakítások [5], [7], [8].

A Helmholtz-rezonátorok keskeny nyakú üregekből állnak, amelyek rugó-tömeg rendszerként viselkednek, negatív térfogati moduluszt hozva létre. A nyakban lévő folyadék effektív rezgő tömegként, míg a kamratestben található folyadék effektív rugóként működik [7]. A szerkezeti felépítésére a 2. ábrán látható egy példa.



2. ábra

Helmholtz-rezonátorok sorozata

(forrás: Ji, Guosheng, and John Huber. "Recent progress in acoustic metamaterials and active piezoelectric acoustic metamaterials-a review." Applied Materials Today 26 (2022): 101260.)

A rezonancia alatti tartományban negatív effektív sűrűség érhető el, rugalmas membránok keresztirányú elhelyezésével egy hullámvezetőben [6].

Ígéretes tulajdonságaik ellenére, számos kihívással néznek szembe ezen koncepciók, mint például a szűk működési frekvenciatartomány, a komplex szerkezeti összetettség és törékenység. Az aktív akusztikus meta-anyagok azonban a hangolható tulajdonságaiknak köszönhetően kezelni tudják ezen a problémák nagy részét, de újabb kihívások elé nézve. Fejlett gyártási technikákat, valamint érzékelő- és vezérlőrendszerek integrációját igénylik [7].

Ahogy a kutatás halad előre, az akusztikus meta-anyagok forradalmasíthatják az építészetet, a városi zajcsökkentést, az orvosi képalkotást és a víz alatti akusztikát is, példátlan kontrollt biztosítva a hanghullámok felett.

2.2.3. Termikus meta-anyagok

A mindennapi életünk jelentős részében megjelenik a hőenergia, akárcsak abból kiindulva, hogy a legtöbb energia végül hő formájában kerül kibocsátásra a környezetbe. Ezért a hő tetszés

szerinti manipulálása nem csak tudományos jelentőséggel, hanem fontos gyakorlati alkalmazási értékkel is bír. Általánosságban elmondható, hogy a termodinamikai jelenségek passzívan leírhatóak a termodinamika négy híres törvénye által. Ezen jelenségeket nehéz aktívan irányítani, mivel a természetben előforduló anyagok termodinamikai tulajdonságai rögzítettek. Azonban gondosan megtervezett mesterséges struktúrákkal a hőátadás megközelítőleg tetszés szerint manipulálható [9].

Ezen anyagok statikus és dinamikus típusokra oszthatóak. Alkalmazásaik pedig az energiahatékony hűtéstől, az elektronikai eszközök védelmén át a fenntartható infrastruktúrákig terjednek [10].

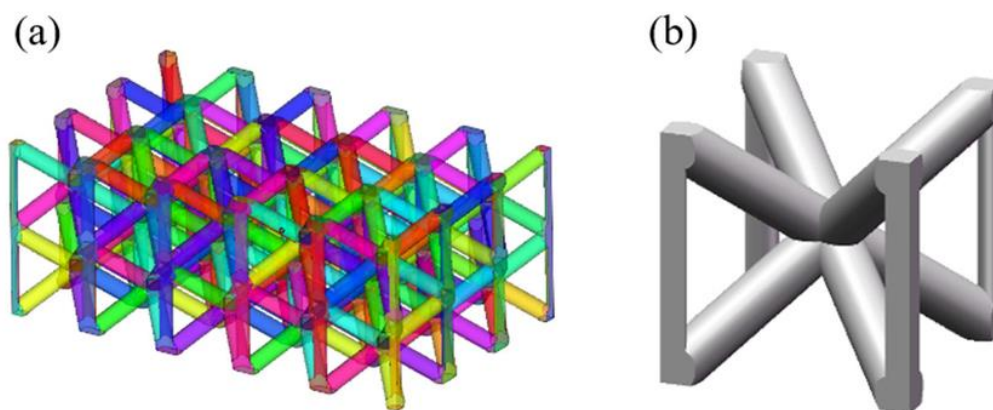
A statikus termikus meta-anyagok állandósult állapotokban működnek, ahol a hőmérséklet eloszlás időben állandó. Tervezésük olyan elméleteken alapul, mint a transzformációs hőtan és a hatékony közeg elmélet. Ezen anyagok olyan funkciók elérésére képesek, mint a hőálcázás, amely a hőáramot eltérítve védi az érzékeny komponenseket, valamint a hőkoncentráció, amelynek köszönhetően a termoelektromos hatékonyság növelhető [9], [10], [11].

Míg a dinamikus termikus meta-anyagok időfüggő, forgó mechanizmusokat és hidrodinamikai elveket alkalmaznak, például folyadékáramlást használva lehetővé teszik a hőátadás térbeli és időbeli szabályozását. Ezek az anyagok új jelenségeket vezetnek be, mint például a dinamikus hőálcázást, a nulla-ellenállású (zero-drag) tulajdonságokat és a nem-reciprok diffúziót, így precíz hőáramlás szabályozást biztosítanak változó környezeti feltételek között [10].

A termikus meta-anyagok alapvető struktúrái közé tartoznak a különböző hővezetésű anyagokból binárisan rétegzett szerkezetek, amelyek lehetővé teszik a termodinamikai tulajdonságok manipulálását, az anyagarányok és rétegvastagságok módosításával. Ezek a kialakítások hatékonyak az állandósult hőátadásban, de gyártásuk kihívást jelent az összetett anyagigények miatt [10], [11], [12].

Az additív gyártás technológia fejlődésének köszönhetően létrejöttek a cellás rácsstruktúrák is, mint például a BCCz rácsok. Ezek a szerkezetek kényszerített konvekcióval (hőáramlással) és vízkeringetéssel magas hőellenállást, valamint hatékony hűtést biztosítanak. Bonyolult geometriájuk fokozza a hőleadást, így ideálissá teszi őket magas hőciklusú alkalmazásokhoz,

például szerszámokhoz, öntőformákhoz és hőkezelő kamrákhoz [13]. A BCCz rácsok kialakítására az 5. ábrán látható egy példa.



3. ábra

BCCz rácsok struktúrája

(forrás: Specific Sensitivity Analysis and Imitative Full Stress Method for Optimal BCCZ Lattice Structure by Additive Manufacturing - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/a-BCCZ-lattice-structure-diagram-b-BCCZ-unit-cell-diagram_fig2_366418694 [accessed 1 May 2025])

Gyakoriak még a felületi bordás kialakítások is a hűtési teljesítmény javításának érdekében, amelyek a természetes konvekció alapulnak [14].

Ezek az innovatív struktúrák olyan hőszabályozási lehetőségeket biztosítanak, amelyek túlmutatnak a természetes anyagok korlátjain, hozzájárulva az energiahatékony technológiák fejlődéséhez.

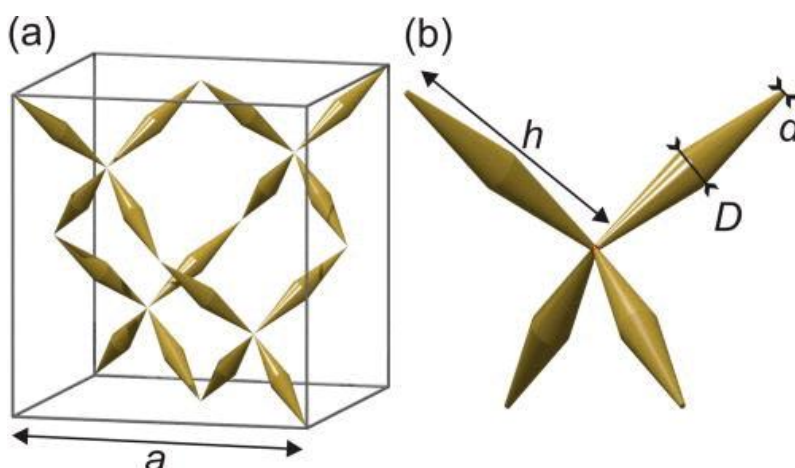
2.2.4. Mechanikai és szerkezeti meta-anyagok

A mechanikai meta-anyagok a mestereges anyagok forradalmi csoportját képviselik, amelyek az egyedi mikro- és nano-architektúráik révén szokatlan mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek és ezek a tulajdonságok nem az anyag kémiai összetételéből, hanem annak alegységeinek geometriájából adódnak. Bár az összetett szerkezetek nem számítanak újak a mechanika területén, a mikro és nano méretű struktúráknak köszönhetően ezen anyagok átlépték az eddig ismert határokat. Olyan ellentmondásos tulajdonságokkal bírnak, mint például a zérus vagy negatív Poisson-tényező, eltűnő nyírási modulusz, negatív merevség, negatív

összenyomhatóság, kitűnő szilárdság-sűrűség arány, valamint programozható mechanikai transzformációk [15], [16].

Tulajdonságaik és alkalmazásaik szerint különböző típusokba sorolhatóak ezek az anyagok. Főbb típusai közé tartoznak például a folyadékszerű viselkedést szimuláló anyagok, a negatív tulajdonságú anyagok, rács alapú, valamint origami alapú és programozható meta-anyagok.

Folyadékszerű viselkedést mutatnak például a pentamód meta-anyagok, magas térfogati moduluszuk és közel zérus nyírási moduluszuk révén, így ideálisak akusztikus álcázásra és hullámmánipulációra. Ezen tulajdonságukat gyémánt típusú rácsos szerkezetekkel érik el. Az ilyen kialakítás bizonyos irányokban nagy merevséget biztosít, miközben más irányokban nagyfokú hajlékonyságot tesz lehetővé, így az anyag ötféle deformációs módot enged, miközben ellenáll a nyírási deformációnak, innen is ered a „pentamód” elnevezés [15], [16], [17]. A szerkezeti kialakítására a 3. ábrán látható egy példa.

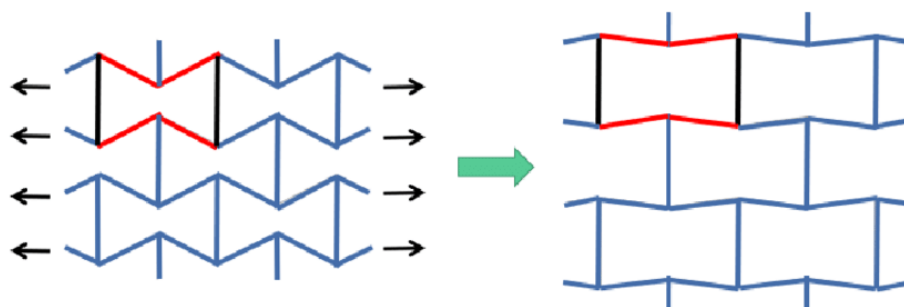


4. ábra

*Az ideális pentamód közelítőleges illusztrációja egy háromdimenziós mikroszerkezettel.
(forrás: On the feasibility of pentamode mechanical metamaterials - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/a-Illustration-of-the-pentamode-metamaterial-ideal-suggested-by-Milton-and-Cherkaev-in_fig4_221671628 [accessed 23 Apr 2025])*

Különleges tulajdonságokkal bírnak még például az auxetikus meta-anyagok is, amelyek a negatív Poisson-tényezőjükéről híresek, vagyis húzás hatására oldalirányban is tágulnak, amit a speciális geometriai kialakításuk, mint például visszahajló (re-entrant) szerkezetek vagy forgó merev egységek tesznek lehetővé. Ez a szokatlan viselkedés növeli az energiaelnyelő

képességüket, ütésállóságukat és repedésgátló tulajdonságaikat, ezért ideálisak rezgéscsillapításra és mechanikai igénybevétel elleni védelemre is [16], [18]. A visszahajló egységek szerkezetére a 4. ábrán látható egy példa.



5. ábra

Visszahajló hatszögletű méhsejtszerkezet auxetikus viselkedése.

(forrás: A simple 3D re-entrant auxetic metamaterial with enhanced energy absorption - Scientific Figure on ResearchGate. Available from:

https://www.researchgate.net/figure/Auxetic-behavior-of-re-entrant-hexagonal-honeycomb-structure_fig1_361938291 [accessed 23 Apr 2025])

Feltörekvő területek közé tartoznak az aktív, programozható meta-anyagok, amelyek lágy anyagok és bistabil egységcellák segítségével szabályozható mechanikai tulajdonságokat tesznek lehetővé. A mintaváltoztató meta-anyagok külső terhelés hatására váltanak különböző geometriai konfigurációk között, lehetővé téve a hangolható merevséget és rugalmas instabilitásokat [17], [18].

A negatív tulajdonságú meta-anyagokat, ideértve a negatív merevségű, összenyomhatóságú vagy hőtágulású anyagokat, kiválóan lehet használni energiaelnyelő rendszerekhez és lökés csillapításhoz. Emellett az erős, de könnyű, például a mikro- és nanorácsokból felépülő meta-anyagok, nagy merevséget biztosítanak alacsony sűrűség mellett, így ideálisak repülőgépipari és szerkezeti alkalmazásokhoz [15], [16], [17].

Gyakoriak még a királis szerkezeti kialakítású meta-anyagok, amelyek bal- vagy jobbkezes egységcellákból épülnek fel és nyomás hatására csavarodási deformációt mutatnak [18], [19].

Elterjedtek még az origami- és rács-alapú meta-anyagok, de ezekről részletesebben majd a későbbiekben írok.

Összefoglalva, a mechanikai meta-anyagok széleskörű anyagosztályt alkotnak, amelyek úgy vannak tervezve, hogy innovatív geometriai struktúráik révén specifikus mechanikai tulajdonságokat érjenek el. Alkalmazásuk számos iparágra kiterjed, valamint nagy potenciált mutatnak az anyagtudomány és mérnöki gyakorlat forradalmasításának terén is. A strukturális geometria erejének kihasználásával ezek az anyagok úttörő megoldásokat kínálnak az energiaelnyelés, adaptív rendszerek és könnyűszerkezetes megoldások kihívásaira, elősegítve a technológia és az ipar fejlődését.

2.3. Elméleti alapelvek a meta-anyag szerkezetek mögött

A meta-anyagok mögött álló elméleti alapelvek, törvények sokrétűek és több tudományterületet is lefednek, beleértve az elektromágneses, mechanikai és dinamikai tulajdonságokat, amelyeket a tervezésnél is fontos figyelembe venni. Az alábbi részben ezen elveket fogom bemutatni.

2.3.1. Elektromágneses elvek

A meta-anyagok szerkezetének tervezését megalapozó elektromágneses elvek célja az elektromágneses hullámok olyan módon történő manipulálása, amely a természetes anyagokkal nem valósítható meg.

A legfontosabb elvek közé tartozik az effektív közeg elmélet, amely szerint a meta-anyagok folytonos anyagként kezelhetők, amelynek az elektromosmágneses válaszai a Maxwell-egyenletek alapján testre szabhatóak. Ez lehetővé teszi az anyag permittivitásának és permeabilitásának egyedi beállítását, olyan jelenségek elérésére, mint a negatív törésmutató vagy a „szuperlencse” jelenség [3], [4], [15], [20].

Az általánosított Snell-törvény fázisbeli ugrásokat vezet be a hullámfrontok manipulálásához, ezáltal lehetővé téve a fejlett hullámszabályozást, amelynek köszönhetően például szokatlan törés, visszaverődés, hajlítás és fókuszálás érhető el [20], [21].

Az impedanciaillesztési elmélet közel tökéletes elnyelést biztosít azáltal, hogy a meta-anyagok impedanciáját a szabad tér impedanciájához igazítja, míg a csatolt módusú elmélet a rezonátor módusok közötti kölcsönhatásokkal lehetővé teszi a kritikus csatolást az elnyelés

fokozására és az energiahatékony átvitelre. Valamint a rezonancia-csúcsok szuperpozíciója több rezonanciacsúcs egyesítésével szélessávú elnyelést tesz lehetővé, amely hasznos például a napenergia hasznosításában és az elektromágneses árnyékolásban [22].

2.3.2. Topológiai és geometriai optimalizáció

A topológiai optimalizáció számítógépes módszereket alkalmaz a szerkezeti elemek alakjának és elrendezésének optimalizálására. A tényleges és kívánt mechanikai tulajdonságok közötti eltérés minimalizálásával lehetővé teszi az egyedileg hangolt merevségű, sűrűségű és egyéb tulajdonságú struktúrák létrehozását, valamint kiváló mintázat transzformációk és rácsszerkezetek tervezésére [15], [23].

A geometriai frusztráció és rugalmas instabilitás kihasználásával olyan meta-anyagok tervezhetők, amelyek egyedi tulajdonságokkal rendelkeznek, mint például bistabilitással, kihajló instabilitás okozta mintaváltozással vagy auxetikus viselkedéssel. Geometriai frusztráció akkor lép fel, amikor a szerkezeti elemek geometriai korlátok miatt nem tudják egyszerre minimalizálni az összes kölcsönhatást. Ezek az elvek lehetővé teszik az anyagok mechanikai és szerkezeti tulajdonságainak célzott kialakítását [15].

2.3.3. Dinamikus és programozható viselkedés

A meta-anyagok fázisátalakulás és nyúláskülönbség révén képesek dinamikus válaszokat adni, újra konfigurálható tulajdonságokat mutatva külső ingerek hatására. A fázisátalakulások olyan folyamatok, amelyek során molekuláris szintű kölcsönhatások révén történik meg a mikrostruktúrák átrendeződése külső ingerek hatására, míg különböző nyúlási viselkedésű anyagok kombinálásával aktív alakváltozás és szabályozható válasz hozható létre [23].

2.3.4. Mechanikai elvek

Az olyan paraméterek, mint a Young-modulus és a Poisson-tényező, meghatározzák a merevséget, a szilárdságot és az alakváltozást. A hierarchikus és többszintű szerkezeti elemek fokozzák a kihajlással szembeni ellenállást, növelik az energiaelnyelést és javítják a visszaállási képességet. A dinamikus instabilitásokat, mint például a kihajlást és átbillenést, többállapotúság

és alakváltozás céljára használják ki, ezáltal programozható merevséget elérve. A metaanyagok egyedi mechanikai viselkedése geometriai konfigurációjukból, nem pedig anyagösszetételükből ered. Például a mikro-, nanorácsok és az origami ihlette kialakítások lehetővé teszik a magas merevség – tömeg arányt, a hangolható merevséget és akár a negatív összenyomhatóságot is, ahol ezen anyagok feszítés hatására összehúzódnak vagy nyomás hatására kitágulnak. A minimálfelület alapú topológiák, amelyekre jellemző a nulla átlagos görbület, csökkentik a feszültségkoncentrációkat és javítják a mechanikai hatékonyságot. Ezen elvek révén ellentmondásos mechanikai tulajdonságok érhetőek el [15], [23], [24].

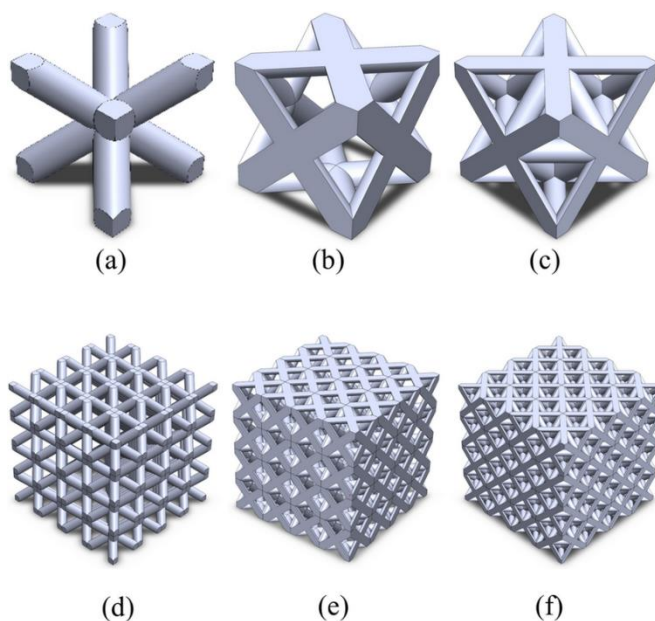
Ezen alapelveknek köszönhetően olyan tulajdonságok érhetőek el, amelyek a hagyományos anyagoknál ellentmondásosnak számítanak, mint például egyszerre magas merevség és nagyfokú energiaelnyelő képesség. Ezáltal a mechanikai metaanyagok a modern mérnöki alkalmazások széles skálájában hasznosíthatóak, többek között rezgéscsillapítás, ütközésvédelem, repülőgépipari szerkezetek és orvostechnikai eszközök fejlesztése során.

2.4. Meta-anyagok mikroszerkezetének modellezési módszerei

A meta-anyagok mikroszerkezetének modellezésére kétféle módszer létezik, a rács- és origami alapú modellezés. A következő fejezetben ezen modellezési módszereket fogom bemutatni és összehasonlítani.

2.4.1. Rács alapú modellezés

A rács alapú meta-anyagok egy forradalmi anyagosztályt képviselnek, amelyek strukturális elemek, például gerendák, rudak vagy egységcellák periodikus elrendezéséből épülnek fel. Ezek a mesterségesen épített anyagok mikro-/nano tartománybeli jellemzőket és testreszabott geometriákat ötvöznek, hogy kivételes mechanikai, termodinamikai és multifunkcionális tulajdonságokat érjenek el. Porózus, könnyű szerkezetük révén ideálisak az űrkutatásban, közlekedésben, robotikában és orvostechikai alkalmazásokban is [15], [25]. Ezen rácsszerkezetek kialakítására a 6. ábrán láthatóak példák.



6. ábra

BCC (a), FCC (b), Octet (c) egység cellák és a belőlük felépülő 4x4x4 rácsszerkezetek (d-f) (forrás: *Insight into the mechanical properties of 3D printed strut-based lattice structures - Scientific Figure on ResearchGate. Available from:*

https://www.researchgate.net/figure/BCC-FCC-and-Octet-unit-cells-of-rr03documentclass12ptminimal-usepackageamsmath_fig1_366309006 [accessed 30 Aug 2025])

A rácsszerkezetű meta-anyagok egyik legnagyobb előnye, hogy rendkívül nagy szilárdságot, merevséget mutatnak még nagyon alacsony sűrűség mellett is. A nyújtás dominált rácsszerkezetek, mint például az oktagonális kialakítások magas rugalmassági modulus-sűrűség arányokat és kiváló energiaelnyelést biztosítanak, míg a gradált (fokozatos) rácstruktuurák lehetővé teszik az irányított deformációt és feszültségeloszlást [25], [26], [27], [28].

Ezen mechanikai jellemzőkön túl a rács alapú meta-anyagok olyan tulajdonságokat képesek kombinálni, mint a rezgéscsillapítás, hangelnyelés, hőszigetelés és elektromágneses érzékenység, tehát rendkívül multifunkcionálisak is. Például lokális rezonancia által képesek csökkenteni az alacsony frekvenciájú rezgéseket, emellett kihajlási deformáció révén képesek elnyelni az ütések energiáját [28].

A fejlett gyártástechnikák, mint az additív gyártás és 3D nyomtatás kulcsszerepet játszanak a rács alapú meta-anyagok megvalósításában. Ezek az eljárások lehetővé teszik a rácsgeometria precíz szabályozását, így rendkívül könnyű, merev és erős szerkezetek hozhatóak létre [25], [29].

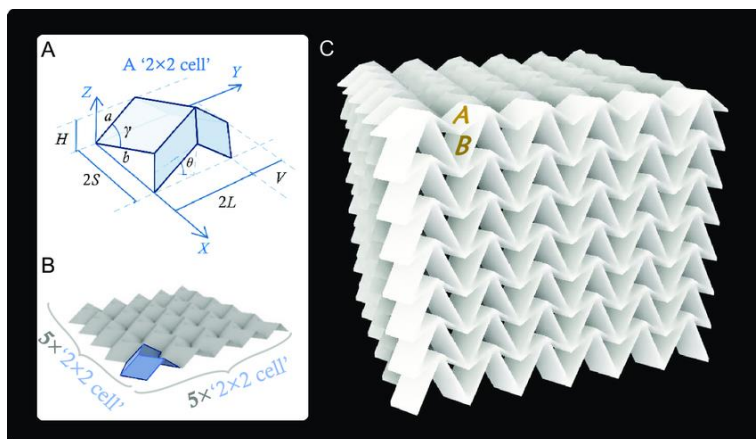
Összefoglalva, a rácsalapú meta-anyagok olyan átalakító hatású anyagosztályt képviselnek, amelyek az architektúrát és funkcionalitást ötvözve páratlan teljesítményt biztosítanak számos alkalmazásban. Könnyű struktúrájuk, energiaelnyelő képességük és multifunkcionalitásuk révén a modern anyagtudomány alappillérvé válhatnak.

2.4.2. Origami alapú modellezés

Az origami alapú meta-anyagok az ősi hajtogatás művészetét és a modern mérnöki tudomány úttörő egyesítését képviselik, amelyek az anyagok hajtogatásán keresztül egyedi mechanikai és elektromágneses tulajdonságokat mutatnak. Az origami elveit alkalmazva a sík, kétdimenziós lapok bonyolult, háromdimenziós lapokká alakíthatóak, lehetővé téve a tulajdonságok dinamikus szabályozását, állapotok közötti változtatását [30], [31].

Mechanikai szempontból az origami alapú meta-anyagok olyan tulajdonságokat mutatnak, mint a hangolható merevség, a multistabilitás, valamint a negatív Poisson-tényező. A Miura-ori minták auxetikus viselkedést mutatnak, azaz az alkalmazott erő irányára merőlegesen is

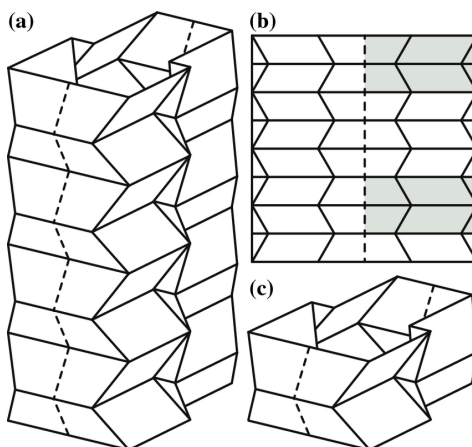
tágnak és például programozható deformációt és könnyűszerkezetes kialakítást tesznek lehetővé, így ideálisak műholdas panelek és energiaelnyelő eszközök számára. Fejlettebb kialakítások, mint például a rétegzett Miura-ori vagy a Tachi-Miura poliéder struktúrák tovább fokozzák a funkcionalitást két stabil állapotuk és újra konfigurálható geometriájuk révén [24], [30], [32]. A Miura-ori és Tachi-Miura kialakításokra a 7. és 8. ábrán látható egy-egy példa.



7. ábra

Egyrétegű Miura-ori (B), rétegzett 3D Miura-ori meta-anyag (C)

(forrás: *Computational Parametric Analysis of Cellular Solids with the Miura-Ori Metamaterial Geometry under Quasistatic Compressive Loads - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Geometric-configuration-and-specifications-of-a-typical-Miura-ori-metamaterial-A-The_fig1_370866325 [accessed 30 Aug 2025]*)



8. ábra

Tachi-Miura origami: 3D modell (a), 2D struktúra (b), kétrétegű origami szerkezet (c)

(forrás: *Design and characteristics of a novel QZS vibration isolation system with origami-inspired corrector - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Tachi-Miura-origami-a-3D-model-b-2D-structure-c-two-layer-origami-structure_fig1_354161085 [accessed 30 Aug 2025]*)

Elektromágneses szempontból az origami alapú meta-anyagok szélessávú abszorpcióra, visszaverődés szabályozásra és fényeltérítésre is képesek. Legújabb fejlesztések közé tartozik ezen anyagok hajlékony elektronikai anyagokkal, például indium-ón-oxid (ITO) filmekkel való kombinálása, amelynek köszönhetően rendkívül szélessávú elektromágneses moduláció érhető el magas optikai átlátszóság mellett. Ez különösen alkalmassá teszi őket űrtechnológiába való alkalmazásokra, például műholdas kommunikációra és optikai ablakos mobilkommunikáció szabályzására, ahol kulcsfontosságú a könnyű és összehajtható megoldás [33].

Az origami alapú meta-anyagok sokoldalúságuk révén ígéretes platformot jelentenek a jövő intelligens anyagai és adaptív rendszerei számára.

2.4.3. A modellezési módszerek összehasonlítása

Az origami alapú meta-anyagok a dinamikus újra konfigurálhatóságot, az alkalmazkodóképességet és a programozható viselkedést helyezik előtérbe, így különösen alkalmasak olyan alkalmazásokhoz, ahol rugalmasságra és kompakt kialakításra van szükség.

A rács alapú meta-anyagok ezzel szemben a mechanikai hatékonyságra, a kis tömegre és a többfunkciós felhasználásra összpontosítanak, kiválóan teljesítve a teherbírás és energiaelnyelés területén.

Mindkét megközelítés forradalmi újítást képvisel az anyagtudományban, különböző mérnöki kihívásokhoz igazodva.

2.5. Meta-anyagok gyártási technológiái

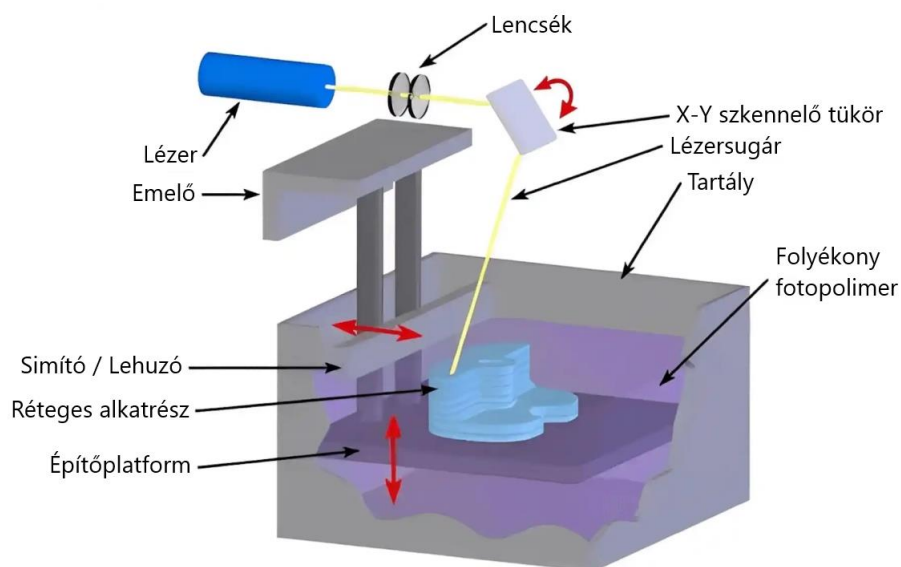
A meta-anyagok rendkívüli tulajdonságokkal rendelkező mesterséges szerkezetinek előállítása fejlett gyártástechnológiát igényel komplex kialakításuk megvalósításához [34]. A következő fejezetben ezen gyártási technológiákat fogom bemutatni.

2.5.1. Additív gyártás (3D nyomtatás)

Az additív gyártás forradalmasította a meta-anyagok előállítását, lehetővé téve olyan összetett szerkezetek létrehozását, amelyek hagyományos módon elérhetetlenek [34].

A 3D nyomtatás alapelve, hogy rétegről rétegre építi fel a háromdimenziós tárgyakat, számítógéppel való tervezés (CAD) segítségével [34].

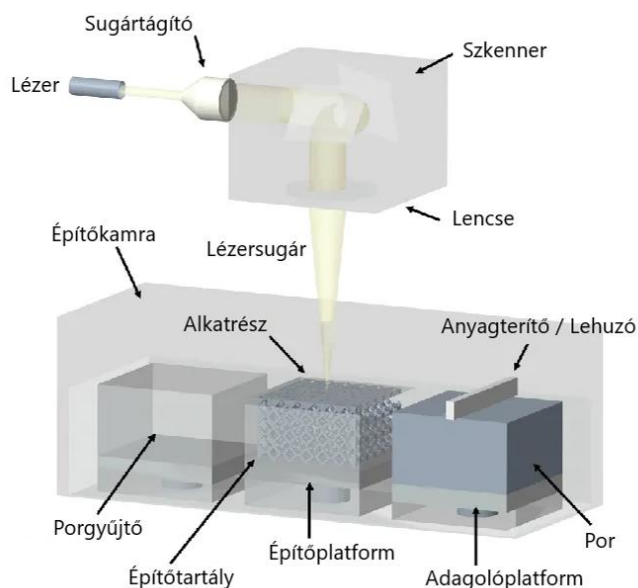
Szinte korlátlan topológiai komplexitás érhető el ezen technológiákkal. Legelterjedtebb típusai közé tartozik a sztereolitográfia (SLA), a szelektív lézeres olvasztás (SLM), az olvasztott huzalos modellezés (FDM) és a két-fotonos litográfia (TPL). Mindegyik technológia eltérő előnyökkel és korlátokkal rendelkezik, amelyek meghatározzák, hogy milyen típusú meta-anyagok gyártására alkalmasak. Az SLA például magas felbontást és sima felületminőséget biztosít, ezért különösen alkalmas precíz polimer alapú szerkezetek előállítására, azonban a nyomtatási méret és az anyagválaszték korlátozott. Az SLM ezzel szemben fémes szerkezetek létrehozását teszi lehetővé, így többnyire az ipari környezetben alkalmazzák mechanikai és elektromágneses meta-anyagok gyártására. Hátrányuk, hogy rendkívül drágák, a folyamat lassú és jelentős utómunkát igényel. A TPL nanoszintű felbontást tesz lehetővé, így különösen alkalmas optikai és elektromágneses meta-anyagok előállítására, ugyanakkor ez a módszer rendkívül költséges, és elsősorban kutatólaborokban használatos, így hozzáférhetősége erősen korlátozott [15], [34], [35]. A SLA és SLM nyomtatási technológiákról a 9. és 10. ábrán látható egy-egy példa.



9. ábra

SLA folyamat

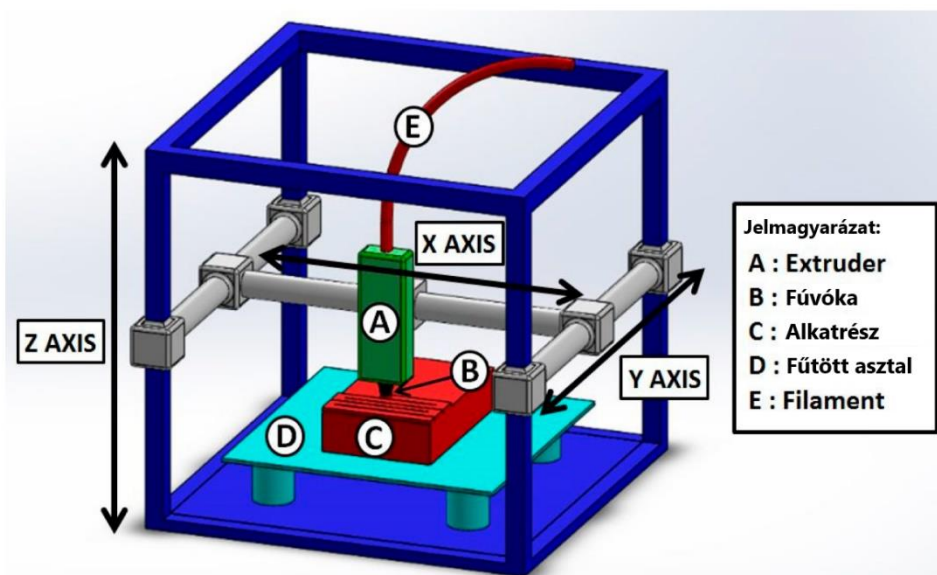
(forrás: <https://www.unionfab.com/blog/2023/08/sla-3d-printing-for-automotive>)



10. ábra
SLM folyamat

(forrás: *Development of Micro Selective Laser Melting: The State of the Art and Future Perspectives - Scientific Figure on ResearchGate*. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-SLM-process_fig2_334230008 [accessed 31 Aug 2025])

A legelterjedtebb és leginkább hozzáférhető technológia az olvasztott huzalos modellezés (FDM), amely olcsó, könnyen kezelhető és széles körben elérhető akár hobbi szinten is. Ennek köszönhetően gyors prototípus készítést tesz lehetővé. Ideális polimer alapú meta-anyagok, különösen mechanikai rácsszerkezetek előállítására. Hátránya, hogy a felbontása korlátozott, így nem alkalmas nanoszerkezetek előállítására. Azonban egyszerűsége és költséghatékonysága miatt az FDM az egyik legalkalmasabb módszer a mechanikai tulajdonságok vizsgálatára tervezett meta-anyagok készítésére [34]. A 11. ábrán látható róla egy példa.



11. ábra
FDM típusú 3D nyomtató
(forrás: <https://www.mdpi.com/2073-4360/11/7/1094>)

Azonban számos kihívás áll fenn, ezen gyártási módszerek körül is. Az additív technológiák gyakran nehezen birkóznak meg a több anyagból való gyártással, a segéd tartószerkezetek eltávolításával bonyolultabb szerkezeteknél, valamint a felbontás és méretezhetőség egyensúly megtalálásával [34], [36].

A dolgozatomban az FDM típusú 3D nyomtatási technológiát alkalmazom, mivel az a leginkább hozzáférhető és a vizsgálataim szempontjából megfelelő módszer.

2.5.2. Fotolitográfia

Fotolitográfia a mikro- és nanogyártás kulcsfontosságú technológiája, amely lehetővé teszi a bonyolult és precíz mintázatok létrehozását nanométeres méretben. Széleskörben alkalmazzák a félvezetőiparban integrált áramkörök (IC-K) és mikroelektromechanikai rendszerek (MEMS) gyártására [37].

A folyamat lényege, hogy a maszklemezen lévő mintákat fényérzékeny anyag, azaz fotoreziszt felhasználásával a hordozóra marják, fényexpozíció. Az UV-fénynek való kitettség révén kialakul a kívánt minta. Ez a technika különösen hatékony periodikus vagy

kváziperiodikus szerkezetek előállítására, amelyek elengedhetetlen elemei például az elektromágneses meta-anyagoknak [18], [22], [36].

A fotolitográfia különösen hatékony kétdimenziós struktúrák létrehozására, azonban felbontását a fény diffrakciós határa korlátozza [35], [37].

A fotolitográfia fejlődése olyan új technikákat vezetett be, mint például a két-fotonos litográfia (TPL), amely femtoszekundumos impulzuslézereket használ nemlineáris polimerizációhoz. A TPL olyan 3D nyomtatási technika, amely képes rendkívül összetett struktúrák előállítására a legapróbb részletekkel, akár 100 nm-es felbontást elérve. Ez a módszer különösen alkalmas nagy precizitást igénylő alkalmazásokhoz. Bár elsősorban polimer struktúrákhoz használják, az utófeldolgozási technikák, mint például a kémiai gőzfázisú leválasztás (CVD), atomréteg-leválasztás (ALD) és elektrokémiai fémbevonás lehetővé teszik fémes és kerámia szerkezetek létrehozását is [18], [35].

Összegezve, a fotolitográfia kiemelkedik pontosságban, felbontásban és olyan alkalmazásokban, ahol bonyolult mikro- és nanoszerkezetek szükségesek. Ugyanakkor kihívásokkal néz szembe a skálázhatóság, költségek és anyagválaszték terén. Ezzel szemben az additív gyártási technikák nagyobb rugalmasságot, jobb skálázhatóságot és többanyagos kompatibilitást kínálnak, így jobban alkalmasak összetett, nagyléptékű 3D struktúrák előállítására.

2.6. Meta-anyagok szimulációja és modellezése

2.6.1. A szimuláció szerepe a meta-anyagok tervezésében

A szimulációk kulcsszerepet játszanak a meta-anyagok tervezésében, elemzésében és optimalizálásában, mivel lehetővé teszi a kutatók számára ezen anyagok különböző hatásokra való viselkedésének előrejelzését és elméleti koncepciók validálását [22], [23].

A számítási modell kísérleti adatokkal való betanításának révén az adatvezérelt mesterséges intelligenciának és egyéb módszereknek köszönhetően a tervezési ciklus ideje jelentősen lerövidíthető, növelve a hatékonyságot [23].

2.6.2. *A numerikus modellezés (lehetőségei és kihívásai)*

A numerikus módszerek kiegészítik a szimulációkat azáltal, hogy matematikai keret biztosítanak a meta-anyagok viselkedését leíró összetett egyenletek megoldásához, lehetővé téve a pontos előrejelzéseket és megbízható tervezést [20], [21], [23].

A leggyakoribb numerikus módszerek közé tartozik az időtartománybeli véges differenciák módszere (FDTD) és a végelem-módszer (FEM) [21].

Az FDTD módszer a tér és idő diszkrét rácson való lépésenkénti numerikus integrálására épül és elsősorban elektromágneses hullámterjedés szimulálására használják. A módszer közvetlenül integrálja Maxwell egyenleteit, így kiválóan alkalmas időfüggő jelenségek, például impulzusok, reflexiók és elnyelési viselkedés vizsgálatára. Az FDTD különösen előnyös a meta-anyagok esetében, mivel természeténél fogva képes kezelni a frekvenciafüggő diszperziót, valamint az elektromágneses hullámok és az anyagban található struktúrák közötti komplex kölcsönhatásokat. [21], [38].

A végelem-módszer (FEM) az egyik legelterjedtebb és sokoldalúbb numerikus elemzési technika, amelyet széles körű mérnöki problémák közelítő megoldására használnak. Különösen hatékony bonyolult geometriai formák és kontinuummechanikai problémák megoldására. A FEM működése azon alapul, hogy a vizsgált tartományt kisebb, kezelhető elemekre, jellemzően háromszögekre vagy más alakzatokra bontja fel, majd az egyenleteket lokálisan megoldja ezen elemekre. Ez a szakaszos megközelítés jobb lehetőséget nyújt az összetett alakzatok és határfeltételek leképezésére, mint például a véges differenciák módszere. Ez a módszer rendkívül sokoldalú, alkalmazható a szilárdságtan, az áramlástan, a hőátadás, az elektromágnesesség, a biomechanika és sok más terület problémáira is [39].

A mesterséges intelligencia és a gépi tanulás szimulációkba való integrálása várhatóan forradalmasítja a meta-anyagok tervezését, lehetővé téve a gyorsabb és pontosabb előrejelzéseket, valamint új lehetőségek megnyitását [22], [23].

2.6.3. *Szimulációs szoftverek és eszközök (COMSOL, CST, Ansys HFSS)*

A meta-struktúrák paramétereinek analitikus meghatározása gyakran nehézségekbe ütközik a szerkezetek bonyolultsága vagy a valóságtól és ideális modellektől való eltérések miatt. Ezért

a legtöbb meta-anyaggal kapcsolatos munkában az emberek numerikus szimulációk segítségével határozzák meg a struktúrák paramétereit, különféle kereskedelmi szoftverek segítségével, mint például a COMSOL Multiphysics, a CST Microwave Studio vagy az Ansys. Ezek a szoftverek olyan numerikus algoritmusokon alapulnak, mint a FDTD és a FEM [21].

Az Ansys Mechanical egy végeelem analízisen alapuló szoftver, amit szerkezeti analízisre terveztek. Ez egy felhasználóbarát dinamikus környezetet kínál az elemző eszközök teljes skálájával, a geometria előkészítésétől a fizika elvek összekapcsolásáig a nagy pontosságú szimulációk és optimalizálás érdekében. Míg az Ansys HFSS például kifejezetten a nagyfrekvenciás elektromágneses terek szimulációjára lett kifejlesztve és gyakran használják rádiófrekvenciás és mikrohullámú alkalmazásokhoz kapcsolódó meta-anyagok tervezésére és szimulációjára [40], [41].

2.7. A meta-anyagok fejlődési irányai és jövőbeli lehetőségek

A jövőbeli kutatások középpontjában az MI-alapú tervezés, a több léptékű gyártás és a multifunkcionális alkalmazások állnak, megelőzve a következő generációs meta-anyagokat a robotika, orvosi implantátumok és szélsőséges környezetek számára [18], [19].

2.8. Összefoglalás

A mechanikai meta-anyagok a kutatások egyik kiemelt területévé váltak az elmúlt években, mivel olyan különleges tulajdonságokkal is rendelkezhetnek, amelyek a hagyományos anyagoknál nem, vagy csak nagyon korlátozottan érhetőek el. Ezen anyagok nem az alapanyaguk révén különlegesek, hanem a precízen kialakított mikro- és nanoszerkezetük biztosít számukra egyedi viselkedést. Különösen nagy jelentőséggel bírnak ezek a struktúrák a rezgéscsillapítás, hangszigetelés és hangcsillapítás területén.

A zaj- és rezgéscsökkentés fontossága mára meghatározó tényezővé vált a mindennapi élet során. A közlekedésben, járműiparban, az ipari gépek működésében vagy akár a lakóépületek kialakításában is a nem kívánt zaj és vibráció nemcsak kényelmi, de egészségügyi problémát is jelenthet.

A 3D nyomtatás és más additív gyártási technológiák révén ma már egyre egyszerűbben állíthatóak elő olyan bonyolult geometriai kialakítások, amelyek a rezgés és hangcsillapítás terén új lehetőségeket kínálnak. Azonban ezen struktúrák széleskörű gyakorlati alkalmazásához még számos vizsgálatra van szükség.

A dolgozatban megfogalmazott célkitűzés is ehhez a kutatási irányhoz kapcsolódik. A vizsgálatok során különböző szerkezeti kialakítások szimulációs és kísérleti módszerekkel történő elemzése lehetőséget nyújt olyan struktúrák meghatározására, amelyek kiemelkedő rezgéscsillapító, hangszigetelő és hangcsillapító hatással bírnak. Ez nemcsak tudományos szempontból jelent új ismeretet, hanem hozzájárulhat a jövőbeli ipari és építészeti alkalmazások fejlesztéséhez is. Hosszú távon az ilyen szerkezetek elterjedése hozzájárulhat a zajszennyezés mérsékléséhez, a gépek élettartamának növeléséhez, a környezet minőségének javításához, és ezáltal egy fenntarthatóbb, élhetőbb világ kialakításához is.

3. Anyag és módszertan

Vizsgálatom során azonos topológiájú, de különböző méretarányú, periodikusan ismétlődő egységekből felépülő auxetikus szerkezetek mechanikai viselkedését elemeztem numerikus módon, végeelem-módszerrel.

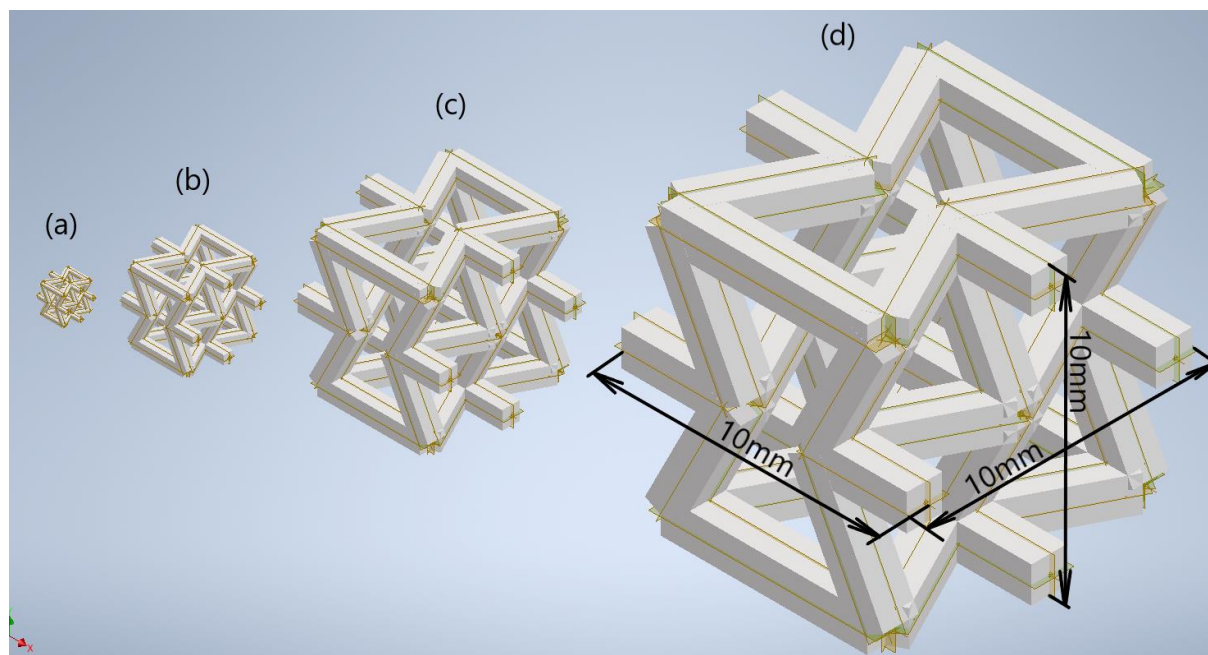
A céloom annak meghatározása volt, hogy az egységcellák mérete miként befolyásolja a teljes szerkezet különböző mechanikai tulajdonságait, globális merevségét, deformációs viselkedését, energiaelnyelő és rezgéscsillapító képességét.

Ennek érdekében négy különböző darabszámú és arányosan eltérő méretű, de azonos szerkezeti mintázatú egységekből álló modellt hoztam létre, melyek végül mind 10x10x10 mm méretű blokkok voltak.

3.1. Modellek és geometriai felépítés

A modellek alapjait auxetikus jellegű, visszahajló (re-entrant) méhsejt geometriájú háromdimenziós cellák képezték, amelyekből periodikus sokszorozással azonos méretű metaanyag blokkokat építettem fel. A vizsgálat lebonyolításához négy különböző modellt hoztam létre, melyek mindegyike eltérő méretű, de azonos mintázatú egységekből épült fel. Az első modell egyetlen 10x10x10 mm-es egységből, majd 8 darab 5x5x5 mm-es, 64 darab 2,5x2,5x2,5 mm-es és végül az utolsó szerkezet 1000 darab 1x1x1 mm-es egyégből állt. Minden modell végső mérete 10x10x10 mm volt, így az összehasonlítás kizárólag a belső egységek méretének változásával, azonos külső geometriai méret mellett történt.

Az egységek modellezését Autodesk Inventor Professional 2024 tervező programban végeztem, melyben négy különböző modellt hoztam létre. Ezen egységek modelljei a 12. ábrán látható.

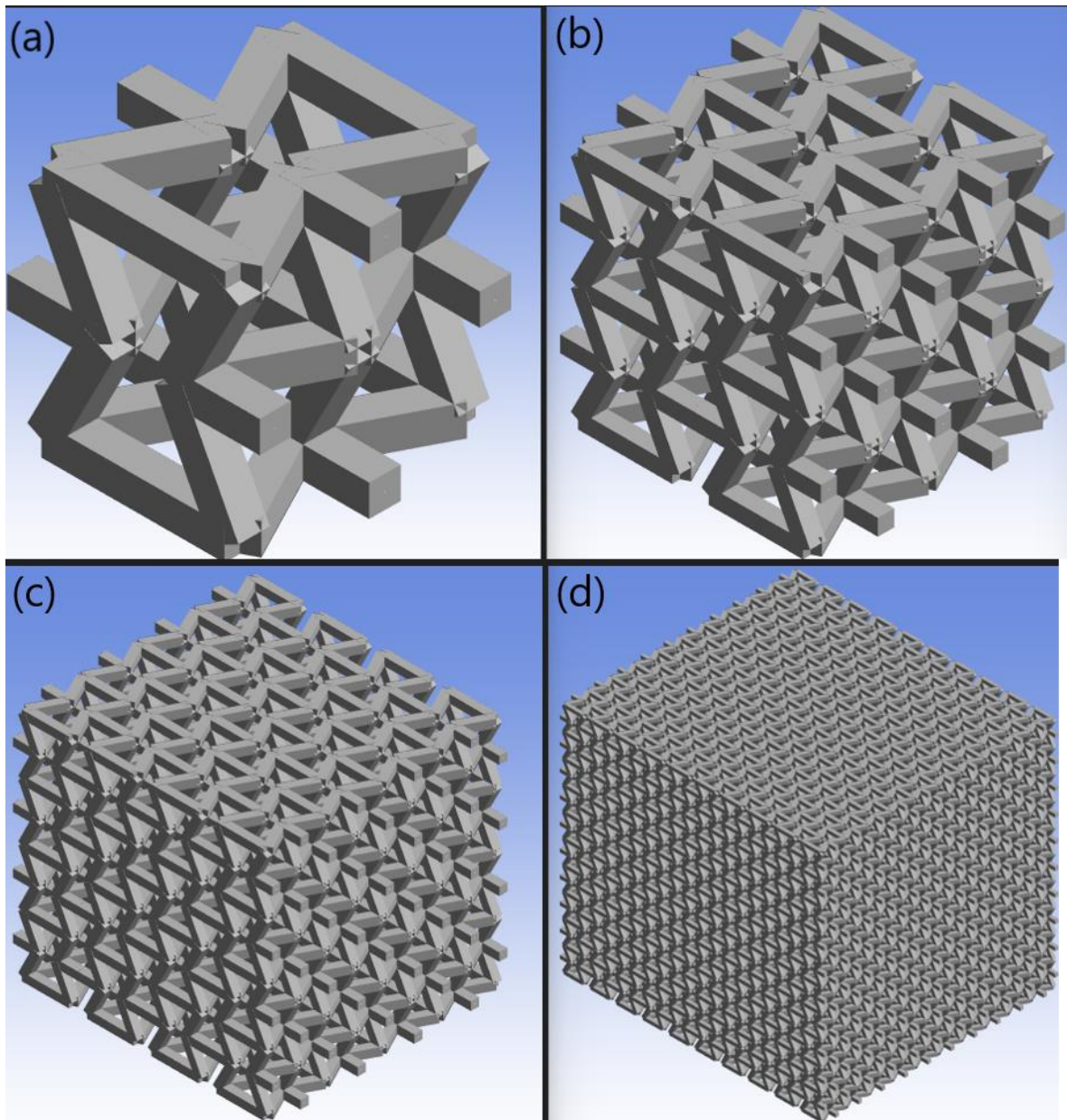


12. ábra

(a) $1 \times 1 \times 1$ mm-es egység; (b) $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ mm-es egység; (c) $5 \times 5 \times 5$ mm-es egység;
(d) $10 \times 10 \times 10$ mm-es egység

A különböző méretű egységeket arányosan skálázott, azonos keresztmetszetű rúdelemekből építettem fel, amelyeket a középvonalak találkozási pontjainál kapcsoltam össze. Ez a lépés kulcsfontosságú volt az ANSYS-ban végzett szimulációk szempontjából, mivel jelentősen csökkentette a számítási igényt a rudak révén, ezáltal lehetővé téve a stabil és hatékony futtatását.

Majd ANSYS 2025 R2 STUDENT SpaceClaim környezetébe STEP fájlként beimportáltam ezen modelleket és a tömör elemek középvonalai mentén rúdelemeket (beameket) generáltam az Extract Beam funkcióval, majd ezeket a Linear Pattern parancs segítségével megsokszoroztam az adott mennyiségre, ahhoz, hogy $10 \times 10 \times 10$ mm-es blokkok jöjjenek létre. Az egységek így vonaltestként kerültek definiálásra, ami jelentősen csökkentette a számítási igényt a teljes tömör modellezéshez képest. A középvonalakhoz azonos keresztmetszeteket rendeltem a Beam Cross-Section segítségével, így létrejöttek a rúdelemek és végül a Make New Component paranccsal egyetlen szerkezeti egységgé egyesítettem őket, ezáltal az egész rácsszerkezet egy testként jelent meg az ANSYS Mechanical környezetében. A kész modellekről a 13. ábrán látható egy-egy kép.



13. ábra

(a) 1db 10x10x10 mm-es egység; (b) 8db 5x5x5 mm-es egység;
(c) 64db 2,5x2,5x2,5 mm-es egység; (d) 1000db 1x1x1 mm-es egység

A képeken látható sarkok hiányossága adott részeken csak Cross-Sectionból adódó vizuális probléma, ANSYS számításait ez nem befolyásolja.

3.2. Anyagjellemzők

Mivel az auxetikus meta-anyagok a különleges deformálódásukról híresek, mint például, nyomás hatására oldal irányba is összemennek, vagy húzás hatására kiszélesednek, ezért ezen anyagok gyártásakor ajánlott valamilyen rugalmasabb anyagot választani. Ebből kifolyólag én a szimulációk során TPU 95A (Thermoplastic Polyurethane) anyagot rendeltem a modelljeimhez, amely jellemzően jobb rugalmassági tényezőkkel rendelkezik, mint más anyagok és 3D nyomtatásban is széleskörben alkalmazzák.

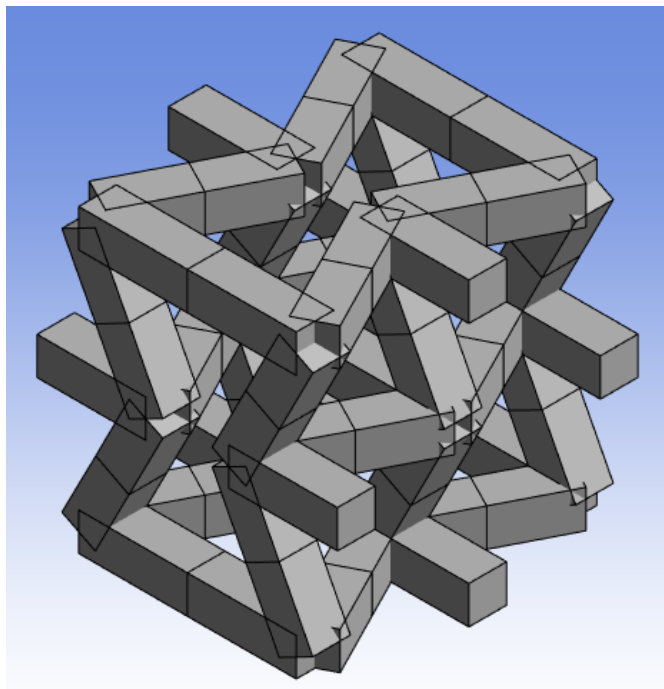
Mivel TPU az ANSYS előre meghatározott anyagkönyvtárában nem szerepelt, ezért az anyagparamétereket szakirodalmakból fellelhető tipikus mérési adatok, valamint gyártói adatlapok alapján határoztam meg. Az ANSYS Engineering Data moduljában a következő értékeket állítottam be:

- Sűrűség: 1200 kg/m^3
- Young's modulus: 26 MPa
- Poisson's ratio: 0,48
- Structural Material Damping Coefficient ($\tan \delta$): 0,27

A rezgésvizsgálatoknál az anyaghoz damping coefficient értéket is megadtam (Structural Material Damping Coefficient), ami az energiaelnyelő viselkedést szimulálta a Modal és Harmonic Response analízisek során [42], [43], [44].

3.3. Hálózás (Mesh)

A modellek BEAM elemtípusra lettek hálózva, lineáris interpolációval. A hálóméretet úgy választottam meg mind a 4 egységnél, hogy mindegyik rúd két elemből álljon, biztosítva ezzel a kellő pontosságot a lokális deformációk leírásához és a különböző egységmértű szerkezetek összehasonlíthatóságának fenntartását. Az egységek hálózására a 14. ábrán látható példa.



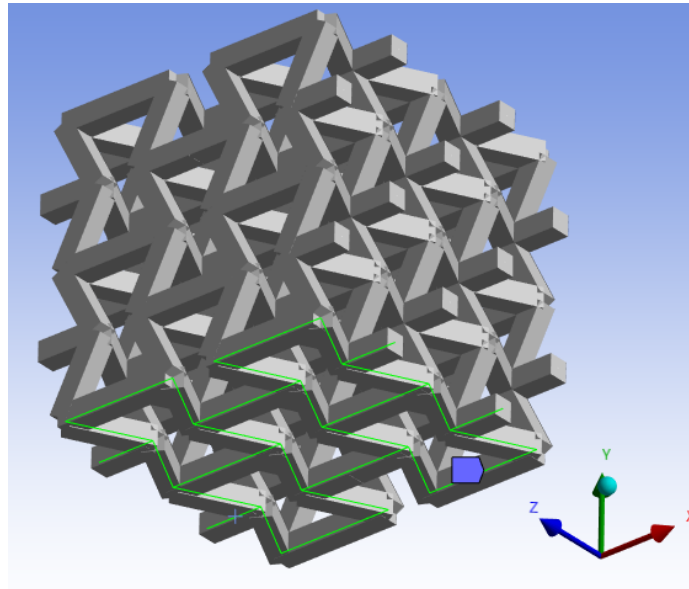
*14. ábra
3D visszahajló méhsejt egységek hálózása*

Az 1000 darab 1x1x1 mm-es egységből álló modell esetén a háló körülbelül 72610 csomópontot (node) és 42380 elemet tartalmazott, míg az 1 darab 10x10x10 mm-es egységű modell 121 csomópontból és 66 elemből állt.

4. Elvégzett szimulációk típusai és közös peremfeltételeik

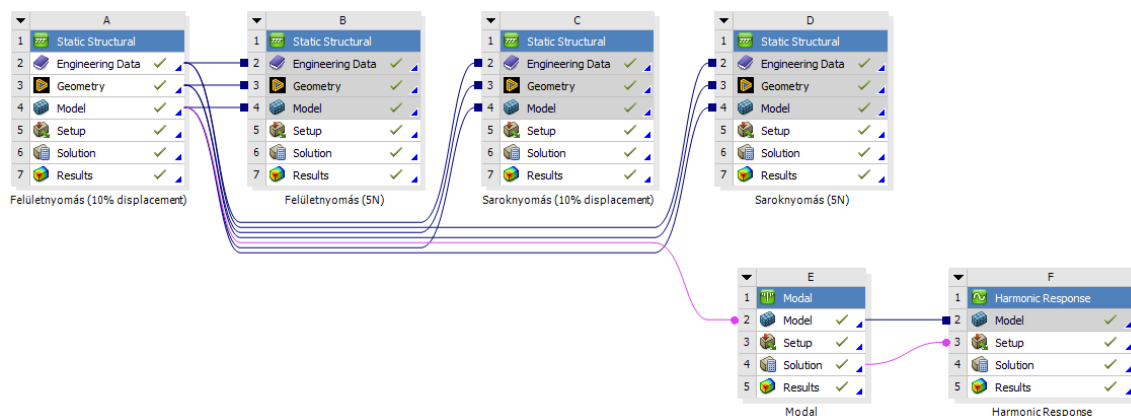
A szimulációkat a végelem-módszeren alapuló ANSYS 2025 R2 STUDENT Mechanical szoftver környezetében végeztem el, amely lehetőséget biztosított a geometriai modellek, a hálózás és az analízismodulok integrált kezelésére. A vizsgálatok során egységes peremfeltételeket, anyagtulajdonságokat és vizsgálati körülményeket alkalmaztam a modellek mindegyikére, annak érdekében, hogy a különbségek kizárólag a belső egységek méretéből adódjanak.

Mindegyik szimuláció során a modellek aljaira Fixed Support peremfeltételt alkalmaztam, amely minden alsó rúdelemet rögzített, ezzel szimulálva a merev alapfelületet. Erre a 15. ábrán látható egy példa, ahol a zöld vonalak jelölik a lekötött rudakat és azok csomópontjait.



15. ábra
Fixed Support alkalmazása

A vizsgálatok több lépésben történtek: először statikus mechanikai szimulációkat futtattam, mint például felület- és saroknyomás a szerkezetek teherbírásának és deformációs viselkedésének meghatározására, ezt követően pedig dinamikai elemzéseket, mint például modális és harmonikus vizsgálatokat végeztem, melyek a szerkezetek sajátfrekvenciáit és rezgéscsillapító viselkedését tárták fel. Ezen szimulációk ANSYS Workbenchben lévő sematikus modellje a 16. ábrán látható.



16. ábra
A projekt sematikus modellje ANSYS Workbenchben belül

5. Eredmények és kiértékelés

5.1. Felületnyomás

A felületnyomás szimulációját ANSYS-ban előre meghatározott Static Structural modulban végeztem. Ezen vizsgálat során a teljes felső csomópontcsoport számára -Y irányú displacementet (elmozdulást) adtam meg. Az elmozdulás mértéke minden modellnél a teljes blokk magasságának 10%-a volt, azaz $\Delta Y = 1$ mm. Ez a peremfeltétel a nyomólapos nyomóvizsgálatot modellezte, ahol a felső felületet egyenletes nyomás éri. Majd ugyanezen feltételek mellett a szimulációt 5N nagyságú felületi erővel is elvégeztem, amellyel az egyes szerkezetek tényleges erő - deformációs válaszát és energiaelnyelési viselkedését értékeltem.

Quasi-Static Solution beállításával futtattam a szimulációkat, így ez a vizsgálat a klasszikus nyomópróba numerikus megfelelője, amely a kvázi-statikus terhelés esetén modellezi a szerkezet deformációját. A számítás során small deflection módot használtam (Large Deflection = OFF), mivel ez a konfiguráció javította a numerikus stabilitást és az összehasonlításokat nem torzította, mert sem az 1 mm-es elmozdulás, sem az 5 N-os erő nem eredményezett olyan mértékű alakváltozást, amely indokolta volna a geometriai nemlinearitás figyelembevételét.

A vizsgálat során meghatározott kulcsfontosságú paraméterek:

- Reaction Force [N] – a rögzített felületen ébredő eredő reakcióerő,
- Strain Energy [mJ] – a szerkezetben tárolt rugalmas energia,
- Direct Stress [MPa] – a lokális igénybevételek feltárására,
- Globális merevség [N/mm] – a szerkezet merevsége, adott terhelésre mekkora a deformáció nagysága.

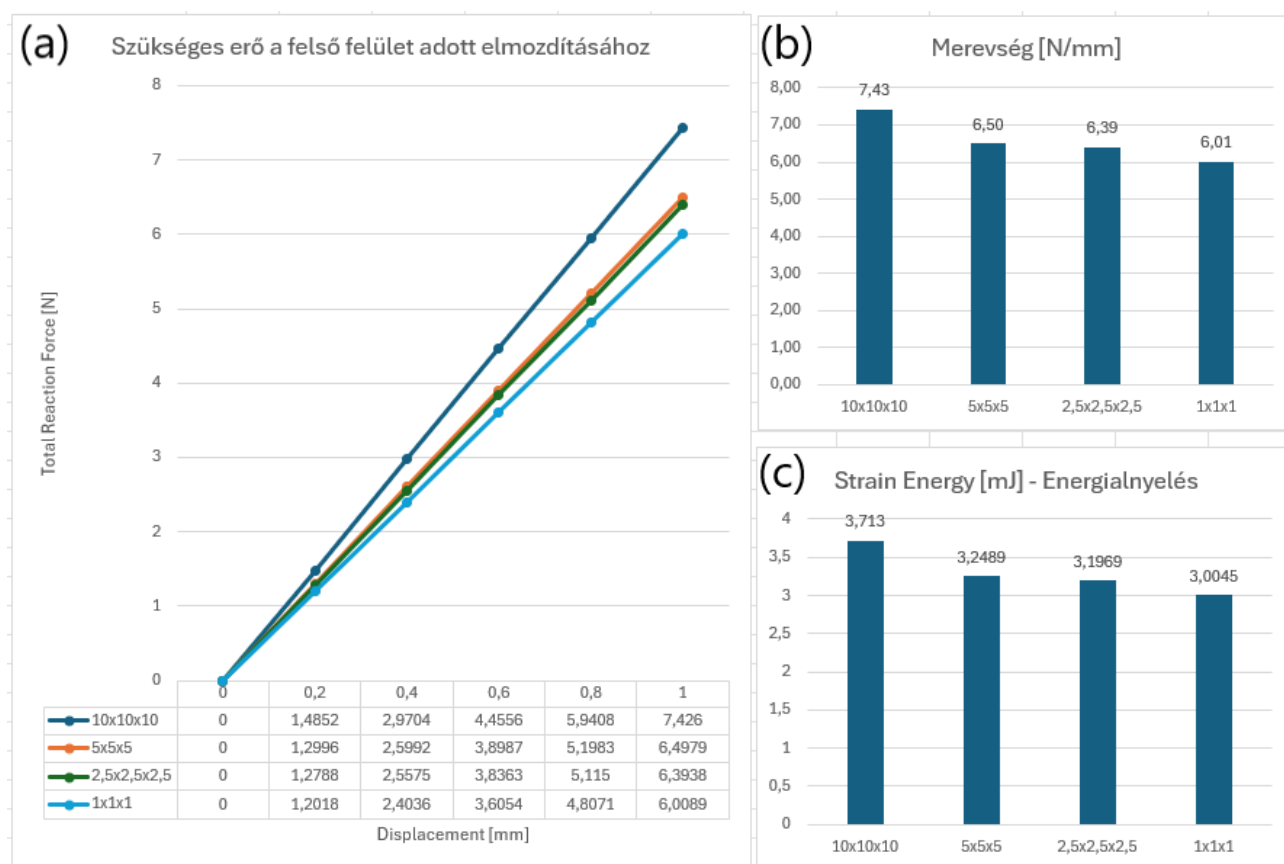
A Reaction Force értékekből kiszámítottam a globális merevséget, valamint a Strain Energy-t, amely a deformáció során elnyelt rugalmas energiát jelenti. Az alábbi matematikai képletek segítségével: Az (1) -es képlet segítségével számoltam a szerkezetek globális merevségét, a (2) írja le a deformáció során elnyelt rugalmas energiát.

$$k = \frac{F}{\Delta Y} \quad (1)$$

$$U = \int F dy = \frac{1}{2} F * \Delta Y \quad (2)$$

5.1.1. Elmozdulás-vezérelt szimuláció

A felső felület 1 mm-es elmozdítása során az eredmények a 17. és 18. ábrán látható módon alakultak:



17. ábra

(a) elmozdulás – szükséges erő; (b) Merevség; (c) Elnyelt rugalmas energia 1mm elmozdulásnál a különböző méretű egységekből álló szerkezetekre

A 17. ábrán látható eredmények jól szemléltetik a különböző egységméretű szerkezetek rugalmas viselkedését.

Az (a) ábrán 1 mm-es elmozdulásig, 0,2 mm-es lépésközökkel végig követhető a szükséges erőigény az elmozdításhoz a különböző méretű egységekből álló szerkezeteknél. A látható

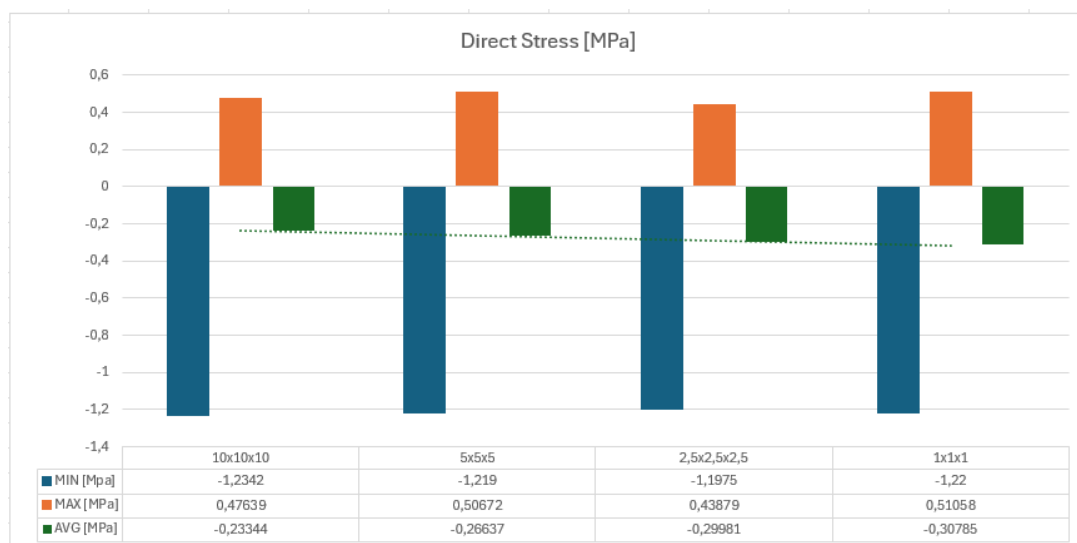
elmozdulás–reakcióerő görbék minden esetben lineáris kapcsolatot mutatnak, ami a vizsgált tartományban kvázi-statisztikus, rugalmas deformációra utal.

A görbék meredeksége a cellaméret csökkenésével fokozatosan csökken, ami a globális merevség csökkenését is jelenti. A nagyobb egységekből felépülő 10×10×10 mm-es blokk reagál a legnagyobb erővel az elmozdításra, míg a finomabb, több rúdelemből álló szerkezetek lágyabb deformációt mutatnak.

A (b) ábrán összefoglalt merevségi értékek (7,43; 6,50; 6,39; 6,01 N/mm) egyértelműen mutatják a méretarány hatását: a kisebb egységméret csökkenő globális merevséggel jár, amely a struktúra finomodásából és a rúdelemek relatív karcsúsodásából adódik.

A (c) ábrán látható rugalmas energiaelnyelés (Strain Energy) hasonló trendet követ, értékei 1 mm elmozdításnál 3,713 mJ és 3,0045 mJ között alakultak. Ez azt jelzi, hogy a nagyobb egységek több energiát tárolnak azonos deformáció mellett, míg a kisebb cellákból álló modellek rugalmasabbak, kisebb energiát tároló, de kedvezőbb csillapító tulajdonságokkal bírnak.

Összességében a 17. ábra eredményei alapján elmondható, hogy a cellaméret csökkenésével a szerkezet rugalmasabbá, deformálhatóbbá és energiaelnyelőbbé válik, ugyanakkor globális merevsége csökken.



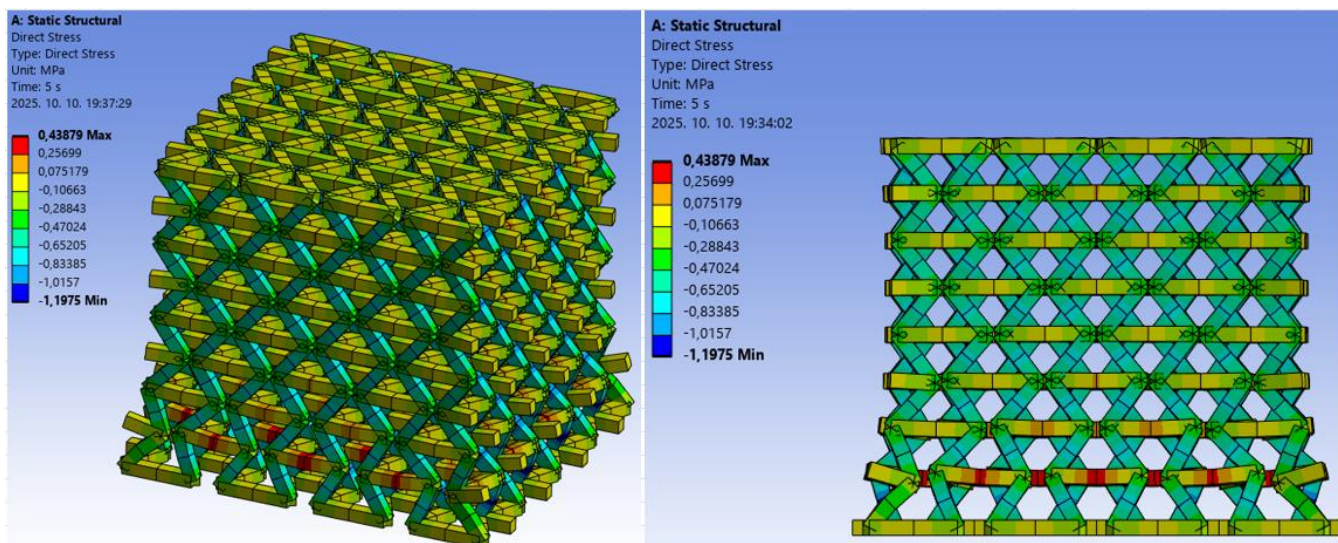
18. ábra
Fellépő feszültségek nagysága

A 18. ábra a vizsgált modellekben kialakuló direkt feszültségek alakulását szemlélteti a 10%-os elmozdítás hatására. A feszültségértékek alapján megfigyelhető, hogy a cellaméret csökkenésével a szerkezeten belül lokálisan növekvő igénybevétel jelentkezik.

A feszültségeloszlás elemzése során a maximális direkt feszültségek értékei kisebb ingadozást mutattak az egyes modellek között, amely elsősorban a csomóponti geometriák lokális eltéréseire, valamint a rúdelemek kapcsolódási viszonyaira vezethető vissza. Ezek a lokális csúcserőterek a legterheltebb elemekben jelentkeznek, ezért erősen függenek a hálózati sűrűségtől, a keresztmetszeti orientációtól és az illesztések pontosságától. A globális viselkedés jellemzésére ezért célszerű a szerkezet egészére jellemző átlagos direkt feszültség (AVG Direct Stress) értékeit figyelembe venni, mivel ezek kiegyenlítik a lokális hatásokat és pontosabban tükrözik a teljes modell igénybevételét.

Az átlagos feszültségértékek $-0,233$ MPa; $-0,266$ MPa; $-0,300$ MPa; $-0,308$ MPa között változtak, vagyis abszolút értékben növekedő tendenciát mutattak a cellaméret csökkenésével, ami összhangban van a korábban tapasztalt merevség és energiaelnyelési trendekkel. Ez azt jelenti, hogy a kisebb egységekből felépülő szerkezetek nagyobb belső feszültségeket hordoznak azonos deformáció mellett, vagyis lokálisan terheltebbek, de mellette globálisan rugalmasabbak.

A feszültségértékek negatív előjele a nyomófeszültségeket jelöli (a szerkezet összenyomódását), míg a pozitív tartományok húzott zónákat mutatnak, tehát a visszahajló auxetikus geometria egyes pontjai húzófeszültség alatt deformálódnak. Ez a kettős hatás jellemző a re-entrant (visszahajló) típusú auxetikus struktúrákra, ahol a lokális húzó-nyomó zónák együttese biztosítja a jó energiaelnyelő és rezgéscsillapító képességet. Ezen feszültség zónák alakulására a 19. ábrán látható egy példa.



19. ábra
Feszültségeloszlás a 64 db $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ mm-es egységből felépített blokkon
(Direct Stress [MPa])

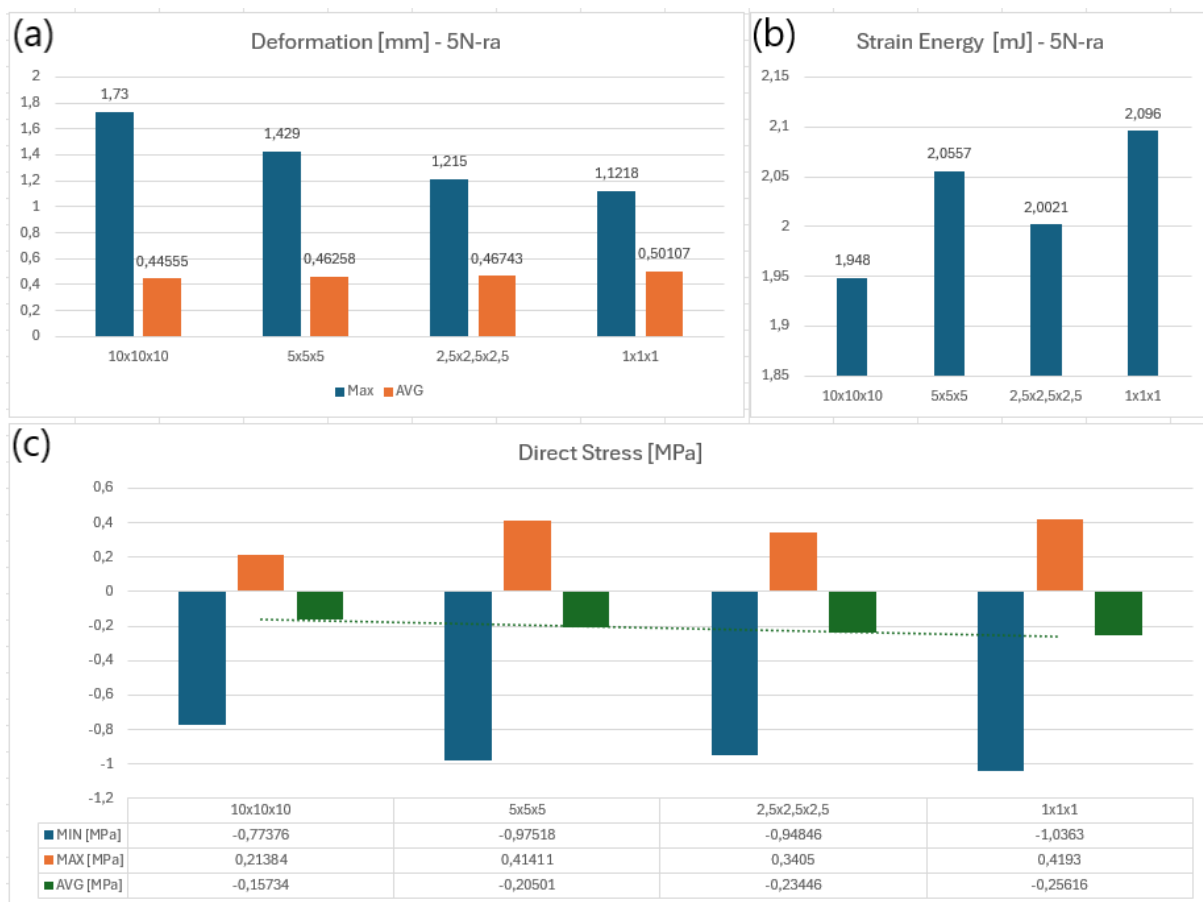
A legnagyobb feszültségek a rúdelemek csatlakozási pontjain, azaz a geometriai átmeneteknél koncentráálódtak, ami a szerkezet deformációs mechanizmusából adódik.

Az ábra jól szemlélteti még az auxetikus geometriákra jellemző inverz Poisson-viselkedést is, amely során nyomás hatására a szerkezet oldalirányban is zsugorodik.

A deformáció és a szintérvkép is jól mutatja, hogy az egységek közötti kapcsolatok folyamatosak maradtak, a szerkezet egyenletesen terhelődik, ami a kvázi-stadikus, rugalmas viselkedést igazolja.

5.1.2. Erő-vezérelt szimuláció

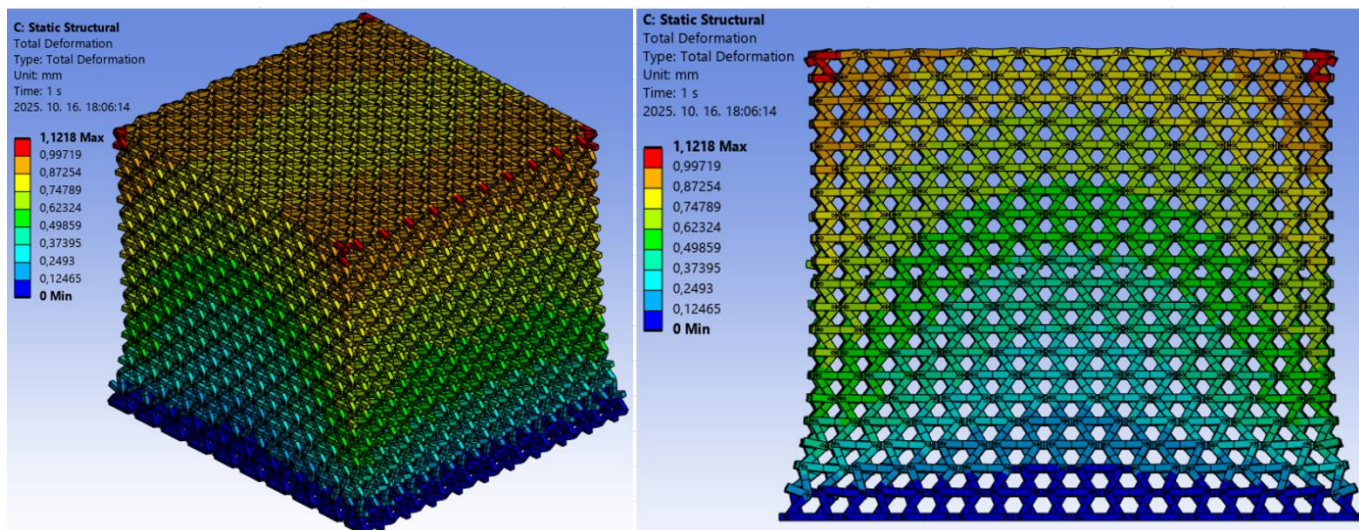
A displacement-vezérelt elemzések után azonos peremfeltételek mellett elvégeztem az erő-vezérelt szimulációkat, amelyeknél a felső felületre 5 N nagyságú nyomóerőt adtam meg. Az eredmények a 20. és 21. ábrán látható módon alakultak:



20. ábra

(a) Deformáció; (b) Elnyelt rugalmas energia; (c) Fellépő feszültségek nagysága 5N terhelésre a különböző méretű egységekből álló szerkezetekre

A deformációk (a) diagramja alapján megfigyelhető, hogy a szerkezeti egységek méretének csökkenésével a blokkok maximális elmozdulása fokozatosan csökkent (1,73 mm-ről 1,12 mm-re), míg az átlagos elmozdulás enyhe növekedést mutatott (0,44 mm-ről 0,50 mm-re). Ez arra utal, hogy a finomabb, több rúdelemből álló struktúrák egységei merevebben viselkednek, kevesebb deformációt szenvednek azonos külső terhelés mellett, mivel a belső rúdelemek nagy száma a terhelést hatékonyabban osztja el. A deformációs mező alakulására a 21. ábrán látható egy példa.



21. ábra

Deformációs mező 5 N terhelésre a 1000 db $1 \times 1 \times 1$ mm-es egységből felépített blokkon

A 21. ábrán látható deformációs mező szemléletesen mutatja be a blokkok teljes magassága mentén kialakuló elmozdulási gradienst. A legnagyobb alakváltozás a felső zónákban, különösen a sarkok környékén figyelhető meg, míg az alsó, befogott rétegek közel mozdulatlanok maradnak. Ahogy rétegenként lefelé haladunk, a deformáció fokozatosan csökken, ami arra utal, hogy a felsőbb rétegek jelentős mértékben elnyelik és eloszlatják a terhelésből származó energiát.

A (b) diagram a rugalmasan elnyelt energia alakulását szemlélteti, amely összességében növekvő tendenciát mutat (1,95 mJ-ról 2,10 mJ-ra). A görbe ugyan nem teljesen monoton, a $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ mm-es esetben kisebb visszaesés tapasztalható, ami a rúdelemek lokális merevségi és csomóponti kapcsolódási viszonyainak eltéréseire vezethető vissza. Ennél a méretaránynál a szerkezet olyan konfigurációt vesz fel, ahol a hajlítási és nyomási deformációk aránya megváltozik, a hajlítási deformációk részaránya csökken, így az energiaelnyelés átmenetileg csökken, majd a legkisebb egységekből álló blokknál viszont ismét dominánssá válnak a hajlítási komponensek, ami újra növeli a rugalmasan tárolt energia mennyiségét.

Megfigyelhető, hogy míg a 10%-os elmozdítással végzett vizsgálatok során a rugalmasan elnyelt energia a cellaméret csökkenésével monoton növekedést mutatott, addig az 5 N nagyságú erővel terhelt modellek esetében a tendencia nem teljesen folytonos: a $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ mm-es egységekből felépülő szerkezetnél visszaesés figyelhető meg. Ennek oka a két terhelési módszer közötti alapvető különbségben keresendő.

A displacement-vezérelt szimuláció során minden modell azonos mértékű deformációra kényszerül, így a reakcióerő és az energiafelvétel közvetlenül arányos a merevséggel. Az erő-vezérelt vizsgálatban azonban a deformáció szabadon alakul, ezért az energiaelnyelés nem kizárólag a globális merevségtől, hanem a rúdelemek lokális hajlítási viselkedésétől, a csomóponti kapcsolatok geometriájától, valamint a terheléeloszlás nemlinearitásától is függ.

Ez a nem monoton energiaeloszlás nem számítási probléma, hanem a szerkezet valós, nemlineáris deformációs karakterisztikáját tükrözi, amely az auxetikus rácsok egyik legfontosabb sajátossága. Ahol a deformáció kevésbé hajlítás-domináns, vagyis a hajlítási és nyomási komponensek aránya kiegyenlítettebb, ott a belső feszültségek eloszlása is egyenletesebb. Ez jól megfigyelhető a (c) diagramon is: azoknál a modelleknél, ahol kisebb Strain Energy érték adódott, kiegyenlítettebb feszültségeloszlás jelentkezett, amit a maximum és minimum lokális feszültségek közötti kisebb különbség is igazol.

A (c) diagram a szerkezetekben ébredő feszültségek eloszlását szemlélteti az 5 N nagyságú terhelés hatására. Itt ugyanaz figyelhető meg mint a 10% elmozdítással végzett szimulációk során: az átlagos direkt feszültség abszolút értéke a cellaméret csökkenésével fokozatosan növekszik, ami annak köszönhető, hogy a kisebb egységekből felépülő modellekben a terhelés több rúdelem között oszlik meg. Ez a megoszlás nagyobb átlagos igénybevételt eredményez az egyes rudakban, ugyanakkor a szerkezet egészére nézve egyenletesebb feszültségeloszlást biztosít.

Összességében a felületnyomásos vizsgálatok megmutatták, hogy a cellaméret csökkenésével a szerkezet globális merevsége mérséklődik, viszont a deformációs képessége és a rugalmas energiaelnyelése javul.

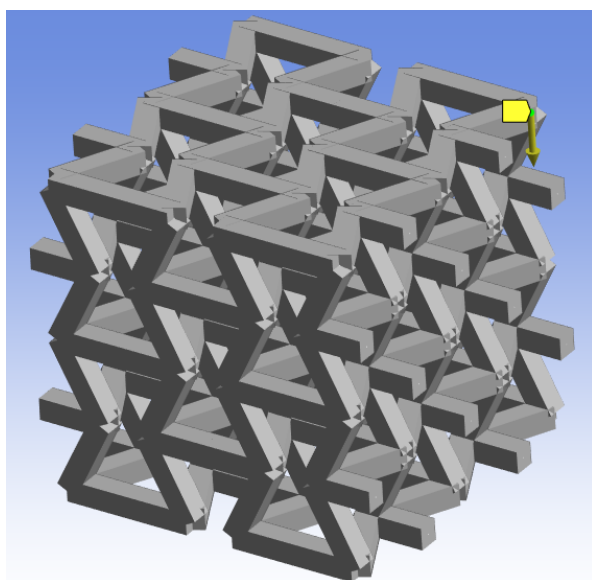
5.2. Saroknyomás

A második vizsgálati típus a szerkezet lokális terhelés alatti viselkedését elemezte, jelen esetben a blokkok egyik sarkára helyezett koncentrált nyomóterhelés hatására.

A saroknyomásos vizsgálatokat is hasonlóan a felületnyomáshoz két eltérő terhelési mód esetén végeztem el: egyrészt elmozdulás-vezérelt módon (10%-os elmozdítás), másrészt erő-

vezérelt módon (-0,5 N terhelés), hogy a szerkezetek lokális és globális válaszát egyaránt elemezhessem.

Mivel a szerkezetek rúdelemekből épültek fel, így minden szerkezeti elem középvonallal és csomóponti kapcsolattal rendelkezett. Ennek köszönhetően elegendő volt a terhelést egy darab sarokcsomópontra megadni, mivel a csatlakozó rúdelemek a terhelést automatikusan továbbították a teljes lokális tartományba. A rúdelem alapú modell tehát valóban reprezentálta a koncentrált terhelés fizikai hatását. Így nem volt szükség külön nyomófelület alkalmazására, a lokális igénybevétel valóban és numerikus stabilitással adódott át a rácsszerkezetre. A sarokcsomópontra adott terhelés helye és irányultsága a 22. ábrán látható.



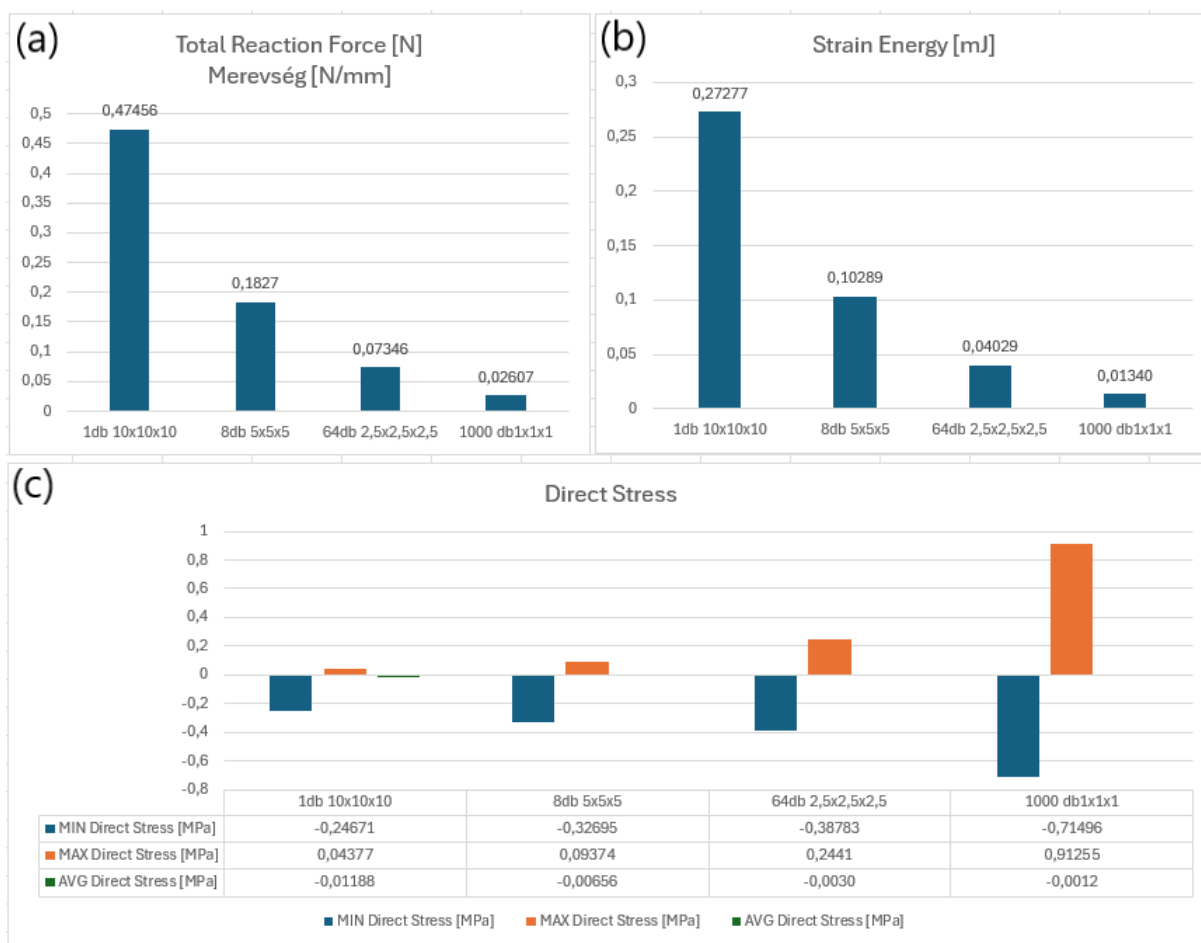
22. ábra
Sarokcsomópontra adott terhelés irányultsága (sárga nyíl)

A saroknyomás esetében a terhelés nem oszlik el egy nagy felületen, hanem egyetlen pontban koncentrálódik. Ez azt jelenti, hogy a sarkot alkotó rudak nem pusztán rugalmasan nyúlnak, hanem hajlítva és elfordulva deformálódnak, vagyis már a rugalmas tartományon belül is geometriai nemlinearitás lép fel. Ezért ezen szimulációk során a Large Deflection = ON opciót alkalmaztam, mivel a vizsgálat lokális jellegéből adódóan a sarkok környezetében már viszonylag kis terhelés esetén is jelentős geometriai deformáció lép fel. Valamint itt is Quasi-Static = ON beállítást alkalmaztam, hogy a terhelés fokozatos bevezetésével stabilabb numerikus konvergenciát és a deformációk reálisabb lefutását érjem el.

A nemlineáris (Large Deflection = ON) beállítás tehát a valós szerkezeti viselkedés pontosabb modellezését tette lehetővé, különösen a csomóponti feszültségek és a lokális instabilitások elemzéséhez.

5.2.1. Elmozdulás-vezérelt szimuláció

A sarokcsomópont 10%-os elmozdításának eredményeit a 23. ábra mutatja.



23. ábra

(a) Merevség; (b) Elnyelt rugalmas energia; (c) Fellépő feszültségek nagysága
10% elmozdítás esetén a különböző méretű egységekből álló szerkezetekre

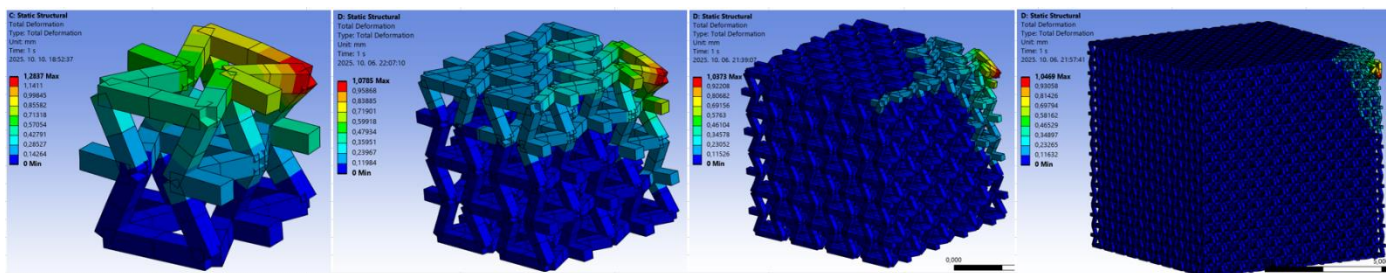
Az (a) diagramon látható értékekből egyértelműen kivehető, hogy a merevség drasztikusan csökkent a cellaméret csökkenésével: a legnagyobb, 10×10×10 mm-es egységből álló modell 0,474 N/mm értéket mutatott, míg a legfinomabb, 1000 db 1×1×1 mm-es egységből felépülő szerkezet esetében ez mindössze 0,026 N/mm-re esett vissza. Ez az arány több mint tizenhatszerez merevség csökkenést jelent, ami sokkal hangsúlyosabb, mint a felületnyomásos

vizsgálat esetén tapasztalt, fokozatosabb csökkenés. Ez a különbség abból adódik, hogy a saroknyomásos terhelésnél az erő nem egyenletesen oszlik el a felső felületen, hanem a sarokrégióban koncentrálódik, ezért a kisebb egységekből felépülő szerkezetek jóval rugalmasabban reagálnak és a deformáció főként lokális zónákban alakul ki.

Míg a felületnyomásos vizsgálat inkább a szerkezet globális viselkedését tükrözte, addig a saroknyomás egy lokális merevségvizsgálatnak tekinthető, amely sokkal érzékenyebben reagál a geometriából adódó finomításra.

A (b) diagramon látható Strain Energy értékek hasonló tendenciát követtek: a legnagyobb egységű modellben 0,273 mJ, míg a legfinomabb, 1000 cellás modellben mindössze 0,013 mJ volt az elnyelt rugalmas energia. Ez azt jelenti, hogy a kisebb egységmértű, sűrűbb rács a lokális sarokterhelés hatására könnyebben deformálódik, és a terhelést több rúd között osztja el.

Az energiaértékek nemlineáris csökkenése arra utal, hogy a terhelés során a rács struktúra egyre több eleme vesz részt rugalmas deformációban, de a lokális energiaelnyelés egy-egy zónára korlátozódik, így a teljes szerkezetre vetített Strain Energy kisebb marad. Ezt a viselkedést a 24. ábra is jól szemlélteti.



24. ábra

A deformáció térbeli eloszlása a különböző cellaméretű szerkezetek esetén saroknyomásra (10 % elmozdítás)

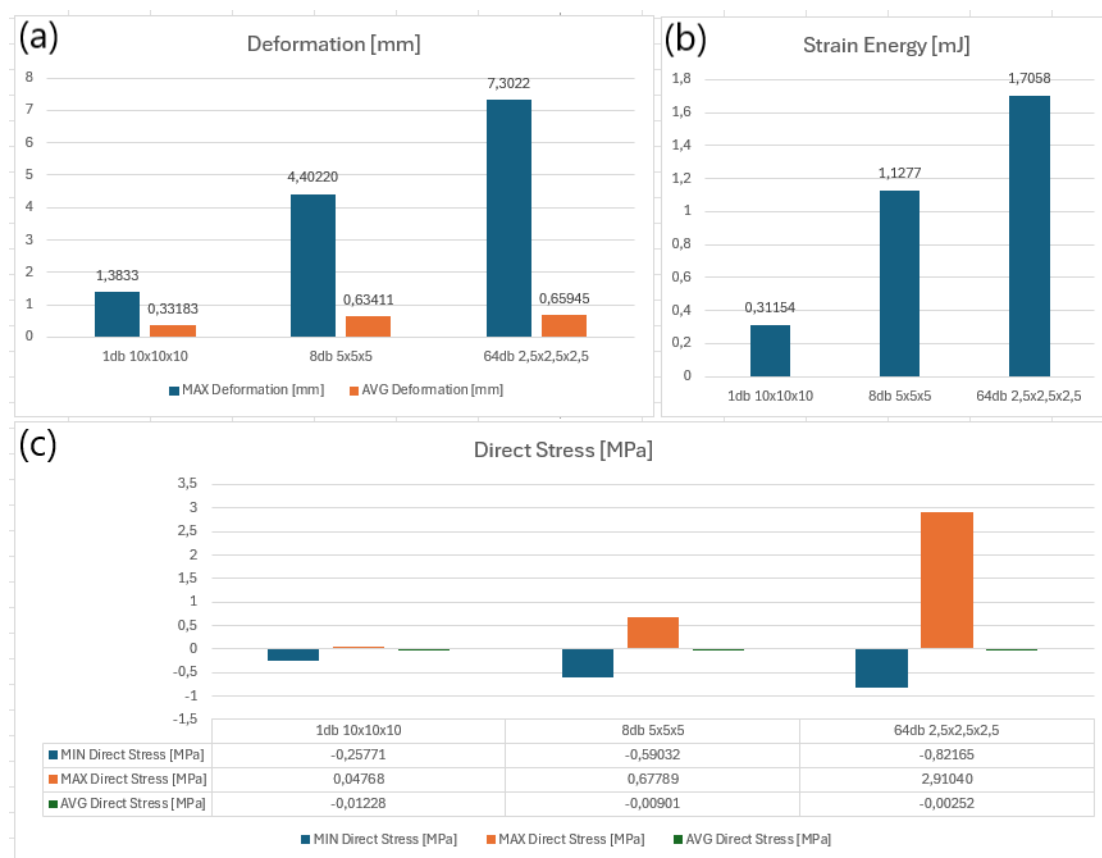
A cellaméret csökkenésével a deformáció eloszlása egyre lokálisabbá válik, amit a 0 mm elmozdulást jelölő sötétkék tartomány arányának növekedése is jól szemléltet. Ez azt jelenti, hogy a szerkezet nagyobb része marad szinte teljesen merev, mozdulatlan a terhelés hatására. Tehát a deformáció főként a sarok környezetében összpontosul, miközben a távolabbi egységek alig mozdulnak el. Ez azt eredményezi, hogy a teljes szerkezet elnyelt rugalmas energiája csökken.

A (c) diagram Direct Stress adatai alapján a cellaméret csökkenésével a maximális feszültség fokozatosan nő és a minimális feszültség is nagyobb abszolútértéket vesz fel, ugyanakkor az átlagos feszültség szinte változatlan marad. Ez arra utal, hogy a terhelés egyre lokálisabban adódik át. A sarokhoz közeli rudakban jelentős feszültségkoncentrációk alakulnak ki, míg a távolabbi elemek alig terhelődnek.

Tehát a cellaméret csökkenésével a szerkezet lokálisan nagyobb feszültségcsúcsokat mutat, miközben globálisan rugalmasabbá válik. Ez azt jelenti, hogy a finomabb, sűrűbb egységekből álló struktúrák jobban képesek elnyelni a terhelési energiát, mivel a deformáció néhány lokális zónára koncentrálódik, így ezek a geometriák hatékonyabb rezgés- és ütéscsillapító tulajdonságot mutatnak.

5.2.2. Erő-vezérelt szimuláció

A sarokcsomópontra adott $-0,5$ N terhelés eredményeit a 25. ábra mutatja.



25. ábra

(a) Deformáció; (b) Elnyelt rugalmas energia; (c) Fellépő feszültségek nagysága
0,5 N terhelés esetén a különböző méretű egységekből álló szerkezetekre

Az 1000 db 1x1x1 mm-es egységekből álló szerkezetnél a 0,5 N nagyságú terhelés egyetlen sarokcsomópontra túl nagyra bizonyult, ezért nem láthatóak rá eredmények. Kompromisszumot kellett kötnöm, hogy a többi egységek közötti látványosabb különbségeket mutassam be vagy pedig eredményeket kapjak a legkisebb egységekből álló szerkezetre is. Az első mellett döntöttem, hogy jobban kirajzolódjanak a különbségek a modellek között.

Az (a) diagramon látható, hogy az elmozdulások a cellaméret csökkenésével markánsan növekedtek: a 10×10×10-es modell 1,38 mm-es, míg a 2,5×2,5×2,5-ös modell 7,30 mm-es maximális deformációt mutatott, miközben az átlagos elmozdulás is fokozatosan növekedett, ami jól szemlélteti a rács finomodásával járó rugalmasság növekedését.

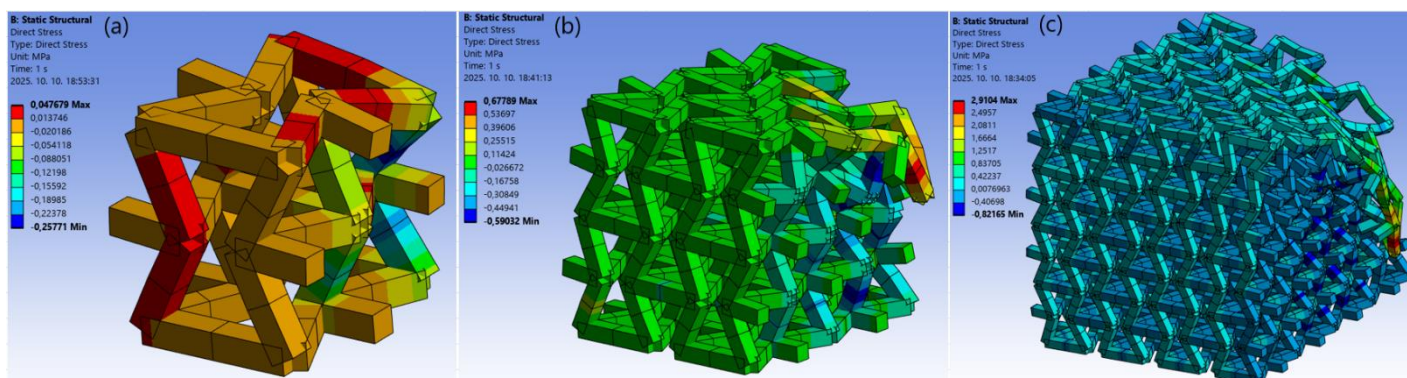
A maximum deformáció ellentétes trendet mutat a felületnyomásos vizsgálattal szemben, ahol 5 N erőhatás mellett az csökkent. Ennek oka, hogy a felületnyomás során a terhelés egyenletesen oszlott el a teljes felső felületen, így a több, kisebb egységből felépülő finom rácsszerkezet hatékonyabban tudta eloszlatni a terhelést, csökkentve a maximális elmozdulást. Ezzel szemben a saroknyomás pontszerű és lokalizált hatás, ezért a több rúdelemből álló struktúrák nagyobb lokális deformációt engedtek meg, mivel sokkal több rúdelem kapcsolódik be a terhelés hatására kialakuló lokális deformációba, így a szerkezet rugalmasabban reagál a koncentrált erőre.

A (b) diagramon szemléltetett rugalmasan elnyelt energia a cellaméret csökkenésével szintén növekszik (0,312 mJ-ról 1,706 mJ-ra), ami az erő-vezérelt terhelés természetéből adódik. Azonos erő hatására a finomabb rácsok nagyobb elmozdulást szenvednek, így a $U = \frac{1}{2} F * \Delta Y$ összefüggés szerint több energiát tárolnak rugalmas alakváltozás formájában. A nagyobb deformációs zónák aktiválódása miatt a teljes szerkezet nagyobb hányada vesz részt az energiátárolásban. Tehát a kisebb egységekből felépülő szerkezet hatékonyabban képes rugalmasan tárolni és elosztani a mechanikai energiát.

A (c) diagram a fellépő direkt feszültségek változását mutatja. Jól látható, hogy a maximum feszültségértékek a cellaméret csökkenésével erőteljesen növekednek, miközben a minimum feszültségek is csökkennek, tehát a feszültségtartomány szélesedik. Ez a kisebb egységek lokális igénybevételére és a rúdelemek csatlakozásainál kialakuló feszültségkoncentrációra vezethető vissza. Az átlagos direkt feszültség (AVG Direct Stress) ezzel szemben alig változik,

ami azt jelzi, hogy a terhelés globális szinten kiegyenlítetten oszlik el, de helyileg sokkal intenzívebb igénybevétel alakul ki.

A 26. ábrán vizuálisan is jól megfigyelhető, hogy a nagyobb egységek esetében a feszültségmező viszonylag egyenletes, míg a finomabb rácsoknál a sarok környezetében élesen kirajzolódó vörös-sárga zónák jelennek meg, miközben a távolabbi egységeken egyre kisebb feszültség figyelhető meg, ami a lokális túlterhelés jele.



26. ábra

(a) 1 db 10x10x10 mm egység; (b) 8 db 5x5x5 mm egység; (c) 64 db 2,5x2,5x2,5 mm egység
feszültség eloszlási mezője

Összességében megállapítható, hogy a cellaméret csökkenésével a szerkezet növekvő energiaelnyelő képességet és nagyobb lokális deformációt mutat, miközben a feszültségek egyre kisebb térfogatban koncentrálnak.

Mindkét vizsgálat alapján tehát megállapítható, hogy a kisebb egységű modellek rugalmasabb, de érzékenyebb szerkezeti viselkedést tanúsítanak pontszerű terhelés esetén, ami fontos szempont a rezgés csillapító és energiaelnyelő alkalmazások tervezésénél.

5.3. Modal és Harmonic response rezgés vizsgálatok

A statikus vizsgálatokat követően dinamikai elemzéseket is végeztem, amelyek a szerkezetek rezgési viselkedését és csillapítását vizsgálták.

A rezgés vizsgálatok szimulációját ANSYS-ban előre meghatározott Modal Analysis és Harmonic Response modulokban végeztem.

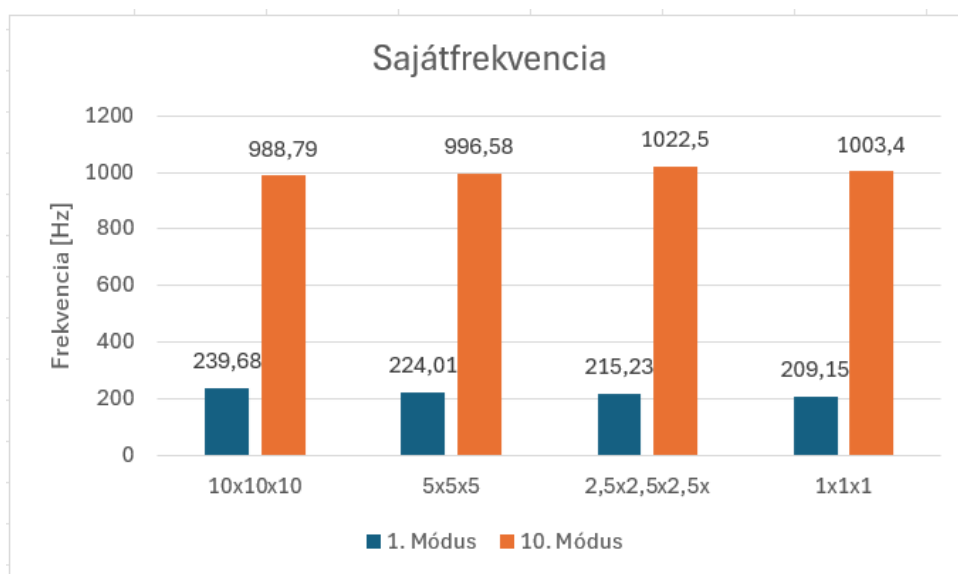
Elsőként vizsgált modális analízis célja a sajátfrekvenciák és módusalakok meghatározása volt, majd ezen eredmények betáplálása után elvégzett harmonikus válaszvizsgálat a különböző frekvenciákon bekövetkező elmozdulások amplitúdóját elemezte.

5.3.1. Modal Analysis

Tehát a Modal Analysis során a szerkezetek sajátfrekvenciáit és módusalakjait határoztam meg, amelyek a harmonikus válasz számítás alapját képezték. A vizsgálat célja annak feltérképezése volt, hogy a geometriai méretarányok változása miként befolyásolja a szerkezetek rezgési karakterisztikáját, valamint az alacsonyabb és magasabb frekvenciájú rezgésmódok viselkedését.

A számításokat minden modellnél 50 módusra végeztem el, hogy a legkisebb egységekből felépülő szerkezetek esetében is elérje a szimuláció a 2000 Hz-es felső frekvenciahatárt. Ezáltal a teljes vizsgált tartományában megfigyelhetővé váltak mind a globális, mind a lokális rezgésformák.

Az 1. és a 10. módushoz tartozó frekvenciák jól szemléltetik a szerkezetek dinamikai viselkedésének két jellemző végpontját. Az első módus a szerkezet egészének a globális kilengését mutatja, míg a 10. módus már a rúdelemek lokális rezgéseit jeleníti meg. A számított sajátfrekvenciák a 27. ábrán láthatóak.



27. ábra

Sajátfrekvenciák az 1. és 10. módus esetében különböző méretarányú szerkezetekre

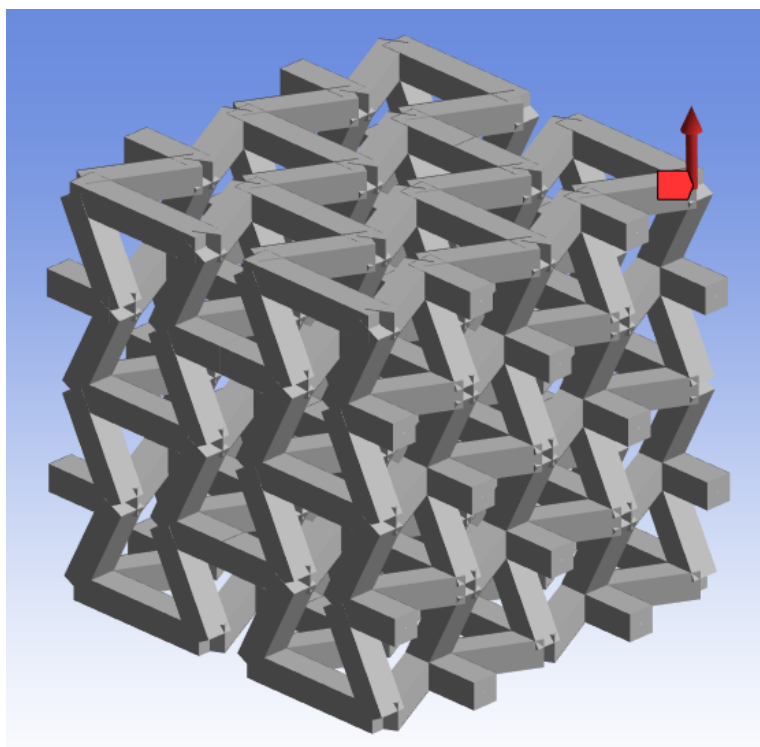
Megfigyelhető, hogy a cellaméret csökkenésével az első sajátfrekvencia enyhén csökkenő tendenciát mutat, ami a szerkezet globális merevségének csökkenését jelzi. Ez arra utal, hogy a kisebb cellaméretű, finomabb rácsszerkezetek globálisan lágyabbak, ugyanakkor ez a fokozott rugalmasság kedvezően befolyásolja a rezgéscsillapítási képességet.

Azonban a 10. módushoz tartozó frekvenciák nem mutattak monoton tendenciát ($10 \times 10 \times 10 < 5 \times 5 \times 5 < 2,5 \times 2,5 \times 2,5 > 1 \times 1 \times 1$), ami arra utal, hogy a magasabb rendű, lokális rezgésformák nemlineárisan függenek a geometriai méretaránytól.

Összességében a méretcsökkentés a szerkezet globális merevségét mérsékli, ugyanakkor dinamikai szempontból kedvezőbb, energiaelnyelőbb tulajdonságokat eredményez.

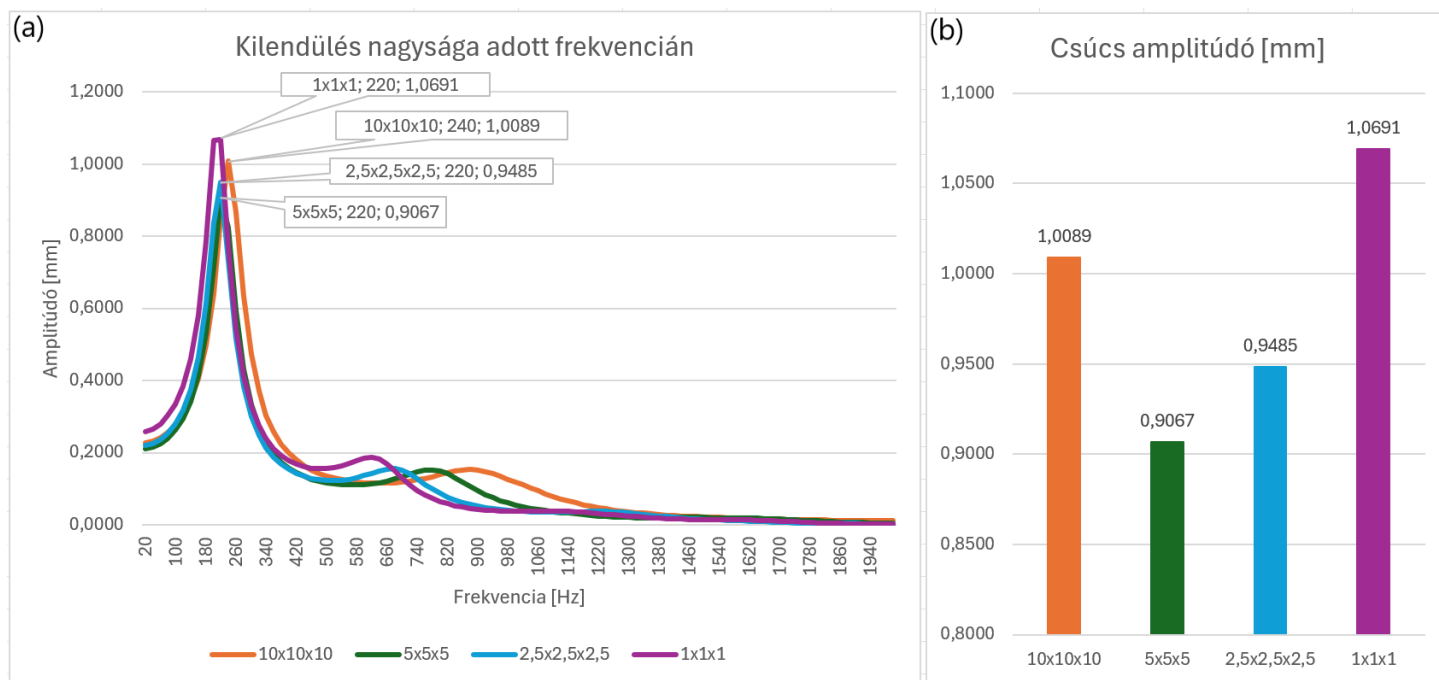
5.3.2. Harmonic Response

Az előbbi eredményekre építve végeztem el a Harmonic Response analízist, amely a különböző frekvenciájú szinuszos gerjesztésekre adott válaszokat vizsgálta. A vizsgálatok során a szerkezet egyik sarokcsomópontjára 1 N amplitúdójú harmonikus terhelést alkalmaztam, melynek helye és irányultsága a 28. ábrán látható.



28. ábra
Sarokcsomópontra adott 1 N nagyságú terhelés helye és irányultsága (Piros nyíl)

A teljes modell viselkedését az 0 – 2000 Hz közötti tartományban elemeztem. A számításokat az ANSYS Harmonic Response moduljában végeztem, a Modal Analysis során kapott módusalakokat felhasználva. Ezen eredmények a 29. ábrán láthatóak.



29. ábra

(a) Amplitúdó – frekvencia; (b) csúcs amplitúdó alakulása a különböző méretarányú szerkezetekre

Az (a) diagramról leolvasható, hogy a rezonancia csúcsok 200 – 250 Hz közötti tartományban jelentkeztek, ami megfelel az 1. módus sajátfrekvenciáinak. A csúcsfrekvenciák kisebb eltolódása (10×10×10 mm-es egységnél kb. 240 Hz, a többi esetben kb. 220 Hz) arra utal, hogy a cellaméret csökkenésével a szerkezetek globális merevsége enyhén mérséklődik, így a rezonanciafrekvencia alacsonyabb tartományba tolódik. Ez a viselkedés összhangban áll a modális analízis során tapasztaltakkal, miszerint a kisebb cellaméretű struktúrák rugalmasabbak.

A rezonanciagörbék alakja alapján megfigyelhető, hogy a 5×5×5 mm és 2,5×2,5×2,5 mm egységű szerkezetek esetében a rezonancia csúcsok alacsonyabbak, mint a nagyobb (10×10×10 mm) vagy legkisebb (1×1×1 mm) egységű modelleknél. Ez arra utal, hogy ezen közepes méretarányú struktúrák hatékonyabban csillapítják a rezgéseket, mivel a gerjesztési energia több lokális deformációs helyen oszlik el. A legkisebb egységű szerkezetnél viszont a túlzott rugalmasság miatt a rezonancia újra kiélesedett, tehát a csillapítás hatékonysága csökkent.

A (b) diagramon látható csúcs amplitúdók értékei 0,90 – 1,07 mm között alakultak. A legnagyobb amplitúdót (1,069 mm) az 1×1×1 mm-es cellákból álló modell mutatta, amely a legnagyobb deformációs hajlamot és a legerőteljesebb rezonanciaválaszt jelezte, míg a legkisebb csúcsamplitúdó (0,907 mm) a 5×5×5 mm-es egységű szerkezetnél jelentkezett. Ez utóbbi modell viselkedése mutatta a legkiegyensúlyozottabb dinamikai tulajdonságokat: kellően rugalmas volt ahhoz, hogy hatékonyan elnyelje és elossa a rezgési energiát, ugyanakkor nem vált túl lággyá, így a deformációk nem terjedtek át globálisan a teljes szerkezetre, és a rezonancia sem erősödött fel újra.

Azonban a magasabb frekvenciatartományban (800 – 1200 Hz) a 10×10×10 mm-es modell mutatta a legnagyobb amplitúdót, ez arra utal, hogy a merevebb, kevesebb rúdelemből álló szerkezet a magasabb rendű lokális rezgéseket kevésbé képes csillapítani. A kisebb egységméretű modellek esetében az amplitúdó jelentősen alacsonyabb maradt az egység méretek csökkenésével arányosan, amely azt jelzi, hogy a sűrűbb rácsszerkezetek több úton képesek elnyelni a rezgési energiát, ezáltal hatékonyabban csillapítják a magasabb frekvenciájú gerjesztéseket.

A rezonanciacsúcsok első előfordulása minden modellnél hasonló frekvenciatartományban (220 – 240 Hz) jelent meg, azonban a kisebb egységek esetében a következő rezonanciák korábban, alacsonyabb frekvenciákon keletkeztek és gyorsabban csengtek le a nagyobb egységekből álló szerkezetekhez képest. Ez azt jelzi, hogy a finomabb rácsszerkezetek sűrűbben elhelyezkedő sajátfrekvenciákkal és rövidebb lecsengési idővel rendelkeznek, amely a jobb rezgéscsillapítás egyik fontos jellemzője.

Összességében elmondható, hogy a finomított, de nem túlzottan sűrű rácsszerkezetek nyújtják a legoptimálisabb dinamikai viselkedést, míg a legkisebb egységméretűek a magasfrekvenciás vibrációk elnyelésében bizonyultak a leghatékonyabbnak. Ez arra utal, hogy a finomabb rácsszerkezetek nemcsak a rezonancia közelében, hanem a szélesebb frekvenciasávban is hatékonyabban csillapítják a vibrációt. Ez a kettős viselkedés különösen előnyös lehet olyan alkalmazásokban, ahol a széles frekvenciatartományú rezgéscsillapítás a cél.

6. Összefoglalás

A szakdolgozat célja az auxetikus, visszahajló (re-entrant) méhsejt-geometrián alapuló meta-anyag szerkezetek mechanikai és dinamikai viselkedésének vizsgálata volt, különös tekintettel a cellaméret hatására. A kutatás során négy, azonos mintázatú, de eltérő méretarányú egységből álló 3D modellt hoztam létre (10×10×10 mm, 5×5×5 mm, 2,5×2,5×2,5 mm és 1×1×1 mm), és ezek viselkedését ANSYS Workbench környezetben elemeztem.

A kvázi-statisztikus nyomóvizsgálatok eredményei alapján a cellaméret csökkenésével a globális merevség mérséklődött, ugyanakkor nőtt az energiaelnyelő képesség. A kisebb egységű szerkezetek lokálisabb deformációt és fokozott rugalmasságot mutattak, így a terhelés hatékonyabban oszlott el a rácsban. A saroknyomásos vizsgálatok megerősítették, hogy a terhelés lokálisan koncentrálódik, és a cellaméret csökkenésével a szerkezet nagyobb hányada marad szinte mozdulatlan, miközben a deformáció a terhelt zónában összpontosul. Tehát a sűrűbb struktúrák rugalmasabban viselkednek, jobban elnyelik az energiát, de érzékenyebbek a pontszerű terhelésekre.

A dinamikus vizsgálatok (Modal és Harmonic Response) kimutatták, hogy a cellaméret csökkenésével az első sajátfrekvenciák csökkennek, ami rugalmasabb, energiaelnyelőbb viselkedést jelez. A harmonikus válaszvizsgálat szerint a közepes egység méretű (5×5×5 mm és 2,5×2,5×2,5 mm) szerkezetek mutatták a legkiegyensúlyozottabb dinamikai tulajdonságokat, míg a legkisebb egységek a magasabb frekvenciatartományban biztosítottak hatékonyabb csillapítást. Ezek a finomabb rácsszerkezetek sűrűbben elhelyezkedő sajátfrekvenciákkal és gyorsabb lecsengési idővel rendelkeztek, ami jobb rezgéscsillapítást eredményezett szélesebb frekvenciatartományban.

Összességében a vizsgálatok igazolták, hogy az egységek geometriai méretaránya kulcsszerepet játszik az auxetikus meta-anyagok mechanikai és dinamikai tulajdonságainak alakításában. A közepes méretarányú egységből álló struktúrák biztosították az optimális kompromisszumot a merevség, energiaelnyelés és rezgéscsillapítás között, míg a legkisebb cellák hatékonyabbak voltak a magas frekvenciák csillapításában, a legnagyobbak pedig fokozott merevséget mutattak. A cellaméret paraméterének tudatos megválasztásával a meta-anyagok tulajdonságai célzottan hangolhatóak, ami ígéretes lehetőségeket teremt az adaptív, energiaelnyelő és rezgéscsillapító szerkezetek jövőbeli fejlesztésében.

7. Summary

The aim of this thesis was to investigate the mechanical and dynamic behaviour of auxetic, re-entrant honeycomb-based metamaterial structures, with particular focus on the effect of unit cell size. Four 3D models with identical patterns but different unit cell scales ($10\times 10\times 10$ mm, $5\times 5\times 5$ mm, $2.5\times 2.5\times 2.5$ mm, and $1\times 1\times 1$ mm) were developed and analysed in the ANSYS Workbench environment.

Based on the quasi-static compression analyses, a decrease in cell size led to a reduction in global stiffness while improving energy absorption capability. The smaller-scale unit based structures exhibited more localized deformation and greater flexibility, resulting in a more efficient distribution of load within the lattice. The corner-loading simulations confirmed that the load concentrated locally, and as the cell size decreased, a larger portion of the structure remained almost rigid while the deformation focused in the loaded region. Thus, denser structures behaved more flexibly and absorbed energy more effectively but were also more sensitive to concentrated loads.

The dynamic analyses (Modal and Harmonic Response) revealed that decreasing the cell size reduced the first natural frequencies, indicating more flexible and energy-absorbing behaviour. The harmonic response simulations showed that medium-scale unit based structures ($5\times 5\times 5$ mm and $2.5\times 2.5\times 2.5$ mm) exhibited the most balanced dynamic characteristics, while the smallest units provided more effective damping in higher frequency ranges. These finer lattices featured a denser distribution of natural frequencies and shorter decay times, resulting in enhanced vibration attenuation across a broader frequency spectrum.

Overall, the results confirmed that geometric scaling of the unit cells play a key role in tuning the mechanical and dynamic properties of auxetic metamaterials. The medium-scale unit configurations offered the best compromise between stiffness, energy absorption, and vibration damping, while the smallest cells were most effective at mitigating high-frequency vibrations and the largest ones provided greater stiffness. By carefully selecting the unit cell size, the properties of metamaterials can be precisely tailored, offering promising potential for the future development of adaptive, energy-absorbing, and vibration-damping structures.

8. Nyilatkozat

Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Szabó Krisztofer
Neptun-kódja:	CNM9LF
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	<input checked="" type="checkbox"/> BSc/BA <input type="checkbox"/> MSc/MA <input type="checkbox"/> Doktori (PhD) <input type="checkbox"/> Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	Szakdolgozat
A munka címe:	Meta-anyag vizsgálat szimulációs eszközökkel

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztens vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrektúra, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka mellékletében való csatolása szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott eszköz	MI-neve,	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet

	verziója, elérhetősége		bejegyzésének sorszáma

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

A MATE-K/13-12/2025 iktatószámú 11/2025 (VIII. 29.) számú rektori utasítás: a **MESTERSÉGES INTELLIGENCIA HASZNÁLATÁRÓL SZÓLÓ SZABÁLYZAT** hatályba lépése előtt 2025. szeptember 1. előtt az MI használata engedélyezett.

4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt:^{Godello}....., 2025. október hó²⁸..... nap

.....^{Székely}.....

Hallgató aláírása

.....^[Signature].....

Konzulens/Témavezető aláírása

MŰSZAKI INTÉZET
MECHATRONIKA ALAPSZAK
Gépipari mechatronika specializáció

SZAKDOLGOZAT
feladatlap

Stabó Krisztofer (CNM9LF)

részére

A szakdolgozat címe:

Meta-anyag vizsgálat szimulációs eszközökkel

Feladatkiírás:

Bevezetés, Szakirodalom feldolgozása, Probléma bemutatása, Különböző méretarányú egységekből felépülő 3D szerkezetek modellezése, ANSYS környezetben statikus és dinamikus szimulációknak elkészítése, össze foglalás

Közreműködő tanszék: Anyagtudományi- és Gépipari Folyamatok

Külső konzulens: -

Belső konzulens: *Dr. Pataki Tamás István, egyetemi docens, MATE - Műszaki Intézet*

Beadási határidő: 2025. november 04

Gödöllő, 2025. szeptember 08

Jóváhagyom

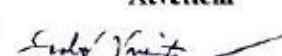


(tanszékvezető)



(szakfelelős)

Átvettem



(hallgató)

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2025.

(külső konzulens)

NYILATKOZAT

Alulírott Szabó Kintak, a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Szent István Campus, Mechatronikai mérnöki szak nappali/levelező* tagozat végzős hallgatója nyilatkozom, hogy a dolgozat saját munkám, melynek elkészítése során a felhasznált irodalmat korrekt módon, a jogi és etikai szabályok betartásával kezeltem. Hozzájárulok ahhoz, hogy Záródolgozatom/Szakedolgozatom/Diplomadolgozatom egyoldalas összefoglalója felkerüljön az Egyetem honlapjára és hogy a digitális verzióban (pdf formátumban) leadott dolgozatom elérhető legyen a témát vezető Tanszéken/Intézetben, illetve az Egyetem központi nyilvántartásában, a jogi és etikai szabályok teljes körű betartása mellett.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*

Kelt: Hód, 2025 év 10. hó 28. nap

Szabó Kint

Hallgató

NYILATKOZAT

A dolgozat készítőjének konzulense nyilatkozom arról, hogy a Záródolgozatom/Szakedolgozatom/Diplomadolgozatom áttekinttem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A Záródolgozatom/Szakedolgozatom/Diplomadolgozatom záróvizsgán történő védésre javaslom / nem javaslom*.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem*

Kelt: Gödöllő, 2025 év 10. hó 28. nap

[Signature]
Belső konzulens

*Kérjük a megfelelőt aláhúzni!

NYILATKOZAT

a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió¹ nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Szabó Kriszta
A Hallgató Neptun kódja: CNM9LF
A dolgozat címe: Meta-anyag vizsgolat simulációs eseményekkel
A megjelenés éve: 2025.
A tanszék neve: Agyagtudományi- és Geológiai Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió² egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, s az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a Záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdonkezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitóri rendszerébe.

Kelt: 2025 év 10. hó 28. nap

Szabó Kriszta
Hallgató aláírása

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törölendő.

² A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törölendő.

9. Irodalomjegyzék

- [1] A. K. A. A. a. A. E. Iyer, „Metamaterials and metasurfaces—Historical context, recent advances, and future directions,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 68.3, pp. 1223-1231, 2020.
- [2] R. e. a. Kumar, „Overview on metamaterial: History, types and applications,” *Materials Today: Proceedings* 56, pp. 3016-3024., 2022.
- [3] J. e. a. You, „Electromagnetic metamaterials: From classical to quantum,” *Electromagnetic Science* 1.1, pp. 1-33., 2023.
- [4] R. Grimberg, „Electromagnetic metamaterials,” *Materials Science and Engineering: B* 178.19, pp. 1285-1295., 2013.
- [5] N. e. a. Gao, „Acoustic metamaterials for noise reduction: a review,” *Advanced Materials Technologies* 7.6, p. 2100698., 2022.
- [6] M. R. a. M. D. G. Haberman, „Acoustic metamaterials,” *Physics Today* 69.6, pp. 42-48., 2016.
- [7] G. a. J. H. Ji, „Recent progress in acoustic metamaterials and active piezoelectric acoustic metamaterials—a review,” *Applied Materials Today* 26, p. 101260., 2022.
- [8] G. a. P. S. Ma, „Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons,” *Science advances* 2.2, p. e1501595., 2016.
- [9] J. G. D. a. J. H. Wang, „Thermal metamaterial: fundamental, application, and outlook,” *Isience* 23.10, 2020.
- [10] C. e. a. Fan, „Thermal metamaterials: from static to dynamic heat manipulation,” *Physics Reports* 1077, pp. 1-111., 2024.
- [11] Y. e. a. Li, „Transforming heat transfer with thermal metamaterials and devices,” *Nature Reviews Materials* 6.6, pp. 488-507., 2021.

-
- [12] S. R. a. B. L. Sklan, „Thermal metamaterials: functions and prospects.,” *National Science Review* 5.2, pp. 138-141., 2018.
- [13] J.-H. a. K. P. You, „Design and additive manufacturing of thermal metamaterial with high thermal resistance and cooling capability.,” *Additive Manufacturing* 41, p. 101947., 2021.
- [14] M. L. Z. a. A. K. G. Imran, „Advanced thermal metamaterial design for temperature control at the cloaked region.,” *Scientific Reports* 10.1, p. 11763., 2020.
- [15] X. e. a. Yu, „Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review.,” *Progress in Materials Science* 94, pp. 114-173., 2018.
- [16] E. M. S. a. L. P. Barchiesi, „Mechanical metamaterials: a state of the art.,” *Mathematics and Mechanics of Solids* 24.1, pp. 212-234., 2019.
- [17] A. A. Zadpoor, „Mechanical meta-materials.,” *Materials Horizons* 3.5, pp. 371-381., 2016.
- [18] J. U. e. a. Surjadi, „Mechanical metamaterials and their engineering applications.,” *Advanced Engineering Materials* 21.3, p. 1800864., 2019.
- [19] P. e. a. Jiao, „Mechanical metamaterials and beyond.,” *Nature communications* 14.1, p. 6004., 2023.
- [20] S. a. T. J. C. Liu, „Concepts, working principles, and applications of coding and programmable metamaterials.,” *Advanced optical materials* 5.22, p. 1700624., 2017.
- [21] J. e. a. Chen, „Metamaterials: from fundamental physics to intelligent design.,” *Interdisciplinary Materials* 2.1, pp. 5-29., 2023.
- [22] B. e. a. Wang, „Review of broadband metamaterial absorbers: from principles, design strategies, and tunable properties to functional applications.,” *Advanced Functional Materials* 33.14, p. 2213818., 2023.
- [23] J. e. a. Qi, „Recent progress in active mechanical metamaterials and construction principles.,” *Advanced Science* 9.1, p. 2102662., 2022.

- [24] C. e. a. Lu, „Architectural design and additive manufacturing of mechanical metamaterials: a review.,” *Engineering* 17, pp. 44-63., 2022.
- [25] P. e. a. Zhang, „Mechanical design and energy absorption performances of rational gradient lattice metamaterials.,” *Composite Structures* 277, p. 114606., 2021.
- [26] J. e. a. Bauer, „Nanolattices: an emerging class of mechanical metamaterials.,” *Advanced Materials* 29.40, p. 1701850., 2017.
- [27] W. W. S. e. a. Ma, „Multi-Physical Lattice Metamaterials Enabled by Additive Manufacturing: Design Principles, Interaction Mechanisms, and Multifunctional Applications.,” *Advanced Science*, p. 2405835., 2025.
- [28] W. e. a. Jiang, „Multifunctional 3D lattice metamaterials for vibration mitigation and energy absorption.,” *International Journal of Mechanical Sciences* 233, p. 107678., 2022.
- [29] H. Z. e. a. Zhong, „Design of conformal lattice metamaterials for additive manufacturing.,” *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 30, p. 101162., 2024.
- [30] Z. L. W. a. H. J. Zhai, „Mechanical metamaterials based on origami and kirigami.,” *Applied Physics Reviews* 8.4, 2021.
- [31] Z. e. a. Wang, „Origami-based reconfigurable metamaterials for tunable chirality.,” *Advanced materials* 29.27, p. 1700412., 2017.
- [32] J. C. Q. L. a. K. Y. Ji, „Vibration control based metamaterials and origami structures: a state-of-the-art review.,” *Mechanical Systems and Signal Processing* 161, p. 107945., 2021.
- [33] Z. e. a. Song, „Origami metamaterials for ultra-wideband and large-depth reflection modulation.,” *Nature Communications* 15.1, p. 3181., 2024.
- [34] M. e. a. Askari, „Additive manufacturing of metamaterials: A review.,” *Additive Manufacturing* 36, p. 101562., 2020.

-
- [35] V. a. Y. C. S. Harinarayana, „Two-photon lithography for three-dimensional fabrication in micro/nanoscale regime: A comprehensive review.,” *Optics & Laser Technology* 142, p. 107180., 2021.
- [36] J. e. a. Fan, „A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends.,” *Materials Today* 50, pp. 303-328., 2021.
- [37] Q. e. a. Jin, „Negative index metamaterial at ultraviolet range for subwavelength photolithography.,” *Nanophotonics* 11.8, pp. 1643-1651., 2022.
- [38] F. a. L. S. Bilotti, „Metamaterials: definitions, properties, applications, and FDTD-based modeling and simulation.,” *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* 22.4, pp. 422-438., 2012.
- [39] V. A. P. S. S. a. K. K. Jagota, „Finite element method: an overview.,” *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)* 10.1, pp. 1-8., 2013.
- [40] „Ansys Mechanical,” [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>. [Hozzáférés dátuma: 11. 05. 2025].
- [41] „Ansys HFSS,” [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. [Hozzáférés dátuma: 11. 05. 2025].
- [42] [Online]. Available: <https://xometry.eu/wp-content/uploads/2022/07/TPU-Polyurethane.pdf>.
- [43] R. e. a. Zu, „Tailor-made 3D printing TPU/PLA composites for damping and energy absorption.,” *Materials & Design* 252, p. 113752., 2025.
- [44] Y.-X. a. J.-Y. J. Xu, „Measurement of nonlinear Poisson’s ratio of thermoplastic polyurethanes under cyclic softening using 2D digital image correlation.,” *Polymers* 13.9, p. 1498., 2021.