

Proposing a Novel Merged Re-Entrant Polymeric Auxetic Metastructure Manufactured by Fused Filament Fabrication 3D Printing Process

Available in: <http://jips.ippi.ac.ir>

Iran. J. Polym. Sci. Technol.

(Persian),

Vol. 37, No. 5, 479-488

December 2024-January 2025

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2025.35647.2374

Rezgar Hasanzadeh^{1*}, Mehran Mojaver², Saman Jolaiy³, Taher Azdast²

1. Department of Mechanical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Postal Code: 6715685420
2. Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Postal Code: 5756 15151818, Urmia, Iran
3. School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Postal Code: 14399-57131, Tehran, Iran

Received: 30 January 2024, accepted: 17 May 2025

ABSTRACT

Hypothesis: Considering the increasing advancements in the field of 3D printers and their ability to produce complex structures, it is possible to produce auxetic structures with unique performance using this method. Additionally, integrating re-entrant unit cells within conventional re-entrant unit cells and achieving a novel merged re-entrant structure can lead to improved properties.

Methods: A novel re-entrant auxetic structure is presented in this study, which is designed by merging four small re-entrant unit cells into a larger re-entrant unit cell and produced by 3D printing. The larger re-entrant unit cell is a conventional re-entrant unit cell, in which the novel merged structure is created by embedding the smaller unit cells within its ligaments. For comparison, the conventional re-entrant structure was also designed, and 3D printed. The Poisson's ratios of both structures were measured and compared at different longitudinal strains (from 5% to 25%).

Findings: The results show that both structures have a negative Poisson's ratio and exhibit auxetic behavior. The novel merged re-entrant auxetic structure performed better at lower longitudinal strains (5%) compared to the conventional re-entrant auxetic structure, while at higher longitudinal strains (greater than 5%), the conventional re-entrant auxetic structure performed better. Additionally, the novel merged re-entrant auxetic structure demonstrated better capability in maintaining its shape at higher strains compared to the conventional structure. The highest negative Poisson's ratio values obtained in this study correspond to a longitudinal strain of 5%. In this case, the Poisson's ratio of the conventional re-entrant auxetic sample is -1.56, whereas the Poisson's ratio of the novel merged re-entrant auxetic sample is -1.58. These results indicate the high potential of the novel merged re-entrant auxetic structure in various engineering applications.

Keywords:

metastructure ,
3D printing,
auxetic,
re-entrant,
negative poisson's ratio

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: r.hasanzadeh@kut.ac.ir

Please cite this article using:

Hasanzadeh R, Mojaver M., Jolaiy S., Azdast T., Proposing a Novel Merged Re-Entrant Polymeric Auxetic Metastructure Manufactured by Fused Filament Fabrication 3D Printing Process, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 37, 479-488, 2025.

پیشنهاد دگر ساختار اکستیک پلیمری تورفته ادغامی نوین تولید شده با فرایند چاپ سه بعدی ساخت رشته مذاب

دسترسی پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و هفتم، شماره ۵،

صفحه ۴۸۸-۴۷۹، ۱۴۰۳

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2025.35647.2374

رزگار حسن زاده^{۱*}، مهران مجاور^۲، سامان جولایی^۳، طاهر ازدست^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی کرمانشاه، کرمانشاه، کد پستی ۶۷۱۵۶۸۵۴۲۰

۲- ارومیه، دانشگاه ارومیه، گروه مهندسی مکانیک، کد پستی ۵۷۵۶۱۵۱۸۱۸

۳- تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۱۴۳۹۹-۵۷۱۳۱

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲۷

چکیده

فرضیه: با توجه به پیشرفت‌های روزافزون در زمینه چاپگرهای سه بعدی و قابلیت آن‌ها در تولید ساختارهای پیچیده، امکان تولید ساختارهای اکستیک با عملکرد منحصر به فرد با این روش میسر است. همچنین ادغام سلول‌های واحد تورفته در داخل سلول‌های واحد تورفته مرسوم و دستیابی به ساختار نوین تورفته ادغامی می‌تواند سبب دستیابی به خواص بهبود یافته شود.

روش‌ها: ساختار نوین اکستیک تورفته در پژوهش حاضر ارائه شده است که با ادغام چهار سلول واحد تورفته کوچک در یک سلول واحد تورفته بزرگ‌تر طراحی و به وسیله چاپ سه بعدی تولید شده است. سلول واحد تورفته بزرگ، سلول واحد تورفته مرسوم است که با ادغام سلول‌های واحد کوچک‌تر در وسط رابط‌های آن، ساختار نوین ادغامی ایجاد شده است. برای مقایسه، ساختار تورفته مرسوم نیز طراحی و چاپ سه بعدی شده است. نسبت‌های پواسون هر دو ساختار در کرنش‌های طولی مختلف (از ۵٪ تا ۲۵٪) اندازه‌گیری و مقایسه شده است.

یافته‌ها: طبق نتایج، هر دو ساختار دارای نسبت پواسون منفی هستند و عملکرد اکستیک نشان می‌دهند. ساختار نوین در کرنش‌های طولی کمتر (۵٪) نسبت به ساختار مرسوم عملکرد بهتری داشته است، در حالی که در کرنش‌های طولی بیشتر (بیش از ۵٪)، ساختار مرسوم عملکرد بهتری داشته است. همچنین، ساختار نوین قابلیت بهتری در حفظ شکل ظاهری خود در کرنش‌های بیشتر نسبت به ساختار مرسوم داشته است. بیشترین مقادیر نسبت پواسون به دست آمده در پژوهش حاضر به کرنش طولی ۵٪ مربوط است. در این حالت، نسبت پواسون نمونه اکستیک تورفته مرسوم ۱/۵۶- است، در حالی که نسبت پواسون نمونه اکستیک تورفته ادغامی نوین ۱/۵۸- است. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت زیاد ساختار اکستیک تورفته ادغامی نوین در کاربردهای مختلف مهندسی است.

واژه‌های کلیدی

دگر ساختار،

چاپ سه بعدی،

اکستیک،

تورفته،

نسبت پواسون منفی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

r.hasanzadeh@kut.ac.ir

مقدمه

چاپ سه بعدی یکی از نوین ترین و پیشرفته ترین فناوری های ساخت و تولید است که در سال های اخیر توجه ویژه ای را در صنایع مختلف جلب کرده است. این فناوری با استفاده از لایه گذاری متوالی مواد، امکان ساخت قطعات پیچیده و با دقت زیاد را فراهم می آورد [۱،۲]. از جمله مواد پرکاربرد در این حوزه، پلیمرها هستند که به دلیل ویژگی های منحصر به فردی همچون وزن کم، مقاومت زیاد و قابلیت شکل پذیری آسان، گزینه ای آرمانی برای ساخت قطعات پلیمری با ساختار پیچیده به شمار می روند. یکی از مهم ترین مزایای استفاده از چاپ سه بعدی در ساخت قطعات پلیمری، کاهش شایان توجه زمان و هزینه های تولید است. برخلاف روش های سنتی که به قالب های پیچیده و ابزارهای متعدد نیاز دارند، چاپ سه بعدی به کمک فایلی دیجیتال می تواند قطعات را با دقت بسیار زیاد و بدون نیاز به ابزارهای اضافی تولید کند. این ویژگی به ویژه در مراحل پژوهش و توسعه و تولید نمونه های اولیه بسیار حائز اهمیت است [۳]. افزون بر این، چاپ سه بعدی امکان تولید قطعات با هندسه های پیچیده و ناممکن به وسیله روش های سنتی را فراهم می کند. این موضوع به طراحان و مهندسان امکان می دهد تا بدون محدودیت های سنتی، به خلق و طراحی ساختارهای نوین و کارآمد بپردازند. با توجه به تمام این مزایا، چاپ سه بعدی به عنوان فناوری پیشرو در ساخت قطعات پلیمری با ساختار پیچیده شناخته می شود و نقش مهمی در پیشبرد مرزهای علم و فناوری ایفا می کند. این فناوری نه تنها به بهبود فرایندهای تولید کمک می کند، بلکه افق های جدیدی را برای طراحی و ساخت قطعات پیچیده و منحصر به فرد فراهم می کند [۴].

ساختارهای آکستیک پلیمری به دلیل داشتن ویژگی های منحصر به فرد در دهه های اخیر توجه زیادی را جلب کرده اند. این ساختارها دارای نسبت پواسون منفی هستند، بدین معنا که در اثر کشش، عرض آنها افزایش می یابد و در اثر فشار، کاهش عرض می دهند. این ویژگی منحصر به فرد باعث شده است که ساختارهای آکستیک پلیمری در بسیاری از صنایع کاربردهای گسترده ای پیدا کنند [۵]. ساختارهای آکستیک به دلیل قابلیت جذب انرژی زیاد و توزیع یکنواخت تنش ها، می توانند به عنوان لایه های محافظ در جلیقه های ضد گلوله و تجهیزات نظامی استفاده شوند [۶]. همچنین، این ساختارها در صنعت پزشکی نیز کاربردهای فراوانی دارند. به عنوان مثال، در طراحی کاشتنه های پزشکی (implants) که به توزیع یکنواخت تنش ها و قابلیت تغییر شکل نیاز دارند، از این ساختارها استفاده می شود [۷]. در صنعت هوافضا نیز ساختارهای آکستیک پلیمری نقش مهمی ایفا می کنند. به دلیل وزن سبک و قابلیت

جذب انرژی زیاد، این ساختارها می توانند در طراحی قطعات سبک و مقاوم به کار گرفته شوند. این ویژگی ها به کاهش مصرف سوخت و افزایش بازدهی پرواز کمک می کنند [۸]. افزون بر این، در صنعت خودروسازی نیز استفاده از ساختارهای آکستیک می تواند به طراحی قطعات سبک تر و ایمن تر کمک کند که به نوبه خود موجب کاهش مصرف سوخت و افزایش ایمنی خودروها می شود [۹]. ساختارهای آکستیک تورفته به دلیل شکل هندسی خاص خود که شامل زاویه های منفی است، خواص مکانیکی منحصر به فردی دارند. این ساختارها با نسبت پواسون منفی، قابلیت گسترش در عرض به هنگام کشیدگی را نشان می دهند که به توزیع یکنواخت تنش ها و بهبود مقاومت مکانیکی منجر می شود [۱۰]. در این ساختارها، با استفاده از عناصر هندسی به گونه ای که زاویه های بین اجزای منفی باشد، می توان نسبت پواسون منفی را به دست آورد. این ویژگی ها، ساختارهای آکستیک تورفته را به گزینه مناسبی برای کاربردهای متنوع از جمله حفاظت بالستیک، کاشتنه های پزشکی و مواد جاذب انرژی تبدیل کرده است [۱۱،۱۲].

Mustahsan و همکاران [۱۳] ساختاری اصلاح شده از سلول های تورفته لانه زنبوری آکستیک با خواص جهت گیری بهبود یافته را با افزودن یک عضو افقی اضافی پیشنهاد دادند. آن ها نشان دادند، ساختار آکستیک اصلاح شده تورفته لانه زنبوری با عضو افقی اضافی می تواند نسبت پواسون منفی را بهبود بخشد. Gong و همکاران [۱۴] ساختار تورفته آنتی تراکایرال جدید معرفی کردند که بهبود شایان توجهی در نسبت پواسون منفی نشان می دهد و عملکرد مکانیکی آن را با شبیه سازی و اعتبارسنجی تجربی به نمایش گذاشتند. Shen و همکاران [۱۵] خواص مکانیکی ساختار لانه زنبوری تورفته جدید را تحت خمش بررسی کردند و دریافتند، این ساختار دارای تنش اولیه پیک کمتر و ظرفیت جذب انرژی بیشتری نسبت به ساختار کلاسیک لانه زنبوری تورفته است که فضای طراحی سازه های آکستیک را برای جذب انرژی و حفاظت در برابر ضربه گسترش می دهد. آن ها گزارش کردند، ساختار لانه زنبوری تورفته جدید در درون صفحه و نیز خارج از صفحه نسبت پواسون منفی و خواص خمش بهبود یافته ای نسبت به ساختارهای کلاسیک لانه زنبوری تورفته نشان می دهد. Chen و همکاران [۱۶] مجموعه ای از شبکه های آکستیک تورفته با سفتی بهبود یافته را پیشنهاد دادند که با افزودن یک تیغه تقویت کننده به سلول های واحد آکستیک تورفته معمولی، می تواند مدول یانگ را تا ۲۰۰٪ بهبود بخشد. بدون اینکه به طور قابل توجهی خاصیت آکستیک را تضعیف کند. اعتمادی و همکاران [۱۷] ساختارهای آکستیک جدیدی را طراحی و بررسی

مهندسی مکانیک نهفته است. نوآوری‌های این پژوهش می‌تواند به طراحی و تولید مواد با خواص مکانیکی بهینه‌تر و کاربردهای گسترده‌تر کمک کند و راهکارهای جدیدی برای چالش‌های موجود در طراحی و ساخت مواد آکستیک ارائه دهد.

تجربی

مواد

برای تولید نمونه‌ها از رشته (filament) گرمانرم پلی‌یورتان ساخت شرکت eSUN با نام تجاری TPU 95A استفاده شد که دلیل انتخاب این ماده، خاصیت شکل‌پذیری زیاد آن برای اعمال کرنش‌های زیاد بود. این رشته با استحکام کششی ۳۵ MPa، ازدیاد طول ۸۰۰٪ و چگالی 1.21 g/cm^3 بود. همچنین، شاخص جریان مذاب این رشته 1.2 g/10 min (190°C , 2.16 kg) گزارش شده است.

طراحی ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین

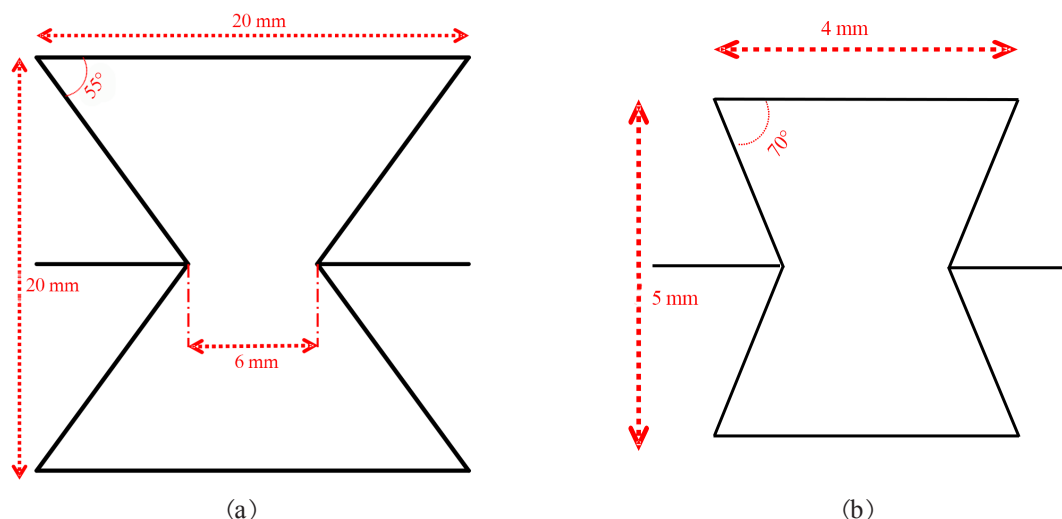
ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین ارائه‌شده در پژوهش حاضر، براساس ساختار آکستیک تورفته مرسوم طراحی شده که سلول واحد این ساختار تورفته مرسوم در شکل ۱ آمده است. ابعاد کلی این سلول واحد 20×20 برحسب میلی‌متر است که با رابط‌هایی که با خط افق زاویه 55° می‌سازند، به همدیگر متصل شده‌اند. در یک طراحی نوآورانه، چهار سلول واحد تورفته در این سلول واحد مرسوم ادغام شدند که شکل ۱ ابعاد سلول واحد ادغامی را نشان می‌دهد. این سلول واحد دارای ابعاد کلی $5 \times 4 \text{ mm}$ است که رابط‌های آن با خط افق زاویه 70° می‌سازند. ابعاد این سلول واحد به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که در رابط‌های سلول واحد مرسوم در نظر گرفته‌شده، جا داده شود و در راستای امتداد رابط قرار گیرد.

شکل ۲ سلول واحد آکستیک تورفته ادغامی نوین ارائه‌شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. شکل ۲ (a) یک سلول واحد تورفته مرسوم مطابق ابعاد ارائه‌شده در شکل ۱ (a) است. در وسط رابط‌های این سلول واحد (محل‌های مشخص‌شده با مستطیل‌های خط‌چین)، سلول‌های واحد در نظر گرفته‌شده در شکل ۱ (b) ادغام شدند. شکل ۲ (b)، سلول واحد آکستیک تورفته ادغامی نوین را نشان می‌دهد. ابعاد کلی این سلول واحد برابر با ابعاد سلول واحد تورفته مرسوم در نظر گرفته شد ($20 \times 20 \text{ mm}$) تا امکان مقایسه عملکرد سلول واحد آکستیک تورفته ادغامی نوین با سلول واحد تورفته مرسوم فراهم شود. رابط‌های هر سلول واحد نیز خطوطی با طول $4/2 \text{ mm}$ بودند که با

کردند که براساس اصلاح سلول واحد تورفته مرسوم بودند. آن‌ها دریافتند، این ساختارهای اصلاح‌شده، به‌طور شایان توجهی جذب انرژی و قابلیت‌های جذب انرژی ویژه بهبودیافته‌ای را نسبت به ساختار تورفته سنتی نشان می‌دهند. دگر ساختارهای آکستیک تورفته اصلاح‌شده با رابط‌های منحنی، جذب انرژی و نسبت پواسون منفی بهتری را نسبت به ساختارهای تورفته مرسوم نشان می‌دهند.

Yu و همکاران [۱۸] رفتارهای مکانیکی ساختار لانه‌زنبوری شش‌ضلعی تورفته پر شده با اسفنج با نسبت پواسون منفی را تحت فشار صفحه‌ای به‌طور تجربی و عددی بررسی کردند و دریافتند، لانه‌زنبوری پر شده با اسفنج قابلیت جذب انرژی ویژه بیشتری نسبت به لانه‌زنبوری خالی دارد. Ghavidelnia و همکاران [۱۹] مطالعه‌ای تحلیلی، عددی و تجربی از ساختار مکانیکی آکستیک با طراحی سلول واحد تورفته ارائه دادند و روابطی را برای خواص مکانیکی آن از جمله مدول کشسانی، نسبت پواسون و تنش تسلیم به‌عنوان توابع پارامترهای هندسی استخراج کردند. Bronder و همکاران [۲۰] مطالعه‌ای برای طراحی ساختار آکستیک تورفته چندکاره ارائه دادند و اثر سه پارامتر هندسی بر ظرفیت جذب انرژی و نسبت پواسون را با شبیه‌سازی اجزای محدود و آزمایش‌های فشاری تجربی نمونه‌های آلومینیمی تولیدشده با روش ساخت افزایشی بررسی کردند. Zhang و همکاران [۲۱] دگر ساختارهای سلسله‌مراتبی جدید با ساختار تورفته و سلول‌های فرعی ستاره‌ای شکل با نسبت پواسون منفی تنظیم‌پذیر طراحی کردند و رفتار مکانیکی درون‌صفحه‌ای آن را با استفاده از تحلیل اجزای محدود بررسی کرده در حالی که اثر پارامترهای طراحی بر خواص مکانیکی را نیز ارزیابی کردند. Yao و همکاران [۲۲] خواص مکانیکی ساختار لانه‌زنبوری تورفته با زاویه‌های بازگشتی مختلف را طراحی ساخت و بررسی کردند که دامنه‌ای از نسبت‌های پواسون از منفی تا مثبت را نشان می‌دهد.

در پژوهش حاضر با معرفی ساختار نوین آکستیک تورفته با ادغام سلول‌های واحد تورفته کوچک در یک سلول واحد بزرگ‌تر، گامی مهم در بهبود و توسعه خواص مکانیکی این نوع ساختارها برداشته شد. این ساختار نوین نه تنها از نظر طراحی هندسی و ساختار داخلی نوآورانه بوده، بلکه به‌کمک فناوری چاپ سه‌بعدی تولید شده است که امکان ساخت دقیق و پیچیده این نوع ساختارها را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، مقایسه نسبت‌های پواسون در کرنش‌های طولی مختلف بین ساختار تورفته مرسوم و ساختار نوین، هدف مطالعه و ارزیابی این ساختارهاست. اهمیت این پژوهش در ارائه راهکارهای جدید برای بهبود عملکرد مواد آکستیک و کاربردهای گسترده‌تر در صنایع مختلف از جمله هوافضا، پزشکی و



شکل ۱- (a) سلول واحد ساختار آکستیک تورفته مرسوم و سلول واحد تورفته ادغامی (b) در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر.
Fig. 1. (a) Unit cell of conventional re-entrant auxetic structure and (b) merging re-entrant unit cell considered in this study.

شده و با استفاده از Creality Print Slicer آماده تولید شدند. شرایط فرایندی تولید نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است. از افشانک (nozzle) با قطر ۰/۴ mm برای چاپ نمونه‌ها استفاده شد و ارتفاع لایه‌ها روی ۰/۲ mm تنظیم شد. سرعت چاپ و سرعت فن خنک‌کاری به ترتیب روی ۵۰ mm/s و ۱۰۰٪ تنظیم شدند. دماهای صفحه گرم و افشانک نیز روی ۶۰ و ۲۳۰ °C قرار داده شدند.

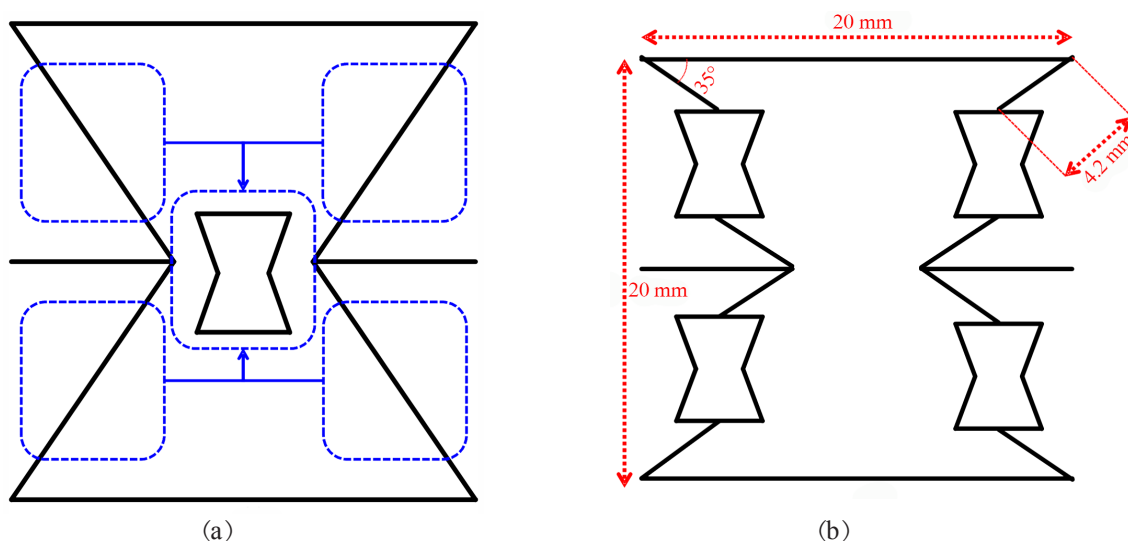
شکل ۴ (a) نمونه‌های چاپ سه‌بعدی ساختار آکستیک تورفته مرسوم و شکل ۴ (b) نمونه‌های چاپ سه‌بعدی ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین را نشان می‌دهد. بخش آکستیک چاپ شده دارای

خط افق زاویه ۳۵° می‌سازند.

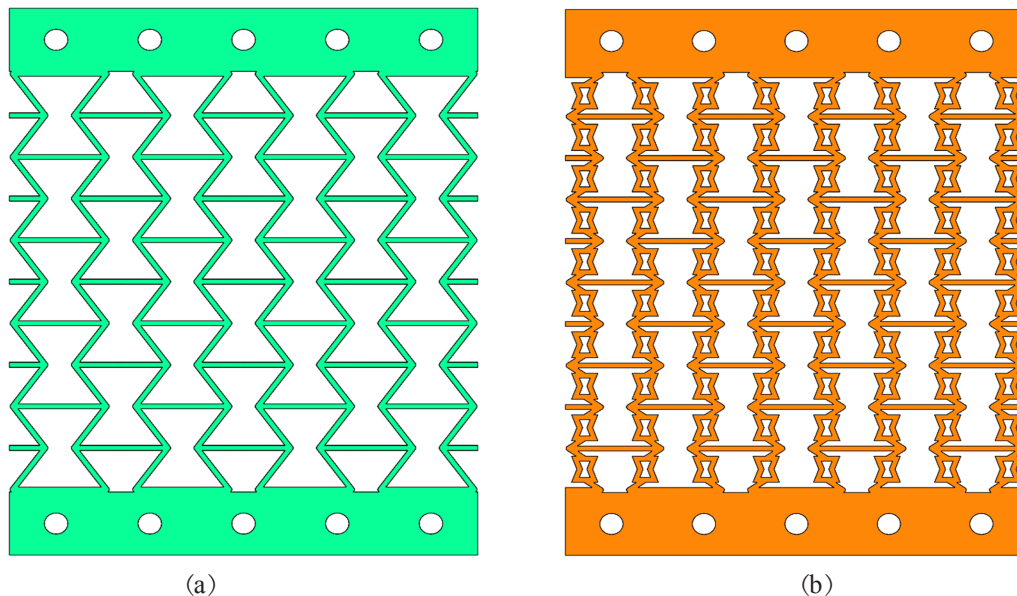
با گسترش این سلول‌های واحد در دو راستای عمود بر هم، ساختارهای آکستیک کلی به دست آمدند که شکل ۳ (a)، ساختار آکستیک تورفته مرسوم و شکل ۳ (b)، ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین را نشان می‌دهد.

چاپ سه‌بعدی

برای تولید نمونه‌ها از یک چاپگر سه‌بعدی CR-10 Smart شرکت Creality استفاده شد. نمونه‌ها در نرم‌افزار SolidWorks طراحی



شکل ۲- سلول واحد آکستیک تورفته ادغامی نوین ارائه شده در پژوهش حاضر.
Fig. 2. Novel merging re-entrant auxetic unit cell proposed in this study.



شکل ۳- (a) ساختار آکستیک تورفته مرسوم در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر و (b) ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین پیشنهادی در پژوهش حاضر.

Fig. 3. (a) Conventional re-entrant auxetic structure considered in this study and (b) novel merging re-entrant auxetic structure proposed in this study.

پواسون معمولاً مثبت است، بدین معنا که با افزایش طول ماده، عرض آن کاهش می‌یابد و برعکس [۲۴]. اما در ساختارهای آکستیک، نسبت پواسون منفی است، یعنی با افزایش طول، عرض آن افزایش و با کاهش طول، عرض آن کاهش می‌یابد [۲۵، ۲۶]. این خاصیت منحصربه‌فرد باعث می‌شود که مواد آکستیک در برابر کشش و فشار، رفتار مکانیکی متفاوتی نشان دهند. برای بررسی نسبت پواسون ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین، کرنش‌های طولی مختلفی از ۵٪ تا ۲۵٪ با گام‌های ۵٪ به نمونه‌های چاپ شده ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین و ساختار آکستیک تورفته مرسوم اعمال می‌شود و نسبت‌های پواسون آن‌ها در کرنش‌های طولی مختلف اندازه‌گیری شده و با همدیگر مقایسه می‌شوند. برای محاسبه نسبت‌های پواسون از سازوکار طراحی و ساخته شده توسط نویسندگان استفاده شد. جزئیات این سازوکار به همراه تصاویر مربوط در مقاله قبلی نویسندگان [۵] ارائه شده است. این سازوکار شامل یک صفحه به عنوان بستر است که نمونه‌ها روی آن قرار گرفته و با استفاده از گیره‌هایی (pin)، کرنش‌های مختلف به آن اعمال می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، در بالا و پایین نمونه‌ها پنج سوراخ تعبیه شده است که این سوراخ‌ها برای بستن گیره‌ها قرار داده شده است. پس از اعمال کرنش‌های مختلف، تغییرات عرض نمونه‌ها با استفاده از یک کولیس series 1108, INSIZE Co, Ltd با دقت

ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ mm و ضخامت نمونه‌ها ۳/۶ mm بوده و عرض هر یک از رابط‌ها ۱/۲ mm است.

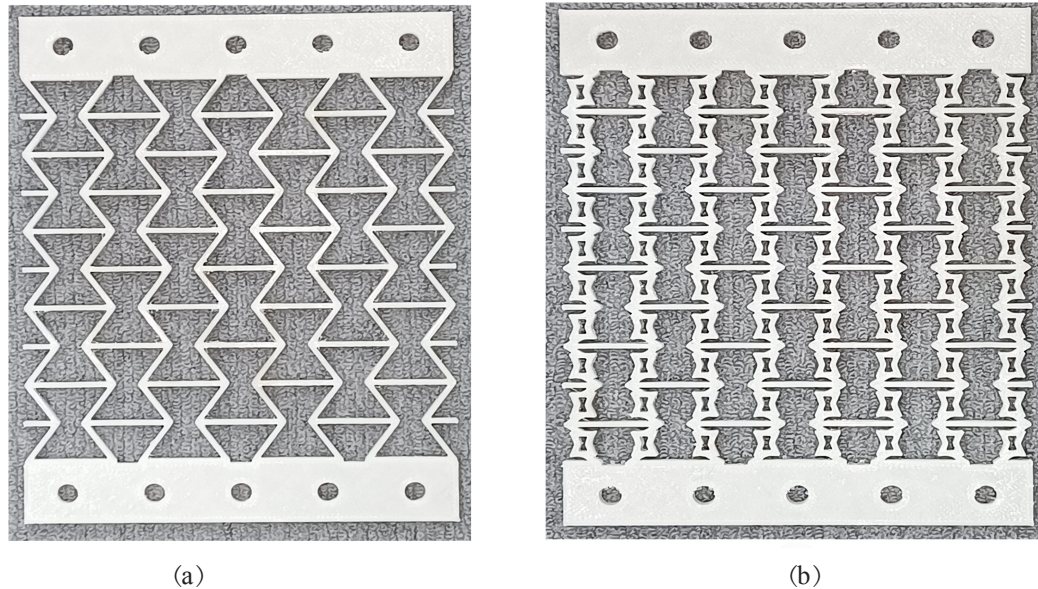
بررسی خواص

ساختارهای آکستیک در مقایسه با ساختارهای معمولی دارای ویژگی‌های متفاوتی از نظر نسبت پواسون هستند [۲۳]. به همین دلیل، نسبت پواسون یکی از مهم‌ترین خواص برای بررسی خواص ساختارهای آکستیک است که عملکرد متمایز ساختارهای آکستیک نیز به همین خاصیت برمی‌گردد. در ساختارهای معمولی، نسبت

جدول ۱- شرایط فرایندی چاپ سه‌بعدی نمونه‌ها.

Table 1. 3D printing processing conditions of samples.

Parameter	Value
Nozzle diameter (mm)	0.4
Layer height (mm)	0.2
Printing speed (mm/s)	50
Nozzle temperature (°C)	230
Heat bed temperature (°C)	60
Cooling fan speed (%)	100



شکل ۴- نمونه چاپ سه‌بعدی (a) ساختار آکستیک تورفته مرسوم و (b) ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین.

Fig. 4. 3D printed sample of (a) conventional re-entrant auxetic structure and (b) novel merged re-entrant auxetic structure.

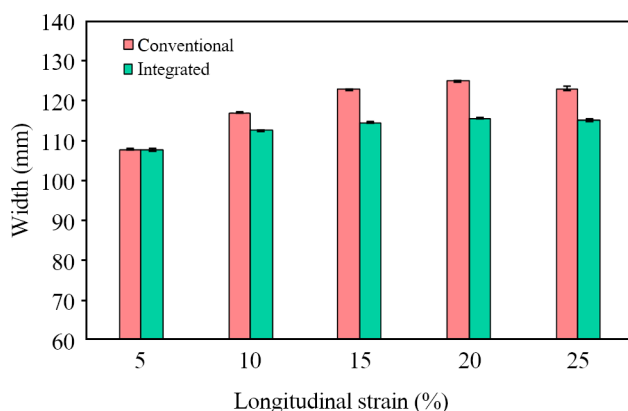
تورفته ادغامی نوین و نیز در نمونه‌های آکستیک تورفته مرسوم افزایش می‌یابد. همچنین شایان ذکر است، در کرنش طولی ۵٪، کرنش‌های عرضی نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک ادغامی مرسوم تقریباً با هم برابر هستند و در کرنش‌های طولی دیگر، کرنش عرضی نمونه‌های آکستیک تورفته مرسوم بیشتر از آکستیک تورفته ادغامی نوین است. شکل ۸ تعدادی از نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم را در کرنش‌های طولی ۱۵٪ و ۲۰٪ نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل نمونه‌ها مشخص است،

۰/۱ mm اندازه‌گیری شده و نسبت‌های پواسون محاسبه شد.

نتایج و بحث

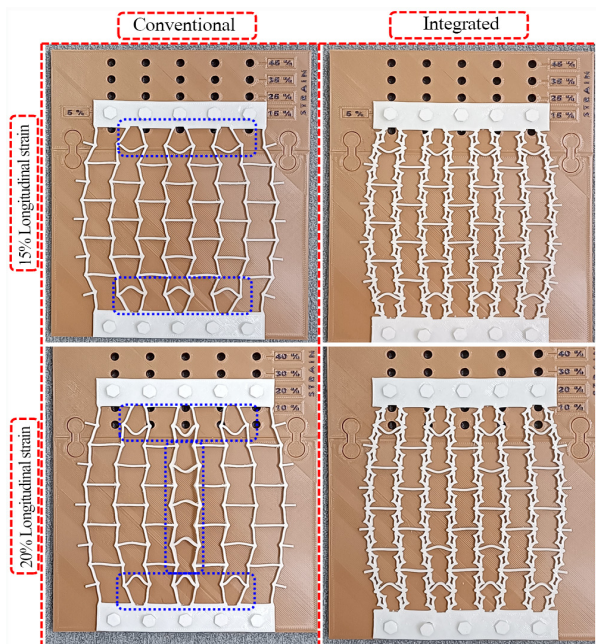
با اعمال کرنش‌های طولی مختلف ۵٪ تا ۲۵٪، مقدار تغییرات عرضی نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم اندازه‌گیری شد که این مقادیر در شکل ۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است، در هر حالت، سه نمونه آزمایش شد و میانگین نتایج این سه نمونه به‌عنوان داده نهایی گزارش شد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، عرض تمام نمونه‌ها در همه کرنش‌های طولی، افزایش یافته است و بیشتر از عرض اولیه نمونه‌هاست (۱۰۰ mm). این افزایش عرض با افزایش طول نمونه‌ها، حکایت از عملکرد آکستیک نمونه‌ها دارد. شکل ۶ تعدادی از نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم را در کرنش‌های طولی ۵٪ و ۱۰٪ نشان می‌دهد که به‌صورت ظاهری نیز مشخص است، نمونه‌ها افزایش عرض داشته‌اند.

شکل ۷ کرنش‌های عرضی اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، کرنش‌های عرضی دارای مقادیر مثبت بوده و این مشاهده در تمام نمونه‌ها صادق است. نتایج نشان داد، کرنش‌های عرضی با افزایش کرنش‌های طولی در نمونه‌های آکستیک



شکل ۵- نتایج مربوط به عرض نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم در کرنش‌های طولی مختلف.

Fig. 5. Results of the widths of the merged and conventional re-entrant auxetic structures at different longitudinal strains.

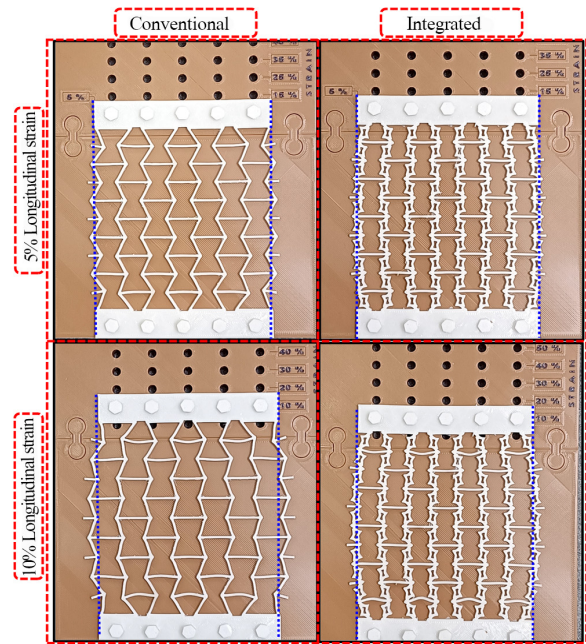


شکل ۸- تغییر شکل عرضی نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم در کرنش‌های طولی ۱۵٪ و ۲۰٪.

Fig. 8. Transverse deformation of the merged and conventional re-entrant auxetic structures at 15% and 20% longitudinal strains.

ردیف عمودی وسط سلول‌های واحد، تغییر شکل زیادی پیدا کرده است، در حالی که نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین، عملکرد بهتری در حفظ ظاهر خود حتی در کرنش‌های زیاد داشته‌اند.

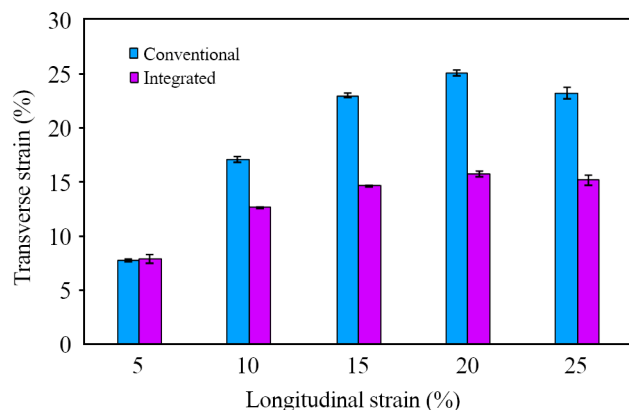
شکل ۹ نتایج مربوط به نسبت‌های پواسون نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم را در کرنش‌های طولی مختلف نشان می‌دهد. مطابق نتایج نسبت پواسون تمام نمونه‌ها در همه کرنش‌های طولی منفی است و این نشان می‌دهد که عملکرد هر دو نمونه تورفته ادغامی نوین و تورفته مرسوم آکستیک است. نتایج نشان داد که با افزایش کرنش طولی، مقادیر نسبت پواسون کاهش می‌یابد و بیشترین مقادیر نسبت پواسون به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر مربوط به کرنش طولی ۵٪ است. در این حالت، نسبت پواسون نمونه آکستیک تورفته مرسوم ۱/۵۶- است، در حالی که نسبت پواسون نمونه آکستیک تورفته ادغامی نوین ۱/۵۸- است. این مطلب نشان می‌دهد، در کرنش‌های کم، عملکرد نمونه آکستیک تورفته ادغامی نوین بهتر از نمونه آکستیک تورفته مرسوم است. هرچند اثبات این ادعا به پژوهش‌های بیشتر به‌ویژه به‌صورت شبیه‌سازی و بررسی نسبت‌های پواسون در کرنش‌های طولی کمتر از ۵٪ نیاز دارد. همچنین نتایج نشان داد، با افزایش کرنش طولی، نسبت‌های پواسون در تمام نمونه‌ها کاهش می‌یابد و در کرنش‌های طولی بیشتر



شکل ۶- تغییر شکل عرضی نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم در کرنش‌های طولی ۵٪ و ۱۰٪.

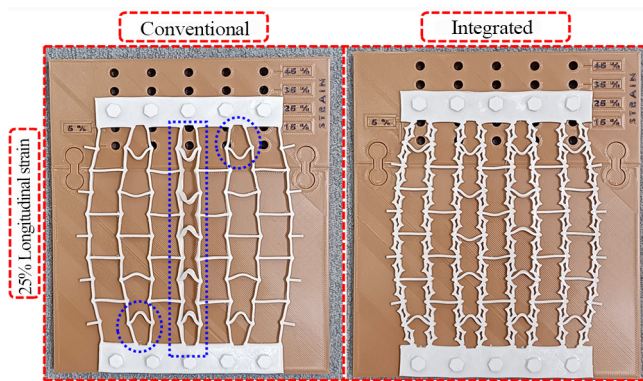
Fig. 6. Transverse deformation of the merged and conventional re-entrant auxetic structures at 5% and 10% longitudinal strains.

نمونه‌های آکستیک تورفته مرسوم در کرنش‌های ۱۵٪ و ۲۰٪، طرح ظاهری خود را به‌ویژه در بالا و پایین نمونه تا حدودی از دست داده‌اند که این مسئله در کرنش طولی ۲۰٪ مشهودتر است و حتی



شکل ۷- نتایج مربوط به کرنش‌های عرضی نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم در کرنش‌های طولی مختلف.

Fig. 7. Results of the transverse strain of the merged and conventional re-entrant auxetic structures at different longitudinal strains.



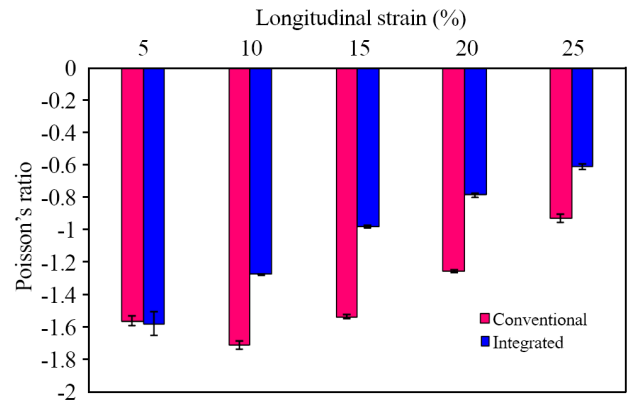
شکل ۱۰- تغییر شکل عرضی نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم در کرنش طولی ۲۵٪.

Fig. 10. Transverse deformation of the merged and conventional re-entrant auxetic structures at 25% longitudinal strain.

طولی مختلف بین ساختارهای نوین و مرسوم نشان داد، هر دو ساختار دارای عملکرد آکستیک با نسبت‌های پواسون منفی هستند. در کرنش‌های طولی کمتر (۵٪)، ساختار آکستیک تورفته یکپارچه نوین عملکرد بهتری نسبت به ساختار مرسوم داشت، در حالی که در کرنش‌های طولی بیشتر (بیش از ۵٪)، ساختار مرسوم عملکرد بهتری نشان داد. نتایج مشخص کرد، ساختار نوین قابلیت بهتری در حفظ شکل ظاهری خود در کرنش‌های طولی بیشتر دارد که این ویژگی می‌تواند در کاربردهایی بسیار مفید باشد که به حفظ استحکام و شکل ظاهری در برابر بارهای مکانیکی نیاز دارند، افزون بر این، ساختار آکستیک تورفته ادغامی نوین با استفاده از چاپ سه‌بعدی تولید شده است که امکان ساخت دقیق و پیچیده این نوع ساختارها را فراهم می‌آورد. این پژوهش نشان داد، طراحی نوین سلول‌های واحد و ادغام آن‌ها می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی مواد آکستیک منجر شود و کاربردهای بالقوه‌ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، پزشکی و مهندسی مکانیک فراهم آورد. برای پژوهش‌های آینده، بررسی‌های بیشتر در زمینه شبیه‌سازی و تحلیل‌های مکانیکی دقیق‌تر به‌منظور بهینه‌سازی ساختارها و کاربردهای بیشتر آن‌ها توصیه می‌شود.

مراجع

- Hasanzadeh R., Azdast T., and Mihankhah, P., Effect of Printer Process Parameters of Fused Filament Fabrication on the Tensile Strength and Density of Poly(lactic Acid)/Nanoclay Nanocompos-



شکل ۹- نتایج مربوط به نسبت‌های پواسون نمونه‌های آکستیک تورفته ادغامی نوین و آکستیک تورفته مرسوم در کرنش‌های طولی مختلف.

Fig. 9. Results of the Poisson's ratio of the merged and conventional re-entrant auxetic structures at different longitudinal strains.

از ۵٪، عملکرد نمونه آکستیک تورفته مرسوم بهتر از نمونه آکستیک تورفته ادغامی نوین است. هرچند همان‌طور که پیش‌تر بیان شد و در شکل ۱۰ نیز به‌خوبی نشان داده شده است، با افزایش کرنش‌های طولی، نمونه‌های آکستیک تورفته مرسوم شکل ظاهری خود را حفظ نمی‌کنند، در حالی که نمونه‌های آکستیک تورفته یکپارچه نوین قابلیت خوبی در حفظ شکل ظاهری خود دارند. همچنین شایان ذکر است، فقط بررسی نسبت پواسون نمی‌تواند به‌تنهایی برای مقایسه عملکرد این ساختارهای آکستیک کافی باشد و لازم است، خواص مکانیکی آن‌ها از جمله مقدار جذب انرژی آن‌ها مقایسه شود تا به بررسی عملکردی جامع‌تری دست یافت.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساختار نوین آکستیک تورفته با ادغام سلول‌های واحد تورفته کوچک در یک سلول واحد تورفته بزرگ‌تر ارائه و با چاپ سه‌بعدی تولید شد. مقایسه نسبت‌های پواسون در کرنش‌های

ites, Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian), **36**, 539-49, 2023.

- Thorakkattu P., Awasti N., Sajith Babu K., Khanashyam A.C., Deliephan A., Shah K., Singh P., Pandiselvam R., and Nirmal,

- N.P., 3D Printing: Trends and Approaches Toward Achieving Long-Term Sustainability in the Food Industry, *Crit. Rev. Biotechnol.*, **45**, 48-68, 2025.
3. Arif Z.U., Khalid M.Y., Tariq A., Hossain M., and Umer, R., 3D Printing of Stimuli-Responsive Hydrogel Materials: Literature Review and Emerging Applications, *Giant*, **17**, 100209, 2024.
4. Soheilpour Z., Rezadoust A.M., Razavi-Nouri M., Garoosi K., and Ghaffarian, S.R., Influence of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Tensile Properties and Printing Quality of 3D-Printed Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 497-507, 2020.
5. Mojaver M., Azdast T., and Hasanazadeh R., An Experimental and Numerical Study on an Innovative Metastructure for 3D Printed Thermoplastic Polyurethane with Auxetic Performance, *Polym. Advan. Technol.*, **35**, 6298, 2024.
6. Guo J., He Q., Li L., Zhu J., and Yan D., Ballistic Resistance of a Novel Re-Entrant Auxetic Honeycomb under in-Plane High-Velocity Impact, *J. Compos. Mater.*, **58**, 1031-1049, 2024.
7. Sun M., Hu X., Tian L., Yang X., and Min L., Auxetic Biomedical Metamaterials for Orthopedic Surgery Applications: A Comprehensive Review, *Orthop. Surg.*, **16**, 1801-1815, 2024.
8. Khan N. and Riccio, A., A Systematic Review of Design for Additive Manufacturing of Aerospace Lattice Structures: Current Trends and Future Directions, *Prog. Aerosp. Sci.*, **149**, 101021, 2024.
9. Cetin E. and Seyitoglu S.S., A Bibliometric Overview of Research on Auxetic Structures: Trends and Patterns, *Int. J. Automot. Technol.*, **8**, 65-77, 2024.
10. Dong H., Wang H., Hazell P.J., Sun N., Dura H.B., and Escobedo-Diaz J.P., Effects of Printing Parameters on the Quasi-Static and Dynamic Compression Behaviour of 3D-Printed Re-entrant Auxetic Structures, *Thin-Walled Struct.*, **210**, 113000, 2025.
11. Bahmanpour E., Montazeri A., Saeedi A., and Mahnama M., Flexural Behaviors of Asymmetric Re-entrant Auxetic Honeycombs, *Eur. J. Mech. A/Solids*, **109**, 105475, 2025.
12. Choi H.G., Pyo S., Choi J.W., and Park K., Shape Morphing of Re-entrant Honeycomb Metamaterials for Linear Auxetic Behaviors, *Adv. Eng. Mater.*, **27**, 2400889, 2025.
13. Mustahsan F., Khan S.Z., Zaidi A.A., Alahmadi Y.H., Mahmoud E.R., and Almohamadi H., Re-entrant Honeycomb Auxetic Structure with Enhanced Directional Properties, *Materials*, **15**, 8022, 2022.
14. Gong M., Tao C., Zhang C., Ji H., and Qiu J., A Method for Regulating Negative Poisson's Ratio by a Reentrant Anti-tet-rachiral Structure, *Mech. Adv. Mater. Struct.*, **29**, 7399-7414, 2022.
15. Shen J., Zeng Q., Wang J., Ge J., Gao F., and Liang J., Study of Mechanical Properties of a New 3D Re-entrant Lattice Auxetic Structure under Bending, *Adv. Eng. Mater.*, **25**, 2201509, 2023.
16. Chen Z., Wu X., Xie Y.M., Wang Z., and Zhou, S., Re-entrant Auxetic Lattices with Enhanced Stiffness: A Numerical Study, *Int. J. Mech. Sci.*, **178**, 105619, 2020.
17. Etemadi E., Zamani A.M., Scarpa F., Zeeshan M., Hosseinabadi M., and Hu H., Modified Re-entrant Auxetic Metamaterials with Energy Absorption Enhancement, *Mater. Today Commun.*, **38**, 108079, 2024.
18. Yu R., Luo W., Yuan H., Liu J., He W., and Yu Z., Experimental and Numerical Research on Foam Filled Re-entrant Cellular Structure with Negative Poisson's Ratio, *Thin-Walled Struct.*, **153**, 106679, 2020.
19. Ghavidelnia N., Bodaghi M., and Hedayati R., Idealized 3D Auxetic Mechanical Metamaterial: An Analytical, Numerical, and Experimental Study, *Materials*, **14**, 993, 2021.
20. Bronder S., Herter F., Röhrig A., Bähre D., and Jung A., Design Study for Multifunctional 3D Re-entrant Auxetics, *Adv. Eng. Mater.*, **24**, 2100816, 2022.
21. Zhang W., Zhao S., Sun R., Scarpa F., and Wang J., In-plane Mechanical Behavior of a New Star-Re-entrant Hierarchical Metamaterial, *Polymers*, **11**, 1132, 2019.
22. Yao Y., Park J.H., Wang L., Geng X., Liu J., Xu P., Huang H., Hollister S., and Fan, Y., Design, Fabrication and Mechanical Properties of a 3D Re-entrant Metastructure, *Compos. Struct.*, **314**, 116963, 2023.
23. Garg A., Sharma A., Zheng W., and Li L., A Review on Artificial Intelligence-Enabled Mechanical Analysis of 3D Printed and FEM-Modelled Auxetic Metamaterials, *Virtual Phys. Prototyp.*, **20**, 2445712, 2025.
24. Deng Y. and Jin Y., Compressive Mechanical Properties of a Novel Three-Dimensional Auxetic Structure Based on Additive Manufacturing, *Thin-Walled Struct.*, **207**, 112719, 2025.
25. Li G.F. and Liu H.T., Tunable Mechanical Properties of the 3D Anticircular-Curve Transversal-Isotropic Auxetic Structure, *Compos. Struct.*, **351**, 118634, 2025.
26. Hasanazadeh R., A New Polymeric Hybrid Auxetic Structure Additively Manufactured by Fused Filament Fabrication 3D Printing: Machine Learning-Based Energy Absorption Prediction and Optimization, *Polymers*, **16**, 3565, 2024.