



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS
TÉZISFÜZET

SZÉLES LEVENTE

Geometriai változtatások hatáselemzése az auxetikus lattice struktúrák tulajdonság javításának céljából

Témavezető: Dr. Horváth Richárd

**ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2025

Tartalomjegyzék

1	A kutatás előzményei	3
2	Célkitűzések	4
3	Vizsgálati módszerek.....	5
4	Új tudományos eredmények.....	6
4.1	Bevezető gondolatok.....	6
I.	Tézis:.....	7
II.	Tézis:	8
III.	Tézis	9
IV.	Tézis	10
5	Az eredmények hasznosítási lehetősége.....	11
6	Tézispontokhoz tartozó tudományos közlemények.....	13
7	Irodalmi hivatkozások listája.....	14



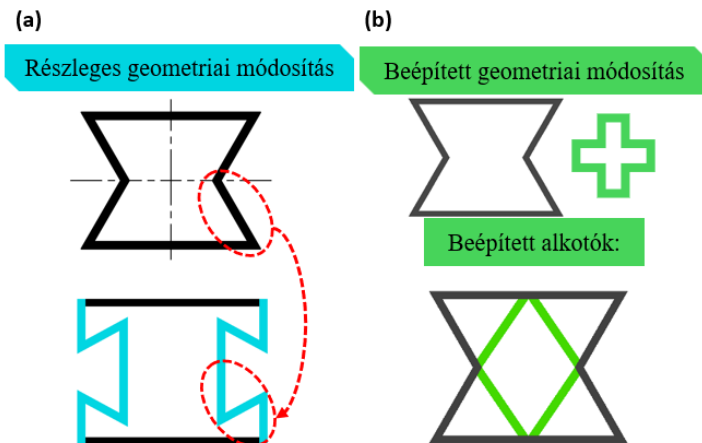
1 A kutatás előzményei

A hagyományos anyageltávolítás alapú gyártástechnológiák jelentősen korlátozzák a létrehozható alkatrészek alakját. Hagyományos technológiákkal nem hozhatók létre (többek között) rendezett, tervezet viselkedésű belső térkitöltő rácsszerkezetek, úgynevezett lattice szerkezetek. A lattice szerkezetek a metaanyagok szabályos elrendezésű csoportjába sorolhatók, periodikus porózus szerkezetek [1] (*a metaanyagok olyan anyafok melyek tulajdonsága nem az alkotó alapanyagtól, hanem a szerkezet felépítéstől függenek* [2]). A műszaki alkotásokkal szemben folyton fokozódó és bővülő követelményit a lattice szerkezetek kiemelkedő szilárdsága [3], energia felvevő képessége [4,5], zaj csillapító [6] és súlycsökkentő képessége [7] képes kielégíteni. Éppen ezért a lattice szerkezetek széles körben kerülnek alkalmazásra [8,9] [10]. Számos lattice szerkezet létezik, dolgozatomban a nagy népszerűségnek örvendő auxetikus méhsejt (másnéven homorú méhsejt) tulajdonságjavításával foglalkoztam. A legtöbb anyag összenyomás hatására kitágul, azonban az auxetikus anyagok összenyomás hatására összehúzódnak, azaz negatív a Poisson tényezőjük [11]. Az auxetikus anyagok kiemelkedő egyedi tulajdonságaik miatt, mint a növelt energia felvevő képessége [12,13], benyomódás állóság [14], és nagysebességű ütés állóság [15] örvendnek nagy népszerűségnek. A homorú méhsejt struktúra is rendelkezik a felsorolt kedvező tulajdonságokkal, azonban a homorú deformációs mechanizmusnak számos hátránya is van. A homorú deformációs mechanizmus kihajlásra hajlamos [16], valamint síkbeli merevségük csekély, így nagy teherbírást igénylő alkalmazásokra nem javasolt [17].

A homorú méhsejt struktúra tulajdonságainak javítására kutató társaim két módszeren alapulva hoztak létre új, javított geometriákat, A két lehetséges módszer a részleges geometriai módosításon alapuló módszer, amikor az elemi cella egyes alkotói kerülnek kiváltásra, míg a másik módszer a beépített geometriai módosítás, mely során további alkotókat építenek be az elemi cellába.

Az 1. (a) ábra egy részleges geometria módosítása mutat példát, ahol a homorú éleket „cikk-cakk” alakú élekre cserélték, növelve a szerkezet merevségét. Az 1. (b) ábra pedig beépített geometriai módosításra hoz példát, ahol a kutatók egy rombusz elemet építettek be, ezzel szintén növelve a homorú méhsejt stabilitását.





1. ábra. A homorú méhsejt struktúra lehetséges fejlesztési módjainak szemléltetése. (a) Részleges geometria módosítás, [18] alapján; (b) beépített geometria módosítás, [19] alapján.

Természetesen a geometriai módosítás mellett az anyagpárosítás alapú módszerek [20], kombinációs módszerek [21] és a grádiens tervezés [22] is hatásos tulajdonságjavulást eredményezhet. A megvizsgált fejlesztések, bár előnyösek, nem minden esetben javítottak a deformációs viselkedést, vagy tették a szerkezetet széleskörben alkalmazhatóvá.

2 Célkitűzések

Célkitűzéseim közt szerepel az alapvető geometriai paraméterek hatásának megismerését követően az auxetikus méhsejt szerkezet fejlesztése, egy széleskörben alkalmazható szerkezetté emelése, mely részletesebben az alábbiakat jelenti:

- Egy átfogó vizsgálati elrendezés kidolgozása, melyben olyan alapvető jellemzők, mint az elemszám hatása, az alkotók igénybevételi állapota és további paraméterek hatása összehasonlítható módon vizsgálható.
- A homorú méhsejt szerkezet kedvezőtlen tulajdonságainak javítási lehetőségeinek felmérése.
- A homorú méhsejt szerkezet deformációs stabilitásának növelése geometriai módosításokon keresztül több lépésben.

- A geometriai módosítások minden esetben paraméter jellemezettek kell legyenek, így a módosítás jóságát egy rendkívül széles tartományon tudom vizsgálni.
- Az elvégzett módosítások és paraméter hatáselemzés alapján tervezési, stabilizációs irányelvek megfogalmazása, melyek mentén folytatom a fejlesztést.
- Célom a homorú méhsejt esetében a paraméter független deformációs viselkedés elérése.
- A geometriai módosítások mellett az alapanyag alapú kitöltés, nevezetesen a szegmentált kitöltés hatás vizsgálata.

Az egyes fejlesztések vizsgálata egy rendkívül pontos végeselemes vizsgálati környezet felállítása, kiválthatóvá téve így a mintadarabok additív technológiákkal történő létrehozását, így felgyorsítva a fejlesztést.

3 Vizsgálati módszerek

A bemutatásra kerülő vizsgálati elrendezések és fejlesztések minden esetben additív gyártástechnológiákkal készültek. Az alapvető hatásvizsgálatokhoz készített mintadarabok porágyas, SLA technológiával, míg az új elemi cella kialakítások vizsgálatára készült mintadarabok tartályos fotópolimerizációval, pontosabban maszkolt sztereolitográfiával (mSLA) készültek. A nyomtatást minden esetben technológia specifikus utókezelés követte. A mintadarabokat zömítő vizsgálatoknak vettem alá, a vizsgálatokból mért és számított eredmények képezték a kiértékelések alapját. Dolgozatomban az egyes fejlesztéséhez egyedileg összeállított alapanyag keveréket szakítóvizsgálatoknak vettem alá az anyagtulajdonságok meghatározásának érdekében (EN ISO 527-2 szabvány szerint [142]). A mintadarabokat a valós zömítő vizsgálatok mellett végeselemes zömítő vizsgálatoknak is alávettem. A végeselemes környezet felállításánál a valós körülmények pontos reprezentálása volt a cél.



4 Új tudományos eredmények

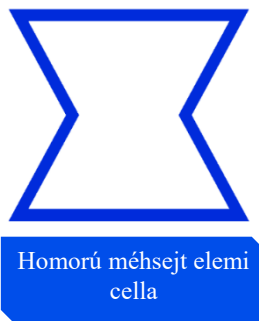
4.1 Bevezető gondolatok

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

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

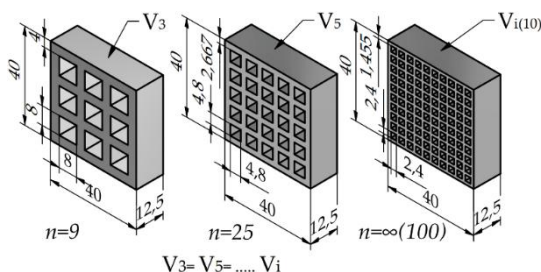
A homorú méhsejt struktúra deformációs viselkedése és más mechanikai tulajdonságai hatékonyan javíthatók, amennyiben a központi szerkezeti zóna hangsúlyosabb kialakítású.

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



I. Tézis:

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



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

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

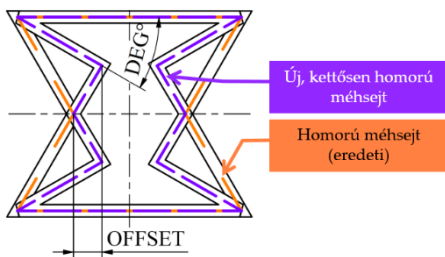
II. Tézis:

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

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

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

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

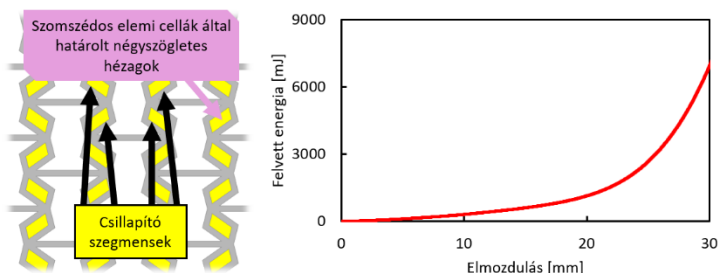


II. ábra. Az új kettősen homorú méhsejt struktúra származtatása, jellemzésre használt paraméterek bemutatása

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

III. Tézis

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



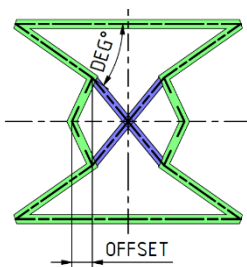
III. ábra. A kettősen homorú méhsejt szegmentált kitöltésének bemutatása, a csillapító szegmensek megszületése; a csillapító elemek beépítésével elért két-szegmentált energia felvevő karakterisztika.

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

IV. Tézis

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

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



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

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

5 Az eredmények hasznosítási lehetősége

Jelen értekezésemben alapvetően módszertanokat és konkrét fejlesztéseket mutattam be, eredményeim konkrét gyakorlati alkalmazásban vagy további kutatómunkák alapjaként hasznosulhatnak. A fraktál ihletésű kísérleti elrendezés egy remek példa arra kutatótársaim számára, hogy hogyan lehet eltérő fundamentális jellemzők között kapcsolatot teremteni, hatásukat párhuzamosan, összehasonlítható módon alkalmazni. A fraktál ihletésű vizsgálati tér számos más egyéb tudományterületen alkalmazható, vagy éppen kiterjeszthető a jelen vizsgálatom más lattice struktúrákra is.

A homorú méhsejt szerkezet az irodalmi áttekintésben bemutatottak szerint számos előnyös tulajdonsága mellett kihajlásra hajlamos így annak gyakorlati alkalmazása jelentős szimulációs és számítási előkészítő munkát igényel. Az értekezésemben bemutatott kettősen homorú méhsejt szerkezet megtartotta a szerkezet előnyös auxetikus deformációs viselkedését jelentős (több mint 50% mértékű) deformációs terhelés mellett, így minden olyan területen, ahol az auxetikus viselkedés, a jelentős energiafelvevő képesség fontos alkalmazható ez az új struktúra. A szegmentált kitöltés eredményeként létrehozott abszorber elemekkel ellátott szerkezet mind módszertani szempontból, mind gyakorlati szempontból hasznosítható. A szegmentált kitöltéssel kutató társaimnak megmutattam, hogy bár a kitöltés alapú tulajdonságjavítás egy aktívan kutatott terület, eltérve a trendektől (jelen esetben a részleges kitöltéssel) újszerű eredmények érhetők el. A szegmentált kitöltéssel egy programozható karakterisztika elérése volt a célom, az abszorber elemek épp úgy helyezkednek el, hogy azok csak később a terhelés előrehaladtával kapcsolódnak be a terhelésfelvételbe. Az eredményül megalkotott bimodális energiafelvételi karakterisztika hatékonyan alkalmazható például védtelen közlekedési résztvevők védelmére, ahol első lépésben az ütközési sebesség jelentős csökkentése, majd az ütközési energiafelvétel a cél. A megalkotott szerkezet a jövőben akár kisebb kísérleti járművek lengéscsillapítójaként is elképzelhető, mivel additív gyártástechnológiával gyártható, így akár a járművel együtt, utólagos szerelést nem igényelve is gyártható.

Kutatómunkám kezdetétől fogva célom volt az egyes lattice struktúrák széleskörű gyakorlati elterjedésének elérése. Ehhez paraméterfüggetlen deformációs viselkedést és paraméterek függvényében egyértelműen állítható mechanikai tulajdonságokat kellett elérnem. A kitűzött célt az x-merevítésű, kettősen homorú méhsejt struktúrával értem el. A



megalkotott struktúra deformációja önmagába zömülő, így a beépítése – betervezése során a tervező mérnöknek nem feladata komplex szimulációkat elvégeznie, a meghatározott terhelési értékekre pedig a geometria paraméterek segítségével állítja be a lattice struktúrát.

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

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



6 Tézispontokhoz tartozó tudományos közlemények

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



7 Irodalmi hivatkozások listája

- [1] A. Askari, M. Jamalzadeh, A Comprehensive Review of the Computational Methods for Determining the Mechanical Behavior of Lattice Metamaterials and Topology Optimization, (n.d.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11087.05284>.
- [2] V. Veselago, L. Braginsky, V. Shklover, C. Hafner, Negative Refractive Index Materials, J Comput Theor Nanosci 3 (2006) 189–218. <https://doi.org/10.1166/jctn.2006.3000>.
- [3] N.A. Fleck, V.S. Deshpande, M.F. Ashby, Micro-architected materials: past, present and future, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 466 (2010) 2495–2516. <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0215>.
- [4] H. Cho, D. Seo, D.N. Kim, Mechanics of auxetic materials, in: Handbook of Mechanics of Materials, Springer Singapore, 2019: pp. 733–757. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6884-3_25.
- [5] M. Shokri Rad, H. Hatami, R. Alipouri, A. Farokhi Nejad, F. Omidinasab, Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures, Mechanics and Industry 20 (2019). <https://doi.org/10.1051/meca/2019019>.
- [6] J. Liu, T. Chen, Y. Zhang, G. Wen, Q. Qing, H. Wang, R. Sedaghati, Y.M. Xie, On sound insulation of pyramidal lattice sandwich structure, Compos Struct 208 (2019) 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.013>.
- [7] A.H. Reddy, S. Davuluri, D. Boyina, 3D Printed Lattice Structures: A Brief Review, in: 2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), IEEE, 2020: pp. 02SAMA10-1-02SAMA10-5. <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309680>.
- [8] C. Wang, Y. Li, W. Zhao, S. Zou, G. Zhou, Y. Wang, Structure design and multi-objective optimization of a novel crash box based on biomimetic structure, Int J Mech Sci 138–139 (2018) 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.032>.
- [9] S. Yin, H. Chen, Y. Wu, Y. Li, J. Xu, Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood, Compos Struct 201 (2018) 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.038>.
- [10] A. Spadoni, M. Ruzzene, Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils, J Mech



- Mater Struct 2 (2007) 965–981.
<https://doi.org/10.2140/jomms.2007.2.965>.
- [11] K.E. Evans, Auxetic polymers: a new range of materials, Endeavour 15 (1991) 170–174. [https://doi.org/10.1016/0160-9327\(91\)90123-S](https://doi.org/10.1016/0160-9327(91)90123-S).
- [12] M. Shokri Rad, H. Hatami, R. Alipouri, A. Farokhi Nejad, F. Omidinasab, Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures, Mechanics & Industry 20 (2019) 302. <https://doi.org/10.1051/meca/2019019>.
- [13] H. Cho, D. Seo, D.-N. Kim, Mechanics of Auxetic Materials, in: Handbook of Mechanics of Materials, Springer Singapore, Singapore, 2019: pp. 733–757. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6884-3_25.
- [14] J. Li, Y. Wei, H. Wu, X. Shen, M. Yuan, Experimental crushing behavior and energy absorption of angular gradient honeycomb structures under quasi-static and dynamic compression, Defence Technology (2024). <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.02.002>.
- [15] R.P. Bohara, S. Linforth, T. Nguyen, A. Ghazlan, T. Ngo, Anti-blast and -impact performances of auxetic structures: A review of structures, materials, methods, and fabrications, Eng Struct 276 (2023) 115377. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115377>.
- [16] H. Cho, D. Seo, D.-N. Kim, Mechanics of Auxetic Materials, in: Handbook of Mechanics of Materials, Springer Singapore, Singapore, 2019: pp. 733–757. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6884-3_25.
- [17] Y. Prawoto, Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio, Comput Mater Sci 58 (2012) 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.012>.
- [18] Y. Zhu, Y. Luo, D. Gao, C. Yu, X. Ren, C. Zhang, In-plane elastic properties of a novel re-entrant auxetic honeycomb with zigzag inclined ligaments, Eng Struct 268 (2022) 114788. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114788>.
- [19] M.-H. Fu, Y. Chen, L.-L. Hu, Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs, Compos Struct 175 (2017) 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.007>.
- [20] S. Black, A. Tzagiollari, S. Mondal, N. Dunne, D.B. MacManus, Mechanical behaviour of gel-filled additively-manufactured lattice structures under quasi-static compressive loading, Mater



- Today Commun 35 (2023) 106164.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106164>.
- [21] R. Jafari Nedoushan, Y. An, W.-R. Yu, M.J. Abghary, Novel triangular auxetic honeycombs with enhanced stiffness, Compos Struct 277 (2021) 114605.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114605>.
- [22] A. Seharing, A.H. Azman, S. Abdullah, A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts, Advances in Mechanical Engineering 12 (2020) 168781402091695.
<https://doi.org/10.1177/1687814020916951>.

