DOI: 10.30511/jmms.2026.2097502.1073 - ISSN: 3060-8384 - Vol 2(3), 2026

MECHANICS OF SMART STRUCTURES

Available Online at: http://jmss.qut.ac.ir/

QOM UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Effects of Geometric Complexity on Crushing Behavior and Energy Absorption of Auxetic Vortex

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors

Erfan taherkhani*

* *Address*: M.Sc. in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Applied Design Major, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran Qom, Iran.
erfan.taherkhani2128@gmail.com

Article History
Received: August 14, 2026
Accepted: October 24, 2026
ePublished: October 24, 2026.

ABSTRACT

Vortex auxetic structures have significant potential for protective applications due to their unique geometry, ability to manage stress distribution, and capability to create a stable plateau region. In this study, the quasi-static compressive behavior of four innovative configurations, namely the hierarchical vortex core, re-entrant vortex loop, confined vortex lattice, and reinforced hybrid vortex structure, was evaluated. Numerical simulations were performed in ABAQUS based on energy geometric modeling in SolidWorks to investigate the effects of geometric complexity and reinforcement strategies on stress distribution and energy absorption performance. The results showed that the normalized specific energy absorption values for the hierarchical, re-entrant, confined, and reinforced hybrid structures were 12.5, 25.5, 45.2, and 49.8 kJ/m^3, respectively. Among the investigated models, the reinforced hybrid vortex structure achieved the highest energy absorption. Moreover, compared with the confined vortex lattice, its peak crushing force decreased by 51.4%, from 212636.2 N to 103272.8 N, indicating more effective mitigation of the initial impact and a reduction in sudden load transfer to the structure. Furthermore, this configuration exhibited the most stable plastic deformation behavior, with the lowest mean crushing force of 0.34.

Keywords: Auxetic metamaterial; Specific energy absorption; Finite element analysis; Reinforced hybrid structure; Compressive behavior

بررسی اثر پیچیدگی هندسی بر رفتار لهیدگی و ظرفیت جذب انرژی ساختارهای گردابه‌ای آگزتیک

عرفان طاهرخانی*

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک،دانشکده فنی مهندسی، گرایش طراحی کاربردی دانشگاه بو علی سینا،همدان، ایران

چکیده

ساختارهای آگزتیک گردابه‌ای به‌دلیل هندسه منحصربه‌فرد، توانمندی در مدیریت توزیع تنش و قابلیت ایجاد ناحیه لهیدگی تدریجی پایدار، پتانسیل بالایی در کاربردهای حفاظتی دارند. در این پژوهش، رفتار فشاری شبه‌استاتیک چهار پیکربندی نوآورانه شامل هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتب، حلقه گردابه‌ای بازگشتی، شبکه گردابه‌ای محصور و ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌های عددی در محیط نرم‌افزار آباکوس و بر پایه مدل‌سازی دقیق هندسی در سالیدورکس به‌منظور بهبود کارایی مکانیکی، اثر پیچیدگی هندسی و استراتژی‌های تقویت‌کننده بر توزیع تنش و شاخص‌های جذب انرژی بررسی گردید. نتایج نشان داد که مقدار جذب انرژی ویژه نرمال‌شدهSEA برای ساختارهای سلسله‌مراتب، بازگشتی، محصور و ترکیبی تقویت‌شده به‌ترتیب برابر با 12/5، 25/5، 45/2و 49/8 (KJ/kg) است. در میان مدل‌های بررسی‌شده، ساختار ترکیبی تقویت‌شده با دستیابی به بالاترین میزان SEA و در ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده نسبت به شبکه گردابه‌ای محصور، نیروی اوج لهیدگی PCFبا کاهش ۵۱,۴ درصدی از 212636/2 به 103272/8 نیوتن رسید که نشان‌دهنده مهار مؤثرتر ضربه اولیه و کاهش انتقال بار ناگهانی به سازه است.همچنین، این ساختار با ثبت پایین‌ترین میزان نیروی متوسط لهیدگی MCF برابر با 0/34، پایدارترین رفتار تغییرشکل پلاستیک را نشان داد.

کلید واژه‌ها

ساختار گردابه‌ای، جذب انرژی ویژه، تحلیل المان محدود، ساختار ترکیبی تقویت‌شده، رفتار فشاری.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۳

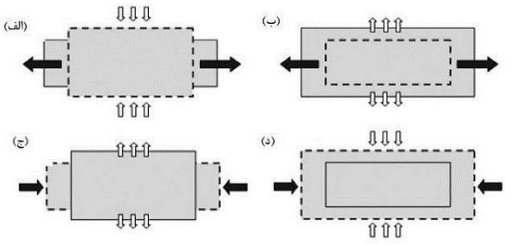
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۲

*نویسنده مسئول:

erfan.taherkhani2128@gmail.com

۱ مقدمه

در دهه‌های اخیر، آگزتیک به‌دلیل برخورداری از ویژگی‌های مکانیکی منحصربه‌فرد، توجه گسترده‌ای را در جوامع علمی به خود جلب کرده‌اند. این دسته از مواد سلولی که با ضریب پواسون منفی NPR شناخته می‌شوند، برخلاف مواد متداول، در هنگام اعمال بار کششی در جهت عرضی منبسط و تحت فشار منقبض می‌گردند [۱].



شکل ۱ نمایش شماتیک تفاوت رفتار تغییرشکل مواد متعارف و مواد آگزتیک تحت بارگذاری؛ (الف) و (ج) رفتار ماده متعارف با ضریب پواسون مثبت، (ب) و (د) رفتار ماده آگزتیک با ضریب پواسون منفی [۷].

این رفتار غیرمتعارف منجر به بهبود قابل‌توجه ویژگی‌هایی نظیر مدول برشی بالا [۲]، مقاومت در برابر تورفتگی[۳] و چقرمگی شکست ممتاز [۴] شده است. بر همین اساس، این سازه‌ها در صنایع استراتژیک از جمله هوافضا [۵]، سیستم‌های ایمنی خودرو [۶]، تجهیزات پیشرفته ورزشی [۷] و بیوپزشکی [۸] به کار گرفته

شده‌اند. مفهوم مدرن آگزتیک‌ها با کارهای پیشگامانه لیکس در سال ۱۹۸۷ و با معرفی ساختارهای درون‌سو آغاز شد [۹]. پس از آن، پژوهش‌ها به سمت توسعه هندسه‌های پیچیده‌تر سوق یافت که منجر به پیدایش خانواده‌های مختلفی از جمله ساختارهای کایرال [۱۰]، واحدهای چرخش صلب [۱۱]، ساختارهای ستاره‌ای [۱۲] و مفاهیم مبتنی بر اوریگامی و کیریگامی [۱۳، ۱۴] گردید. توسعه این ساختارها به‌طور کلی از سه مسیر اصلی عبور می‌کند: الهام از الگوهای بیولوژیکی، بهینه‌سازی توپولوژی و ترکیب/اصلاح هندسه‌های موجود. طبیعت همواره منبع الهام غنی برای طراحی سازه‌های کارآمد با قابلیت جذب انرژی بالا بوده است. در یک مطالعه کلیدی، لیو و همکاران [۱۶] با الهام از ساختار سلسله‌مراتبی درخت نخل و بامبو، لوله‌های مربعی چندسلولی را طراحی کردند؛ یافته‌های آن‌ها نشان داد که تقسیم مقطع به زیرسلول‌های متعدد، پایداری تغییرشکل و ظرفیت جذب انرژی ویژه SEA[۱] را به‌طور چشمگیری ارتقا می‌دهد. در همین راستا، جیانگ و همکاران[۱۷] با معرفی لانه‌زنبوری‌های درون‌سوی هم‌مرکز، مکانیزم‌های جدیدی برای مدیریت انرژی ضربه ارائه کردند. همچنین، هوانگ و شو[۱۸] با الگوبرداری از ساختار چماق‌مانند سخت‌پوستان و ژانگ[۱۹] با الهام از لاک لاک‌پشت، موفق به طراحی سازه‌هایی با مقاومت استثنایی در برابر بارهای داخل صفحه شدند. با پیشرفت ابزارهای محاسباتی، بهینه‌سازی ساختاری به رکنی اساسی در تنظیم رفتار NPR تبدیل شده است. وانگ و یانگ [۲۰، ۲۱] با استفاده از متغیرهای هندسی و الگوریتم‌های تکاملی، دسته‌های جدیدی از آگزتیک‌ها را با عملکرد بهینه معرفی کردند. یکی از ترندهای اخیر پژوهشی، ترکیب سلول‌های مختلف برای غلبه بر نقاط ضعف تک‌هندسه‌هاست. به‌عنوان مثال، ترکیب ساختارهای درون‌سو و لانه‌زنبوری توسط شو و همکاران [۲۴] و ادغام طرح‌های ستاره‌ای با پیکربندی درون‌سو توسط وانگ [۲۵]، این اصلاحات منجر به بهبود پایداری ناحیه پلاتو (ناحیه تقریباً ثابت منحنی تنش–کرنش در حین لهیدگی) و افزایش پایداری سازه‌ای شده است. همچنین، استفاده از دیواره‌های قوسی به‌جای دیواره‌های مستقیم در ساختارهای درون‌سو توسط چی و همکاران [۲۸]، گامی مؤثر در جهت کاهش تمرکز تنش و افزایش انعطاف‌پذیری سازه بوده است. علاوه بر کاربردهای سازه‌ای، پتانسیل این مواد در حوزه پزشکی نیز به اثبات رسیده است. عباسلو و همکاران[۳۰] با ترکیب واحدهای درون‌سو و کایرال در استنت‌های[۲] عروقی RMCA، به پایداری مکانیکی و قابلیت استقرار بسیار مطلوبی دست یافتند. در همین راستا، طاهرخانی و همکاران [۳۱] به بررسی اثر اصلاحات هندسی بر رفتار تغییرشکل ساختارهای فراماده با هندسه آگزتیک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که ایجاد زیرساختارهای داخلی و تقویت مسیرهای انتقال بار، پایداری سازه‌ای و ظرفیت جذب انرژی را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد؛ به‌گونه‌ای که ترکیب بهینه پیکربندی‌های بازگشتی منجر به ارتقای عملکرد در کاربردهای صنعتی سبک‌وزن گردید. در پژوهشی دیگر، طاهرخانی و همکاران [۳۲] رفتار مکانیکی و شاخص‌های جذب انرژی سه دسته از ساختارهای آگزتیک بازگشتی، ستاره‌ای و ترکیبی را تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک درون‌صفحه‌ای ارزیابی نمودند. نتایج حاصل نشان داد که مدل نوآوری‌شده در دسته‌های بازگشتی و ستاره‌ای، به‌ترتیب با جذب انرژی ویژه ۴/۸ و ۶/۹ کیلوژول بر گرم، عملکرد مطلوب‌تری را نسبت به نمونه‌های پایه به ثبت رساند.مهندسی و همکاران [۳۳] به بررسی رفتار ارتعاشی غیرخطی و تشدید اولیه پوسته‌های استوانه‌ای آگزتیک ستاره‌ای‌شکل را در تغییرشکل‌های بزرگ بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از قضیه کاستیلیانو، روش همگن‌سازی و نظریه کلاسیک پوسته‌های نازک، معادلات حاکم بر سازه را استخراج و با روش‌های رانگه–کوتا و مقیاس‌های متعدد حل کردند. نتایج نشان داد که پارامترهای هندسی تأثیر قابل‌توجهی بر ارتعاشات خطی و غیرخطی دارند. مهندسی و همکاران [34] رفتار ارتعاشی یک صفحه مستطیلی آگزتیک تحت فشار درون‌صفحه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها ابتدا ماتریس سختی

[۱] Specific Energy Absorption

[۲] Stent

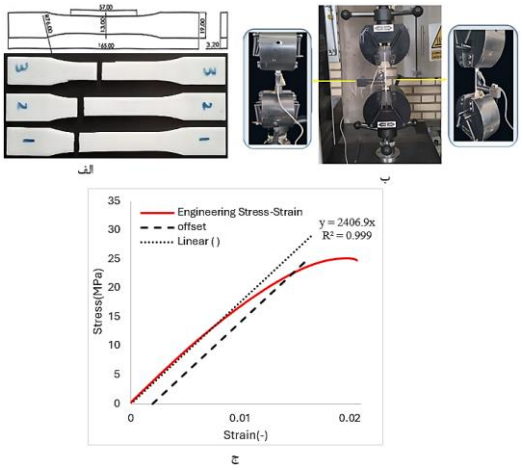
خمشی معادل الگوی ستاره‌ای آگزتیک را با استفاده از قضیه کاستیلیانو و روش همگن‌سازی به‌دست آوردند، سپس با به‌کارگیری تئوری کلاسیک صفحات و روش رایلی-ریتز، فرکانس‌های طبیعی صفحه را استخراج کردند. برای تقریب میدان جابجایی نیز از سری چندجمله‌ای چبیشف استفاده شد. نتایج نشان داد زاویه آگزتیک اثر قابل‌توجهی بر فرکانس‌های طبیعی دارد و مدل پیشنهادی با تحلیل المان محدود تأیید شد. قنبری و همکاران [۳۵] یک ریزساختار آگزتیک زیست‌الهام‌گرفته با عنوان عنصر اسپیدروئین بازگشتی (RSE)، برگرفته از ابریشم عنکبوت، ارائه کردند و اثر پارامترهای هندسی آن را بر نسبت پواسون و مدول یانگ بررسی نمودند. خواص مکانیکی ساختار با استفاده از نظریه تیر خمیده و قضیه کاستیلیانو به‌صورت تحلیلی استخراج و با تحلیل المان محدود اعتبارسنجی شد. توافق مطلوب نتایج تحلیلی و عددی، با بیشینه انحراف نسبی کمتر از ۰٫۵٪، دقت مدل پیشنهادی را تأیید کرد.

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که ترکیب چند مکانیزم تغییرشکل در یک ساختار واحد می‌تواند منجر به پدیده‌های هم‌افزایی شود؛ به‌طوری که ساختارهای هیبریدی نسبت به نمونه‌های ساده، از پایداری تغییرشکل بالاتر، سکوی تنش پایدارتر و ظرفیت جذب انرژی ویژه بیشتری برخوردار می‌شوند. با این حال، ارتباط نظام‌مند میان پارامترهای هندسی (زاویه دیواره‌ها، نسبت طول‌ها، انحنای گردابه‌ها و چیدمان سلول‌ها) و پاسخ مکانیکی ساختارهای هیبریدی کایرال-درون‌سو، به‌ویژه در بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک، همچنان به‌صورت کامل تبیین نشده است و این موضوع به‌عنوان خلأ پژوهشی اصلی این تحقیق شناخته می‌شود. هدف اصلی این پژوهش، طراحی، مدل‌سازی عددی و تحلیل مکانیکی یک ساختار آگزتیک هیبریدی جدید با هندسه گردابه‌ای است که به‌طور هم‌زمان ویژگی‌های ضریب پواسون منفی و مکانیزم جذب انرژی چرخشی را ترکیب می‌کند. در این راستا، تأثیر پارامترهای هندسی کلیدی بر رفتار تغییرشکل، ضریب پواسون مؤثر، نیروی لهیدگی و ظرفیت جذب انرژی ویژه تحت بارگذاری فشاری بررسی و تحلیل می‌شود.

۲ تعیین خواص مکانیکی

پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) یک پلیمر زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر است که از منابع گیاهی مانند نشاسته ذرت و نیشکر تولید می‌شود. نسخه بهبودیافته آن، یعنی PLA+، با افزودنی‌های خاص تقویت شده است تا مقاومت مکانیکی و حرارتی بالاتری داشته باشد. دمای ذوب PLA+[۳] معمولاً بین ۲۰۵ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد است که آن را برای چاپ سه‌بعدی ایده‌آل می‌کند. این ماده به‌دلیل خواص ارتقایافته، در تولید قطعات مهندسی با نیاز به تحمل فشار و دمای بیشتر کاربرد فراوانی دارد. همچنین، PLA+ به‌دلیل چاپ‌پذیری مناسب، پایداری نسبی خواص مکانیکی و امکان تولید نمونه‌هایی با دقت ابعادی قابل‌قبول، برای ساخت نمونه‌های این پژوهش انتخاب شد. برای تعیین خواص PLA+، آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM-D638یکش انجام گرفت[33]. هندسه نمونه مطابق شکل (۲ب) و نمونه‌های مورد استفاده در این آزمون با استفاده از دستگاه سنتام موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی‌سینا مطابق شکل (۲الف) مورد آزمایش قرار گرفتند.

[۳] Polylactic Acid



شکل۲ آزمایش کشش PLA+ (الف) نمونه نصب شده در دستگاه Santam، (ب) سه نمونه استاندارد ، (ج) نمودار تنش-کرنش

همان‌طور که در شکل (۲ج) نشان داده شده است، خواص مکانیکی ماده‌ی PLA+ از طریق آزمون کشش تعیین گردید. به منظور استخراج دقیق مدول یانگ و نقطه‌ی تسلیم، از روش افست ۰/۰۰۲ استفاده شد. در این روش، خطی موازی با بخش الاستیک خطیِ منحنی تنش-کرنش واقعی ترسیم گردید تا با منحنی مذکور تلاقی کند. نقطه‌ی تلاقی این دو خط، به‌عنوان تنش تسلیم در نظر گرفته شد و شیب خط موازی، مدول یانگ ماده را تعیین نمود. این مقادیر برای تعریف رفتار الاستیک و الاستیک-پلاستیک در جدول ۲ ماده در مدل‌سازی عددی به‌کار گرفته شدند.

جدول۱ خواص مکانیکی pla+

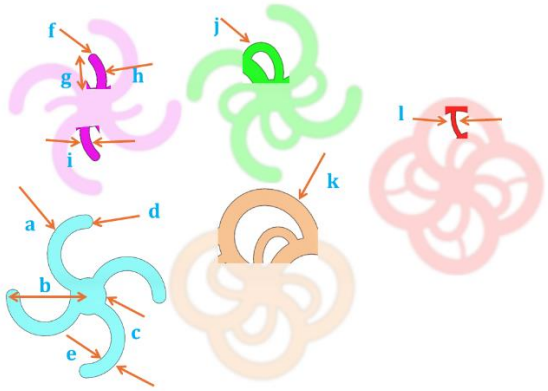
چگالی (kg/m̆)[35]	ضریب پواسون[35]	مدول یانگ(MPa)	تنش تسلیم (MPa)
1250	۰/۳	۲۴۰۶/۹	۲۲/۴۷

جدول ۲ خواص پلاستیک ماده pla+

کرنش پلاستیک	تنش تسلیم
22.95297909	0
23.96237452	0.002591768
24.82776688	0.003204966
25.45314315	0.00394907
25.75115913	0.004927444
25.76532202	0.005470073

۲-۱طراحی ساختار گردابه‌ای

در این پژوهش، مدل‌سازی هندسی ساختارهای شبکه‌ای آگزتیک با مبنای هندسه گردابه‌ای، با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks Premium 2017انجام شد. سپس، مدل‌های هندسی به محیط Abaqus/CAE 2017 منتقل شدند تا مدل اجزای محدود، شرایط مرزی، تماس‌های داخلی و شبیه‌سازی عددی رفتار فشاری آن‌ها تعریف شود. جزئیات سلول واحد، پارامترهای هندسی و آرایش نهایی شبکه در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل۳ هندسه سلول‌های واحد آگزتیک با مبنای ساختار گردابه‌ای و تغییرات هندسی اعمال‌شده

ساختارهای بررسی‌شده در این پژوهش شامل یک ساختار پایه و چند پیکربندی نوآوری‌شده هستند. ساختار پایه بر اساس هندسه آگزتیک گردابه‌ای متداول طراحی شد، درحالی‌که سایر ساختارها با اعمال تغییرات هندسی، ایجاد زیرساختارهای داخلی و استفاده از راهبردهای تقویتی توسعه یافتند. اگرچه برخی از اجزای هندسی این پیکربندی‌ها مشابه ساختارهای گزارش‌شده در مطالعات پیشین هستند، ترکیب و آرایش نهایی آن‌ها در این پژوهش جدید بوده و تاکنون با این پیکربندی مورد استفاده یا بررسی قرار نگرفته است. وجه تمایز ساختارهای نوآوری‌شده، نحوه ترکیب هندسه گردابه‌ای، آرایش شبکه‌ای و راهبردهای تقویتی است که با هدف بهبود توزیع تنش، پایداری تغییرشکل و قابلیت جذب انرژی ارائه شده‌اند. مراحل مدل‌سازی هندسی ساختار شبکه‌ای آگزتیک با هندسه گردابه‌ای به‌طور دقیق در نرم‌افزار SolidWorks و مطابق با الگوهای اولیه نشان‌داده‌شده در شکل (۳) انجام شد. شبکه

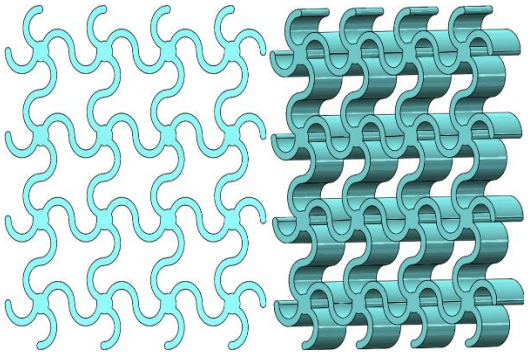
نهایی مورد مطالعه از طریق تکرار منظم و پیوسته سلول‌های واحد طراحی‌شده شکل گرفت. به‌منظور تضمین صحت مدل و امکان بازتولید آن، مقادیر دقیق کلیه پارامترهای هندسی تعیین‌کننده ابعاد سلول واحد و ساختار کلی در جدول (۳) به‌صورت جامع ارائه شده است.

جدول۳ اندازه و ابعاد پاراکترهای هندسی ساختار های گردابه‌ای

پارامتر هندسی	نماد	اندازه
زاویه باله بزرگ	a	۵۰°
طول باله تا مرکز	b	۲۰(mm)
زاویه مرکز اتصال	c	۵°
زاویه نوک باله بزرگ	d	۲.۵°
ضخامت باله بزرگ	e	۳ (mm)
زاویه نوک باله کوچک	f	۱°
ارتفاع باله کوچک	g	۷.۵ (mm)
زاویه باله کوچک	h	۷۵°
ضخامت باله کوچک	i	۲(mm)
زاویه هلالی باله کوچک	j	۳۵°
زاویه هلالی باله بزرگ	k	۴۵°
ضخامت اتصال بین لایه	l	۱(mm)

۲-۲ طراحی ساختار پایه گردابی

بر مبنای پارامترهای ابعادی و هندسی دقیق ارائه شده در جدول ۲، فرآیند مدل سازی هندسی ساختار پایه گردابه‌ای انجام پذیرفت. مطابق با تصویر ارائه شده در شکل ۴، این ساختار شبکه ای از طریق تکرار منظم و پیوسته سلول‌های واحد در دو جهت اصلی شکل گرفته است که منجر به ایجاد هندسه‌ای تناوبی با پیوستگی ساختاری بالا می‌شود. مدلسازی در فضای سه‌بعدی (به روش اکسترود) انجام شده تا امکان تحلیل دقیق رفتار مکانیکی در مراحل بعدی فراهم آید. تحلیل هندسی این پیکربندی نشان می‌دهد که اتصال گره‌های به دیواره‌های پیرامونی، مسیرهای انتقال نیروی هوشمندانه‌ای ایجاد کرده است. در این آرایش، هر سلول واحد علاوه بر مدیریت بارگذاری‌های موضعی، از طریق تعامل با سلول‌های مجاور در رفتار کلی شبکه مشارکت می‌کند. ویژگی کلیدی این طراحی، استفاده از انحناهای هندسی در محل گره‌هاست که ضمن حذف تمرکز تنش در زوایای تیز، امکان چرخش آزادانه اجزا و بازآرایی ساختاری را تحت فشار فراهم می‌آورد. اتصال هسته صلب مرکزی به بازوهای منحنی، یک مکانیزم چرخش-محور ایجاد میکند که در آن خمش بازوها و چرخش هسته‌ها به‌صورت هم‌افزا عمل می‌کنند. این مکانیزم هندسی عامل اصلی بروز رفتار آگزتیک (ضریب پواسون منفی) و تسهیل لهیدگی تدریجی لایه‌ها در طول فرآیند فشردگی است. به‌علاوه، آرایش گردابه‌ای بازوها حول هسته مرکزی، پایداری ساختار در کرنش‌های بالا را تضمین کرده و از وقوع شکست‌های موضعی زودهنگام جلوگیری می‌کند.

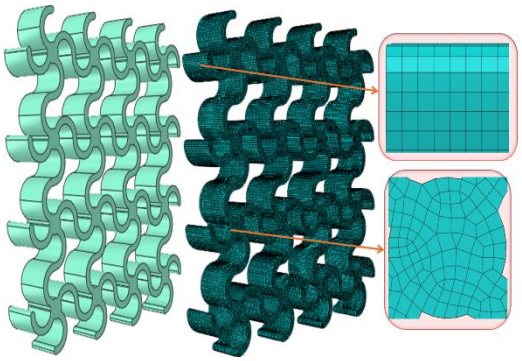


شکل ۴ مدل‌سازی هندسی ساختار آگزتیک پایه گردابه‌ای

۲-۳ شبیه سازی هندسی

تحلیل عددی ساختار پیشنهادی با استفاده از روش اجزای محدود و در محیط نرم‌افزار Abaqus/Explicit انجام شد. مدل‌های هندسی سه‌بعدی ابتدا در نرم‌افزار SolidWorks ایجاد و سپس در قالب فایل Step به آباکوس منتقل شدند. پس از ورود هندسه به بخش‌های Part و Assembly، شرایط لازم برای شبیه‌سازی آزمون فشاری شبه‌استاتیک فراهم شد. در این راستا، فک‌های بالایی و پایینی به‌صورت سطوح صلب مدلسازی شدند تا شرایط مرزی آزمون با دقت مناسب بازتولید شود. با وجود آنکه بارگذاری مورد مطالعه از نوع شبه‌استاتیک بود، از حلگر Dynamic Explicit استفاده شد. دلیل این انتخاب، وجود تغییرشکل‌های بزرگ، تماس‌های چندگانه، غیرخطی‌های هندسی قابل‌توجه و احتمال بروز مشکلات همگرایی در حلگرهای ضمنی است. برای جلوگیری از ورود اثرات اینرسی و حفظ ماهیت شبه‌استاتیک پاسخ،

بارگذاری به‌صورت جابه‌جایی کنترل شده و با استفاده از تابع دامنه هموار و تدریجی اعمال شد تا از ایجاد نوسانات ناگهانی در ابتدای بارگذاری جلوگیری شود. همچنین در طول تحلیل، تاریخچه انرژی های مختلف مدل مورد پایش قرار گرفت و شبه‌استاتیکی بودن آن از طریق ناچیز بودن نسبت انرژی جنبشی به انرژی درونی تأیید شد (مطابق شکل ۹). به‌منظور تعریف دقیق رفتار مکانیکی ماده در شبیه‌سازی، از مدل الاستیک-پلاستیک همسانگرد برای پلیمر PLA استفاده شد[۱۰]. نتایج حاصل از آزمون کشش تجربی نمونه‌های دمبلی به‌صورت مستقیم به‌عنوان ورودی اصلی برای کالیبراسیون مدل عددی به‌کار گرفته شد؛ به‌گونه‌ای که خواص الاستیک (مدول یانگ) و رفتار پلاستیک (منحنی تنش-کرنش حقیقی) از آزمون کشش استخراج و به نرم‌افزار معرفی گردید تا دقت پاسخ سازه در برابر بارگذاری فشاری و محاسبه شاخص‌های جذب انرژی تضمین شود. لازم به ذکر است که با توجه به تمرکز این پژوهش بر مرحله تغییرشکل فشاری تدریجی و پایدار، یعنی ناحیه‌ای که سازه بدون افزایش ناگهانی نیرو و به‌صورت کنترل‌شده دچار تغییرشکل و جذب انرژی می‌شود، استخراج شاخص‌هایی مانند جذب انرژی ویژه SEA[۴] و نیروی متوسط لهیدگی MCF[۵] مدنظر قرار گرفت. ازاین‌رو، در این سطح از تحلیل، رفتار ماده تا پیش از وقوع گسیختگی بررسی شد. و از مدلهای آسیب یا شکست المان صرف‌نظر شده است. همچنین به‌منظور پیش‌بینی شروع تسلیم، از معیار تسلیم فون میسز استفاده شد که برای توصیف پاسخ همسانگرد ماده در این سطح از تحلیل مناسب است. این شیوه سبب شد مدل عددی بر مشخصات واقعی ماده مصرفی در فرآیند ساخت استوار باشد و از اتکا به داده‌های عمومی موجود در منابع اجتناب شود. شرایط تماس بین نمونه و فک‌های بارگذاری با استفاده از تماس سطح‌به‌سطح تعریف شد و در راستای نرمال نیز از General Contact برای جلوگیری از نفوذ غیرواقعی استفاده گردید. این انتخاب با توجه به ماهیت آزمون و به‌منظور ایجاد تعادل میان واقع‌گرایی فیزیکی و پایداری عددی انجام شد. در اعمال شرایط مرزی، فک پایینی به‌طور کامل مقید شد، در حالی که برای فک بالایی تنها جابه‌جایی در راستای محور بارگذاری مجاز بود. برای اعمال دقیق جابه‌جایی و استخراج پاسخ سازه، برای هر فک یک نقطه مرجع تعریف شد و سطح صلب متناظر به آن کوپل گردید؛ سپس جابه‌جایی اعمال‌شده به نقطه مرجع فک بالایی اعمال و نیروی واکنش حاصل از همان نقطه برای استخراج منحنی نیرو-جابه‌جایی ثبت شد. به‌منظور افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج، فرآیند مدلسازی و اعتبارسنجی عددی با تکیه بر رویکرد گزارش‌شده در مطالعه زانگ و همکاران انجام شد [38]؛ در آن مرجع نیز خواص ماده ابتدا از آزمون‌های مکانیکی استخراج شده و سپس مدل اجزای محدود بر اساس داده‌های تجربی کالیبره و با نتایج آزمایش تطبیق داده شده است. بر همین اساس، در پژوهش حاضر نیز به‌جای استفاده از خواص عمومی و کتابخانه‌ای ماده، خواص مکانیکی به‌صورت مستقیم از آزمون کشش نمونه‌های دمبلی چاپ‌شده به‌دست آمد و به‌عنوان ورودی مدل عددی مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد سبب شد رفتار واقعی ماده تولیدشده، شامل پاسخ مکانیکی ناشی از شرایط ساخت و چاپ، با دقت بیشتری در شبیه‌سازی لحاظ شود. در ادامه به‌منظور بررسی اثر اندازه المان بر پاسخ عددی و انتخاب شبکه‌ای با توازن مناسب میان دقت و هزینه محاسباتی، مطالعه حساسیت مش انجام شد. در این راستا، برای ارزیابی استقلال نتایج از شبکه، مش‌بندی ساختار هیبریدی گردابه‌ای مطابق شکل ۵ ارائه شده است. ؛ مشابه آنچه در مرجع مذکور برای کالیبراسیون و تطبیق مدل عددی با نتایج تجربی گزارش شده است [38]. این روند در نهایت امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تر رفتار فشاری ساختار و افزایش اعتبار نتایج شبیه‌سازی را فراهم ساخت.



شکل ۵ مدل هندسی و شبکه‌بندی اجزای محدود ساختارگردابه‌ای

[۴] Specific Energy Absorption

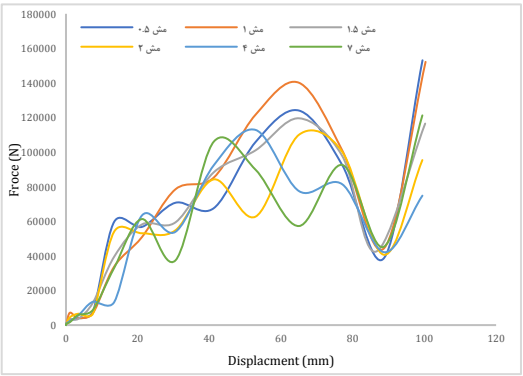
[۵] Mean Crushing Force

به‌منظور مدل‌سازی برهم‌کنش بین سطوح درگیر، تماس از نوع سطح‌به‌سطح تعریف شد و ضریب اصطکاک بین این سطوح برابر با ۰،۳ در نظر گرفته شد. [36]. به‌منظور گسسته‌سازی مدل، از المان سه‌بعدی پیوسته هشت‌گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته، R۸D۳C، استفاده شد. این المان به دلیل توانایی مناسب در بازنمایی تغییرشکل‌های بزرگ و هزینه محاسباتی کمتر نسبت به المان‌های با انتگرال‌گیری کامل، برای تحلیل فشاری ساختارهای شبکه‌ای و آگزتیک مناسب است. با این حال، به‌منظور کنترل احتمال بروز مودهای تغییرشکل صفرانرژی ناشی از انتگرال‌گیری کاهش‌یافته، تنظیمات کنترل ساعت‌شنی Hourglass Control پیش‌فرض نرم‌افزار فعال بوده و سهم انرژی ساعت‌شنی در مقایسه با انرژی داخلی مدل پایش شد تا از ناچیز بودن آن اطمینان حاصل شود. به‌منظور حصول اطمینان از صحت نتایج و ایجاد توازن میان دقت و هزینه محاسباتی، مطالعه حساسیت و استقلال حل از شبکه المان‌محدود انجام شد. بدین منظور، پاسخ مکانیکی ساختار هیبریدی گردابه‌ای با اندازه‌های مختلف مش مورد ارزیابی قرار گرفت و اندازه بهینه انتخاب گردید. با اندازه‌های مختلف المان شامل ۰/۵ ، ۱، ۱/۵، ۲، ۴ و ۷ میلی‌متر مطابق شکل ۶ صورت پذیرفت. ارزیابی نمودارهای نیرو-جابه‌جایی حاصل از این تحلیل‌ها نشان می‌دهد اگرچه رفتار سازه‌ای تمامی شبکه‌ها در فاز الاستیک اولیه انطباق بالایی را نشان می‌دهد، به‌منظور بررسی دقیق‌تر صلبیت اولیه و تفکیک جزئیات پاسخ، محدوده کرنش الاستیک به‌صورت بزرگ‌نمایی‌شده در نمودار مشخص شده است تا مقایسه و نتیجه‌گیری پیرامون استقلال مش با دقت بالاتری صورت گیرد. اما با ورود به ناحیه غیرخطی و آغاز تغییر شکل‌های بزرگ، ماهیتِ حساسِ هندسه گردابه‌ای نسبت به گسسته‌سازی نمایان می‌شود. به‌طوری‌که اگرچه انتظار می‌رود با ورود سازه به ناحیه غیرخطی و افزایش تغییرشکل‌ها، اثر اندازه مش بر بازنمایی هندسه پیچیده لیگامنت‌ها و تمرکز تنش در نواحی اتصال آشکارتر شود، در نمودار ارائه‌شده تفاوت محسوسی میان رفتار نرم شبکه‌های ۴ و ۲ میلی‌متری مشاهده نمی‌شود. رفتار سازه راانعطاف پذیری بیشتر از واقعیت نشان داده و مقادیر پیک نیرو را با خطای قابل‌توجهی تخمین می‌زنند. در مقابل، با ریزتر شدن شبکه به ابعاد ۱/۵ و ۱ میلی‌متر، پایداری عددی ارتقا یافته و الگوی نوسانی نیرو که حاصلِ مکانیزم‌های درگیری و چرخش‌های محوری در این ساختارهاست، با وضوح بیشتری ثبت می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که با رسیدن به ابعاد ۱ میلی‌متر، نمودار نیرو-جابه‌جایی به یک وضعیت همگرایی عددی مطلوب دست یافته است، به‌گونه‌ای که تفاوت پاسخ این شبکه با شبکه بسیار ریز ۰/۵ میلی‌متر ناچیز بوده و نشان‌دهنده حذف خطای گسسته‌سازی است.

جدول ۴. مقایسه جذب انرژی ویژهSEA مش بندی

اندازه مش	0/5	1	1/5	2	4	7
SEA	8/5	8/9	8/7	8/5	7/9	7/5

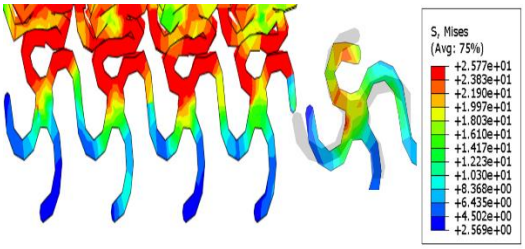
بر اساس نتایج جدول ۴، مش با اندازه المان ۱ میلی‌متر، با مقدار SEAبرابر با ۸/۹، بهترین عملکرد را در میان شبکه‌های بررسی‌شده نشان داد. ازاین‌رو، با توجه به ایجاد توازن مناسب میان دقت عددی و هزینه محاسباتی، این شبکه به‌عنوان مش بهینه برای ادامه تحلیل‌های پارامتریک انتخاب شد.



شکل۶ بررسی همگرایی مش ساختار گردابه‌ای

به‌منظور ارزیابی دقیق عملکرد مکانیکی ساختار هیبریدی گردابه‌ای، توزیع تنش فون‌میسز (Von Mises) در شبکه تکرارشونده و سلول واحد تحت بارگذاری فشاری تحلیل گردید. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، بالاترین شدت تنش (نواحی قرمز) به‌طور استراتژیک در نقاط اتصال و قوسِ

لیگامنت‌های منحنی متمرکز شده است که گویای غلبه مکانیزم خمش و چرخش بر رفتار کلی سازه است. این الگوی توزیع تنش تأیید می‌کند که هندسه طراحی‌شده با بهره‌گیری از ویژگی‌های گردابه‌ای، قادر است بار اعمالی را به‌جای انتقال مستقیم، از طریق تغییر شکل‌های دورانی و تغییر پیکربندی لیگامنت‌ها جذب و توزیع نماید. تراکم رنگ‌های گرم در نقاط حساس و انتقال تدریجی آن به سمت رنگ‌های سرد در نواحی پیرامونی، نشان‌دهنده عملکرد بهینه ساختار در مدیریت تنش و جلوگیری از تمرکز تنش‌های بحرانی و شکست ناگهانی در نقاط اتصال است؛ به عبارت دیگر، این ساختار با هدایت هوشمندانه جریان تنش به سمت المان‌های منعطف، پایداری سازه‌ای و ظرفیت جذب انرژی بالایی را در طول فرآیند تغییر شکل‌های بزرگ از خود به نمایش می‌گذارد که مؤید موفقیت توپولوژی پیشنهادی در کنترل پاسخ مکانیکی سیستم است.



شکل ۷ توزیع تنش فون‌مایزز محاسبه‌شده در ساختار را در مرحله تغییرشکل نشان می‌دهد. مقادیر تنش بر حسب مگاپاسکال ارائه شده‌اند و بازه عددی متناظر با رنگ‌های مختلف در نوار رنگی شکل درج شده است.

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، رفتار آگزتیک ساختار پیشنهادی با شکل سایه نشان داده شده است که ناشی از بازآرایی هندسی گردابه‌ای تحت بارگذاری فشاری است با اعمال فشار محوری، اعضای ساختار دچار چرخش موضعی و بازشدگی نسبی در نواحی اتصال می‌شوند. این سازوکار از انبساط جانبی متعارف (که در مواد معمولی تحت بارگذاری فشاری رخ می‌دهد) جلوگیری کرده و با ایجاد انقباض جانبی، منجر به ظهور ضریب پواسون مؤثر منفی در یک بازه مشخص از کرنش می‌شود. با افزایش بیشتر کرنش، ساختار به‌تدریج از فاز آگزتیک به سمت فاز تراکم منتقل می‌شود. کرنش محوری و کرنش عرضی به‌ترتیب از تغییر طول ساختار در راستای بارگذاری و تغییر عرض مطابق رابطه(۱) آن در راستای عمود بر بارگذاری به‌دست آمدند[37]:

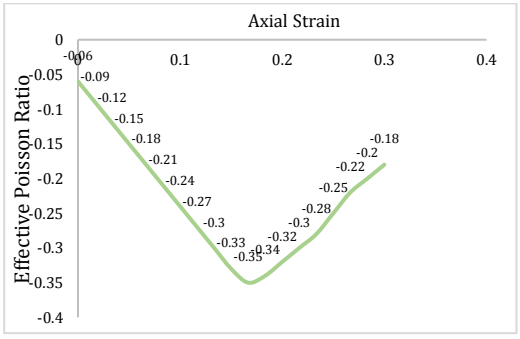
$$\varepsilon_{axial} = \frac{L - L_0}{L_0} \qquad (1)$$

$$\varepsilon_{transverse} = \frac{W - W_0}{W_0} \qquad (2)$$

سپس ضریب پواسون مؤثر از رابطه (۳) محاسبه شد[23].

$$veff = -\frac{transverse}{axial} \qquad (3)$$

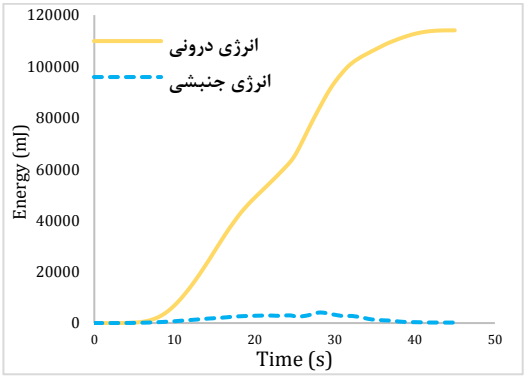
نمودار شکل ۸ نیز این رفتار را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. بر اساس روند تغییرات ضریب پواسون مؤثر بر حسب کرنش محوری، مقدار $veff$ در ناحیه ابتدایی و میانی تغییرشکل منفی باقی می‌ماند که بیانگر حفظ پاسخ آگزتیک ساختار در این بازه است. همچنین روند نمودار نشان می‌دهد که با افزایش کرنش، شدت رفتار آگزتیک ابتدا تقویت شده و ضریب پواسون به مقادیر منفی‌تری می‌رسد؛ اما در کرنش‌های بالاتر، با نزدیک شدن اجزای ساختار به یکدیگر و آغاز تراکم موضعی، مقدار ضریب پواسون به‌تدریج از حالت شدیداً منفی فاصله می‌گیرد. این تغییر روند بیانگر گذار تدریجی ساختار از مرحله بازآرایی هندسی به مرحله تراکم و تماس گسترده‌تر میان اجزا است.



شکل۸. تغییرات ضریب پواسون مؤثر بر حسب کرنش محوری برای ساختار پیشنهادی؛ منفی بودن $veff$ در مراحل اولیه و میانی تغییرشکل، رفتار آگزتیک ساختار را تأیید می‌کند.

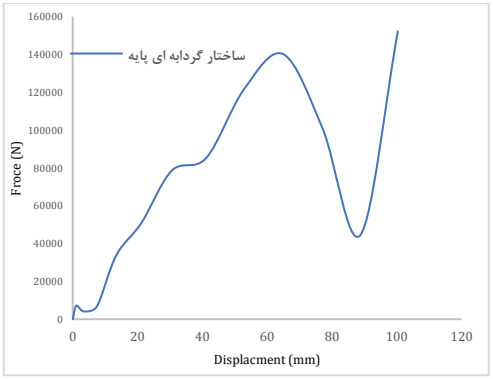
به‌منظور ارزیابی دقیق پایداری و دقت شبیه‌سازی شبه‌استاتیک انجام‌شده، انرژی‌های جنبشی[۶] و داخلی[۷] به عنوان معیارهای کلیدی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که در شکل۹ مشهود است، انرژی جنبشی در طول فرآیند بارگذاری، روندی صاف و پایدار را دنبال کرده و به طور قابل‌توجهی پایین‌تر از انرژی داخلی

باقی مانده است. عدم مشاهده‌ی نوسانات چشمگیر در منحنی انرژی جنبشی، مؤید انتخاب صحیح پارامتر مقیاس جرم و تضمین‌کننده‌ی ثبات عددی شبیه‌سازی در تمامی مراحل فرایند است.



شکل ۹ نمودار انرژی جنبشی به انرژی درونی

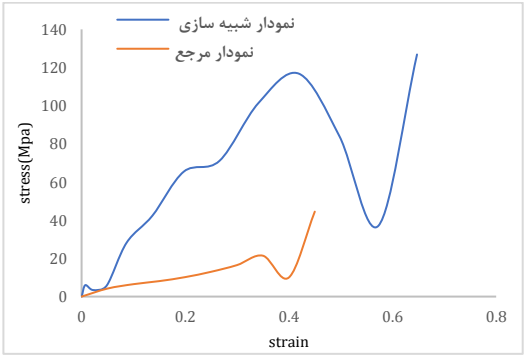
منحنی نیرو–جابه‌جایی ساختار گردابه‌ایِ پایه مطابق شکل ۱۰، نمایانگر یک پاسخ مکانیکی غیرخطی و چندمرحله‌ای است که چهار رژیم فیزیکی متمایز را آشکار می‌سازد. در مرحله نخست، شیب کمِ منحنی و سفتی اولیه محدود، ناشی از پدیده نشست و درگیری تدریجی لیگامنت‌های محیطی با فک‌های دستگاه بارگذاری است. در این فاز، تغییر شکل‌ها عمدتاً الاستیک بوده و به صورت جابه‌جایی‌های کوچک در مرزها ظاهر می‌شوند. با پیشرفت جابه‌جایی، منحنی وارد مرحله سفت شدن می‌شود؛ در در این ناحیه، ترکیب چرخش گره‌ها با خمش لیگامنت‌های قوسی، منجر به هم‌افزایی مکانیکی می‌شود که این فرآیند با افزایش صلبیت سازه، امکان دستیابی به حداکثر ظرفیت باربری (پیک بار) را فراهم می‌آورد. تمرکز تنش در قوس‌ها و مقاومت هندسی ساختار در برابر چرخش، عامل اصلی افزایش سفتی در این بازه است. بررسی روند تغییرشکل ساختار در جابه‌جایی‌های مختلف مطابق با تصاویر ارائه‌شده در شکل ۱۰، نشان می‌دهد که پس از عبور از نقطه اوج، افت ناگهانی نیرو با آغاز پدیده کمانش موضعی در لیگامنت‌ها و بازآرایی توپولوژیک شبکه همزمان است. در این مرحله، ساختار برای کاهش تمرکز تنش، دچار تغییر شکل‌های بزرگ چرخشی شده و وارد فاز نرم‌شوندگی می‌شود.جایی که ساختار برای رهایی از تمرکز تنش، دچار تغییر شکل‌های بزرگ چرخشی شده و وارد فاز نرم‌شوندگی می‌شود. این ناحیه، علی‌رغم کاهش نیرو، نقش کلیدی در جذب انرژی ایفا می‌کند، چرا که سطح زیر منحنی در جابه‌جایی‌های بزرگ را افزایش می‌دهد. در نهایت، با کاهش فضای خالی سلول‌ها و برخورد فیزیکی اجزای داخلی، مرحله متراکم‌شدن آغاز می‌گردد. در این فاز، به دلیل حذف فضاهای آزاد و تبدیل سازه به یک توده نیمه‌صلب، سختی مؤثر به صورت نمایی رشد کرده و نیرو با جهشی تند افزایش می‌یابد. اگرچه این ساختار ظرفیت جذب انرژی بالایی را نشان می‌دهد، اما نوسانات شدید نیرو و افت پس از پیک، ضرورت ترکیب این هندسه با المان‌های گردابه‌ای را جهت دستیابی به یک ناحیه تقریباً ثابت منحنی تنش–کرنش در حین لهیدگی پایدارتر و مدیریت بهتر بار پیشنهاد می‌دهد.



شکل ۱۰ نمودار نیرو- جابه جایی ساختار گردابه‌ای پایه

به‌منظور ارزیابی صحت روند پاسخ مدل عددی، منحنی تنش–کرنش حاصل از شبیه‌سازی حاضر با منحنی گزارش‌شده در مقاله مرجع زانگ و همکاران[38] مقایسه شد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، هر دو منحنی از نظر کیفی روند مشابهی را نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که مراحل افزایش اولیه تنش، رسیدن به بیشینه، افت تنش ناشی از شروع فروریزش ساختار و افزایش

مجدد تنش در ناحیه متراکم‌شدن، در هر دو پاسخ قابل تشخیص است. بااین‌حال، مقادیر تنش حاصل از شبیه‌سازی حاضر بیشتر از نتایج مقاله مرجع است. این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت جنس و خواص مکانیکی مواد به‌کاررفته در دو مطالعه است؛ در پژوهش مرجع از پلی‌یورتان ترموپلاستیک TPU[۶] با رفتار نرم و انعطاف‌پذیر استفاده شده است، درحالی‌که در مدل حاضر خواص مکانیکی پلی‌لاکتیک‌اسید تقویت‌شده (PLA+) به‌کار گرفته شده که از سختی و مقاومت بیشتری برخوردار است. همچنین، ازآنجاکه مشخصات کامل و دقیق مدل رفتاری ماده در مقاله مرجع ارائه نشده بود، امکان بازتولید کاملاً کمی نتایج آن وجود نداشت و شبیه‌سازی حاضر بر مبنای خواص مکانیکی ماده مورد استفاده در این پژوهش انجام شد. بنابراین، اختلاف موجود در دامنه تنش‌ها را نمی‌توان لزوماً ناشی از اشکال در روند شبیه‌سازی دانست؛ بلکه این اختلاف با تفاوت خواص مکانیکی و مدل رفتاری مواد سازگار است. بر این اساس، تطابق کیفی مراحل تغییر شکل و روند کلی منحنی‌ها، صحت عملکرد مدل عددی را از نظر بازتولید سازوکار کلی پاسخ فشاری تأیید می‌کند، هرچند این مقایسه به دلیل یکسان نبودن جنس و خواص مواد، به‌عنوان اعتبارسنجی کمی کامل در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۱۱ نمودار تنش و کرنش نمودار مقاله مرجع و نمودار شبیه سازی شده

۳ محاسبه جذب انرژی

وظیفه اصلی جاذب‌های انرژی کاهش انتقال نیروهای مخرب به اجزای سازه‌ای یا تجهیزات حساس است. به طور کلی، پاسخ تنش–کرنش چنین موادی را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم کرد: ناحیه الاستیک خطی، ناحیه پایداری تنش یا بخش تقریباً ثابت نیرو و منطقه متراکم شدن. کل انرژی جذب شده در طول فرآیند خرد کردن یا فشرده سازی با ادغام ناحیه زیر منحنی نیرو–جابجایی تا شروع فشردگی کرنش، همانطور که در رابطه (۴) بیان شده است، اندازه گیری می شود.

$$EA = \int_{.}^{l_D} F(x)dx = \int_{.}^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon)\, d\varepsilon \qquad (4)$$

که در آن، EAنشان دهنده انرژی جذب شده است، $F(x)$، x وdx به ترتیب نیروی فشاری، جابجایی و طول فشردگی اعمال می شوند. نمادهای $\sigma(\varepsilon)$ و ε نشان دهنده تنش و کرنش فشاری هستند و ε نشان دهنده کرنشی است که در آن ناحیه متراکم شروع می شود. در مواد فلزی، پس از مرحله الاستیک اولیه، یک منطقه قله معمولاً ظاهر می شود پس از ناحیه الاستیک، سازه وارد ناحیه لهیدگی تدریجی می‌شود که در آن لهیدگی پیشرونده تحت باری تقریباً ثابت رخ میدهد. پس از آن، ناحیه تراکم ایجاد می‌شود، جایی که فشرده‌سازی مداوم منجر به افزایش سریع تنش به دلیل فشردگی مواد می‌گردد. شناسایی شروع تراکم در مواد غیرفلزی، مانند پلیمرها یا شبکه‌های سلولی، چالش‌برانگیز است، زیرا منحنی‌های نیرو–جابه‌جایی اغلب قله‌های متعددی را در ناحیه لهیدگی تدریجی نشان می‌دهند که ممکن است کاملاً مسطح نباشند. در مطالعه حاضر، روش بهره وری انرژی برای تعیین شروع فشردگی، با راندمان جذب انرژی که با رابطه (۵) تعریف شده است، استفاده شد[40].

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon)d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \qquad (5)$$

[۶] Thermoplastic Polyurethane

در این فرمول، $\eta(\varepsilon)$بازده جذب انرژی، $\sigma(\varepsilon)$ نشان دهنده تنش آنی، و ε کرنش فشاری است. پس از محاسبه راندمان جذب انرژی، منحنی رسم می شود. کرنش مربوط به حداکثر بازده جذب انرژی به عنوان کرنش چگالی، εd در نظر گرفته می شود. انرژی جذب شده در واحد جرم، که به عنوان جذب انرژی خاص SEA_mنشان داده می شود، معمولاً برای ارزیابی و مقایسه عملکرد جذب انرژی مواد مختلف و پیکربندی های ساختاری استفاده می شود.

$$SEA_m = \frac{EA}{m} \qquad (6)$$

میانگین نیروی خرد کننده (MCF[۷]) به عنوان کل انرژی جذب شده EA تقسیم بر جابجایی خردکننده مربوطه (d) تعریف می شود. این پارامتر به عنوان یک معیار مهم برای ارزیابی توزیع بار در طول فرآیند تغییر شکل عمل می کند و راهنمایی ارزشمندی را برای بهینه سازی و طراحی سازه های جذب انرژی ارائه می دهد.

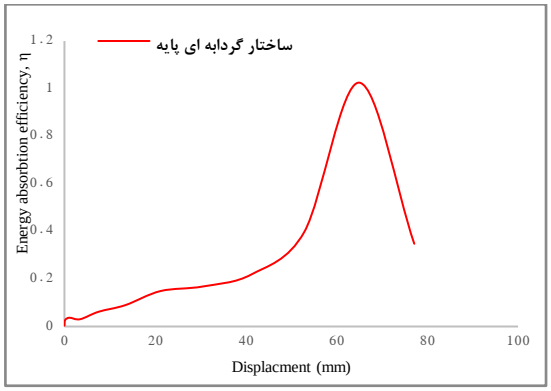
$$MCF = \frac{EA}{d} \qquad (7)$$

در معادله بالا، PCF[۸] نشان‌دهنده نیروی اوج لهیدگی است که به‌عنوان بیشترین نیروی تجربه‌شده در منحنی نیرو–جابه‌جایی، پیش از ورود سازه به ناحیه لهیدگی پایدار تعریف می‌شود. جذب انرژی ویژه (SEA) نیز که معیاری حیاتی در ارزیابی عملکرد مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیک و ضربه به شمار می‌رود، به‌عنوان نسبت انرژی کل جذب‌شده به جرم سازه تعریف می‌شود: به این معنا که با افزایش جرم، قابلیت کلی جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد، تشبیه یک جرم سنگین‌تر در شبیه‌سازی که توانایی بیشتری برای اتلاف انرژی دارد. با این حال، در حوزه طراحی‌های پیشرفته و نوآورانه، هدف اصلی دستیابی به حداکثر SEA با حداقل افزایش جرم است، که این امر نیازمند درک عمیق مکانیزم‌های جذب انرژی در مقیاس‌های مختلف (از اتمی تا ماکروسکوپی) و بهینه‌سازی ساختاری مواد است. معیار کلیدی برای ارزیابی و مقایسه این ساختارهای نوآورانه، سنجش همزمان درصد تغییرات در جرم و جذب انرژی است؛ به طوری که ساختاری به عنوان "بهینه" در نظر گرفته می‌شود که با کمترین افزایش نسبی جرم، بیشترین درصد افزایش جذب انرژی ویژه را از خود نشان دهد[42]. منحنی کارایی جذب انرژی η در شکل ۱۲، توانایی ساختار گردابه‌ایِ پایه را در تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی تغییر شکل پلاستیک در طول فرآیند بارگذاری فشاری به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار η در مراحل اولیه جابه‌جایی مقادیر اندکی را تجربه می‌کند که نشان‌دهنده عدم تقارن یا درگیری ناقصِ سلول‌های واحد با صفحات بارگذاری در فازهای نخستین است. با عبور از این فاز، روند صعودی منحنی آغاز شده و با شتابی مطلوب به سمت مقدار بیشینه خود (مقدار واحد یا نزدیک به آن در محدوده۶۵ میلی‌متر) حرکت می‌کند. این نقطه اوج، بیانگر «بهینه جذب انرژی» است؛ جایی که ساختار با بهره‌گیری از مکانیزم‌های ترکیبیِ خمش، چرخش و قفل‌شدگیِ لیگامنت‌ها، حداکثر حجم انرژی اعمالی را بدون وقوع ناپایداری‌های زودهنگام جذب می‌کند. پس از دستیابی به این قله، شیب منفی منحنی و کاهش مقدار ηدر انتهای نمودار، نشان‌دهنده ورود ساختار به مرحله‌ای از تغییرشکل ناپایدار و سپس فاز متراکم‌شدن است. در آغاز این بازه، کمانش موضعی برخی لیگامنت‌ها و دیواره‌های سلولی می‌تواند موجب تمرکز تغییرشکل، ناپایداری موضعی و کاهش مشارکت یکنواخت سایر بخش‌های ساختار در تحمل بار شود. با پیشرفت جابه‌جایی، افزایش سفت‌شدگی ناشی از نزدیک‌شدن و تماس دیواره‌های داخلی، همراه با محدودشدن فضای خالی سلول‌ها، موجب کاهش نرخ جذب انرژی به ازای واحد جابه‌جایی می‌شود. در این مرحله، ساختار به‌تدریج رفتاری نزدیک به یک توده صلب پیدا می‌کند و در نتیجه، با وجود افزایش نیروی فشاری، کارایی جذب انرژی آن کاهش می‌یابد. تحلیل توأمان این نمودار با رفتار نیرو–جابه‌جایی نشان می‌دهد که ساختار گردابه‌ایِ پایه در بازه جابه‌جایی ۵۰ تا ۷۰ میلی‌متر، بهترین عملکرد خود را در مدیریت ضربه و میرایی انرژی به نمایش می‌گذارد. این یافته، اهمیت شناسایی عملکرد مطلوب را در طراحی آگزتیک‌های

[۷] Mean Crushing Force

[۸] Peak Crushing Force

هیبریدی برجسته می‌سازد، چرا که هدف غایی در مهندسی این ساختارها، گسترشِ دامنه این اوجِ کارایی و جلوگیری از افت ناگهانی آن در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر است.



شکل ۱۲ نمودار راندمان-جابه جایی ساختار گردابه ای پایه

جدول ۵ شاخص‌های کلیدی عملکرد جذب انرژی ساختار گردابه‌ایِ پایه را شامل جرم، انرژی جذب‌شده ویژه نرمال‌شده SEAنیروی متوسط خردشدگی MCF و نیروی اوج خردشدگی PCF نشان می‌دهد. جرم ۱۲۴ گرم بیانگر ماهیت وزن سبک سازه است که خود یک مزیت مهم در کاربردهای ضربه‌گیر و جذب انرژی به‌شمار می‌رود. در عین حال، مقدار SEA:8/9 کیلو ژول بر کیلو گرم نشان می‌دهد که سازه توانسته است مقدار قابل‌توجهی انرژی را نسبت به جرم خود جذب کند، که این امر حاکی از کارایی مناسب توپولوژی گردابه‌ای در فعال‌سازی مکانیزم‌های خمش، چرخش و تغییر شکل تدریجی است. مقدار MCF:۰/۵۲ نیوتن نیز نشان می‌دهد که بار خردشدگی در طول فرآیند تغییر شکل در سطحی نسبتاً پایدار حفظ شده و سازه پس از آغاز بارگذاری، توانایی تحمل بار را با نوسان محدود ادامه داده است. از سوی دیگر، مقدار PCF:140/110 نیوتن نمایانگر مقاومت نهایی سازه در برابر آغاز فروپاشی موضعی است؛ با این حال، اختلاف میان نیروی اوج و نیروی متوسط نشان می‌دهد که پس از رسیدن به پیک، افت نسبی در باربری رخ داده است که مشخصه رفتار پساکمانشی در ساختارهای سلولی است. در مجموع، این نتایج بیانگر آن است که ساختار گردابه‌ایِ پایه اگرچه از نظر جذب انرژی و سبک‌وزنی عملکرد مطلوبی دارد، اما برای دستیابی به پاسخ باربری یکنواخت‌تر و کاهش نوسانات پس از پیک، بهینه‌سازی توپولوژی یا هیبریدسازی هندسی می‌تواند مفید واقع شود.

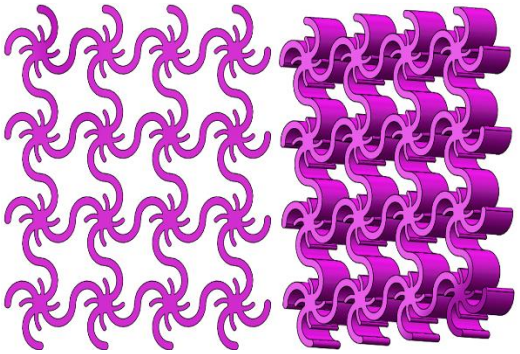
جدول۵ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده

	جرم (g)	SEA_η (KJ /kg)	MCF (N)	PCF (N)
ساختار گردابه‌ای پایه	۱۲۴	۸/۹	۹/۲	۱۴۰۱۱۰

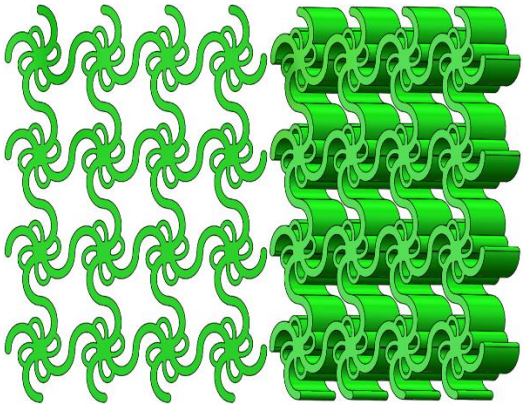
۴ نوآوری هندسی

باتوجه به نیاز به دستیابی به تعادل میان سبک وزنی، ظرفیت باربری و قابلیت جذب انرژی، در این پژوهش چهار پیکربندی هندسی متمایز از آگزتیک‌های هیبریدی گردابه‌ای توسعه یافته‌اند که در قالب یک رویکرد تکاملی طراحی، از ساختارهای ساده به سمت سیستم‌های هیبریدی پیچیده مطابق شکل ۱۳حرکت می کنند. نخستین پیکربندی، از هسته‌های گردابه‌ای سلسله‌مراتبی بهره می‌گیرد که در آن‌ها هندسه تکرارشونده در لایه های مختلف، هندسه پیشنهادی، به‌واسطه وجود هسته‌های تودرتو، امکان فعال‌شدن تدریجی سازوکارهای خمش و پیچش را در مراحل مختلف بارگذاری فراهم می‌کند. بر اساس توالی تغییرشکل مشاهده‌شده در شکل ۱۳، با افزایش جابه‌جایی، بخش‌های مختلف ساختار به‌صورت متوالی وارد فرآیند تغییرشکل می‌شوند و هسته‌های داخلی پس از تغییرشکل بخش‌های بیرونی در جذب انرژی مشارکت می‌کنند. این روند موجب توزیع مرحله‌ای تغییرشکل و جذب کنترل‌شده انرژی در ساختار می‌شود و از تمرکز ناگهانی تغییرشکل در یک ناحیه جلوگیری می‌کند. همچنین، نبود افت ناگهانی نیرو در بازه مورد بررسی نشان می‌دهد که ساختار، در شرایط تحلیل حاضر، بدون وقوع فروپاشی ناگهانی در مقیاس کلان، رفتار تغییرشکل نسبتاً پیشرونده‌ای از خود نشان می‌دهد. موضوعی که این پیکربندی را برای تحمل بارهای دینامیکی با دامنه جابه‌جایی وسیع مناسب می‌سازد. در ادامه، ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی معرفی شده است که به‌لطف ویژگی‌های هندسی بازگشتی خود، پاسخی غیرخطی و کاملاً کنترل‌شده در برابر

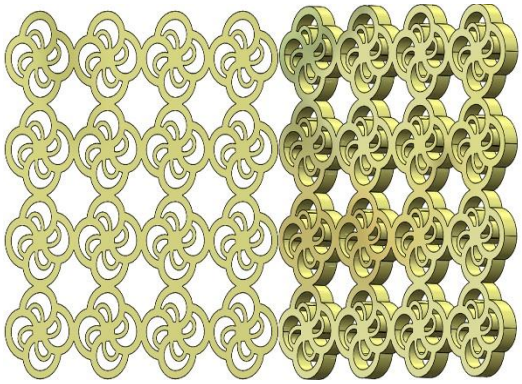
بارگذاری فشاری ایجاد می‌کند. ناپایداری‌های هندسی برنامه‌ریزی شده در این طرح، ظرفیت بالایی برای جذب انرژی از طریق تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک فراهم ساخته و با ایجاد مکانیزم فروپاشی تدریجی، آن را به گزینه‌ای ایده‌ال برای کاربردهای نیازمند میرایی شدید و مدیریت ضربه تبدیل میکند. در گام بعدی، شبکه گردابه‌ای محصور به‌عنوان پیکربندی سومی معرفی شده است که بر پایه ایجاد یک شبکه منسجم و یکپارچه از واحدهای گردابه‌ای در محیط‌های محصور طراحی شده است. پیوستگی کامل اتصالات در این ساختار، توزیع یکنواخت تنش در سراسر شبکه را تضمین کرده و نسبت به طرح‌های باز، استحکام ساختاری بالاتری ارائه می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که پایداری باربری این پیکربندی در طول فرآیند تغییر شکل و خردشدگی به شکل مطلوبی حفظ می‌شود. در نهایت، پیکربندی چهارم با رویکرد ترکیبی تقویت‌شده طراحی شده است که در آن عناصر گردابه‌ای پایه با المان تقویت‌کننده ادغام شده‌اند تا نقاط ضعف ساختارهای ساده‌تر مرتفع گردد. این هیبریدسازی در شکل ۱۳ هندسی، ظرفیت باربری سازه را به صورت چشمگیری افزایش داده و با جلوگیری از تخریب پیش از موعد ، تعادل بهینه‌ای بین سفتی و شکل‌پذیری ایجاد می‌کند که آن را برای شرایط کاری سخت و بارهای ضربه‌ای شدید مناسب می‌سازد. به این ترتیب، چهار پیکربندی ارائه‌شده در قالب یک سیر تکاملی پیوسته، هر یک با هدف پاسخگویی به نیازمندی‌های متفاوت در حوزه جذب انرژی و مدیریت بار طراحی شده‌اند و زمینه مناسبی را برای تحلیل عددی، مقایسه عملکردی و نهایتاً انتخاب ساختار بهینه در کاربردهای مهندسی فراهم می‌آورند.



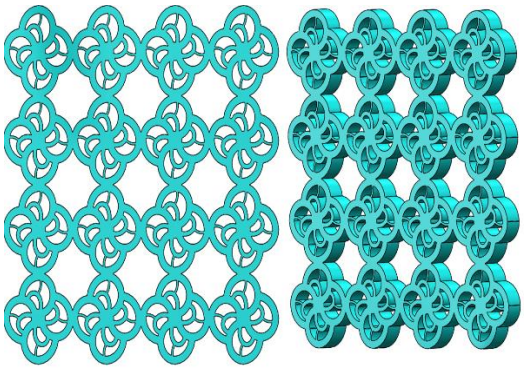
الف) ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتبی



ب) ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی



ج) ساختار شبکه گردابه‌ای محصور



د) ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده

شکل ۱۳ هندسه‌های نوآورانه مبتنی بر ساختار گردابه‌ای پایه: نمایش سلول واحد، آرایش دوبعدی سلول‌ها و مدل سه‌بعدی ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتبی، حلقه گردابه‌ای بازگشتی، شبکه گردابه‌ای محصور و گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده

در ادامه این پژوهش، شبیه‌سازی عددی ساختارهای آگزتیک گردابه‌ای نوآوری‌شده که هندسه آن‌ها در شکل ۱۳ معرفی شده است، بررسی شد. فرآیند شبیه‌سازی این ساختارها بر همان چارچوب مدلسازی به‌کاررفته برای ساختار گردابه‌ای پایه استوار است تا امکان مقایسه دقیق نتایج فراهم شود. به همین منظور، تمامی پارامترهای کلیدی شامل شرایط مرزی، نوع بارگذاری و روش تحلیل در هر دو مدل یکسان مطابق مقاله مرجع [38] در نظر گرفته شد. تفاوت اصلی تنها در افزایش پیچیدگی و ابعاد هندسی ساختارهای نوآوری‌شده است که به‌واسطه حضور هسته‌های سلسله‌مراتبی، حلقه‌های بازگشتی، شبکه‌های محصور و المان‌های تقویت‌کننده، موجب افزایش چشمگیر تعداد المان‌ها و در نتیجه افزایش حجم محاسبات گردیده است. با این حال، مراحل اصلی شبیه‌سازی شامل ایجاد مدل هندسی، تعریف خواص مواد، اعمال شرایط مرزی و اجرای تحلیل عددی بر پایه یک چارچوب مشترک انجام شد. این یکپارچگی در فرآیند مدلسازی، امکان مقایسه دقیق و مستند رفتار مکانیکی مدل‌های پایه و نوآوری‌شده را فراهم ساخته و زمینه مناسب برای ارزیابی دقیق اثر تغییرات هندسی بر عملکرد ساختارهای پیشنهادی به وجود می‌آورد.

۴-۱ نتایج شبیه سازی

ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتب‌وار

شبیه‌سازی‌های المان محدود انجام‌شده بر روی ساختارهای نوآورانه اطلاعات ارزشمندی را در خصوص رفتار مکانیکی، نحوه توزیع تنش فون‌میسز و پایداری هندسی آن‌ها تحت بارگذاری فشاری در اختیار می‌گذارد. در ساختار هسته گردابه‌ای سلسله مراتب‌وار (شکل۱۴الف)، نتایج تحلیل نشان‌دهنده تمرکز شدید تنش کانتورهای قرمز رنگ در بخش تکیه‌گاهی بالایی و هسته پیچشی متصل به آن است. مکانیزم اصلی تغییر شکل در این هندسه، بر پایه خمش رباط‌های رابط و متعاقباً چرخش هسته‌های پی‌ریزی شده است. با توجه به ماهیت تودرتوی طرح، هسته مرکزی به عنوان لایه دوم دفاعی در جذب انرژی عمل کرده و تا پیش از دفرمه شدن کامل بازوهای بیرونی، در سطوح پایین‌تری از تنش (محدوده آبی و سبز) باقی می‌ماند. این پدیده تاییدکننده رفتار چندمرحله‌ای و سلسله مراتبی ساختار در اتلاف انرژی است.

ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی

با نگاهی به ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی (شکل ۱۴ ب)، مشاهده می‌شود که تغییر در ساختار اتصال و ایجاد انحناهای بازگشتی، الگوی توزیع تنش را دستخوش تغییر نموده است. بازوهای منحنیِ گردابه‌ای در این ساختار نقش لولاهای پلاستیک را ایفا می‌کنند. تمرکز تنش در محل اتصال حلقه‌های بازگشتی با ستون تکیه‌گاهی فوقانی بسیار مشهود است. انعطاف‌پذیری بیشتر رباط‌ها در این هندسه سبب چرخش دورانی شدیدتر در مقایسه با ساختار الف شده است. این تغییر شکل چرخشی بزرگ به ساختار اجازه می‌دهد تا با نرخ ملایم‌تری به پیک نیرو نزدیک شود و انرژی ضربه را از طریق فروپاشی کنترل‌شده است.

ساختار شبکه گردابه‌ای محصور

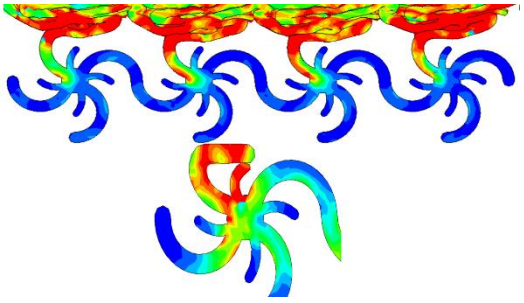
در ساختار شبکه گردابه‌ای محصور (شکل۱۴ج)، هندسه محصور حلقه‌های گردابه‌ای سبب توزیع متقارن‌تر و یکنواخت‌تر کانتورهای تنش در تمام جهات بازوها شده است. تقارن هندسی بالا و وجود اتصالات صلب در دیواره‌ها، مسیرهای انتقال بار موازی متعددی را ایجاد کرده است. در این ساختار، بخش اعظم رباط‌های بالایی و هسته مرکزی تحت تنش‌های فشاری-خمشی ترکیبی قرار گرفته و رنگ سبز و زرد در کانتورها غالب است. این حالت نشان‌دهنده مشارکت حداکثری بخش‌های مختلف شبکه در تحمل بار است که پایداری سازه‌ای بالا، افزایش سفتی اولیه و مقاومت در برابر کمانش موضعی زودهنگام را به همراه دارد.

ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده

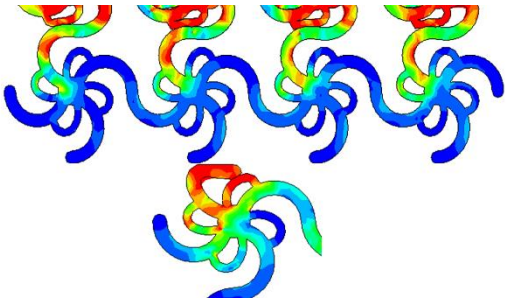
در نهایت، ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده (شکل۱۴ د) بالاترین ظرفیت باربری را از خود نشان می‌دهد. حضور المان‌های تقویت‌کننده داخلی در این طرح، به عنوان تکیه‌گاه‌های صلب محلی عمل کرده و به صورت مستقیم مسیر انتقال نیرو را صلب‌تر می‌کنند. تمرکز کانتورهای قرمز در اتصالات تقویت‌کننده و بخش فوقانی نشان می‌دهد که این المان‌ها به خوبی بخش زیادی از

نیروهای فشاری را جذب و خنثی می‌کنند و از تسلیم زودهنگام رباط‌های ظریف جانبی جلوگیری می‌نمایند.در ساختار ترکیبی، به‌دلیل مشارکت مرحله‌ای اجزای مختلف در تحمل بار، آغاز تغییرشکل خمشی شدید به مراحل بالاتر بارگذاری منتقل می‌شود. در نتیجه، پس از شروع کمانش، افت نیروی تحملی محدودتر بوده و ساختار می‌تواند در ناحیه پساکمانشی، نیرو را در یک بازه نسبتاً پایدار حفظ کند. این رفتار موجب ایجاد یک ناحیه لهیدگی تدریجی طولانی‌تر در منحنی نیرو–جابجایی می‌شود و برای کاربردهای جذب انرژی، زیرا امکان جذب انرژی بیشتر بدون کاهش ناگهانی نیروی مقاوم را فراهم می‌کند، مطلوب است.

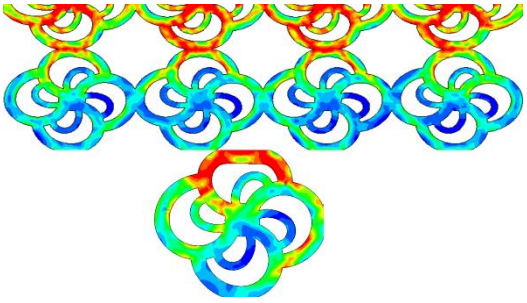
رفتاری که در سیستم‌های جذب انرژی پیشرفته جهت دستیابی به یک فاز تثبیت نیروی طولانی‌مدت بسیار حیاتی است.



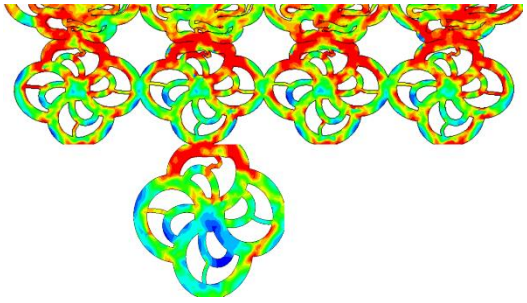
الف) ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتبی



ب) ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی



ج) ساختار شبکه گردابه‌ای محصور

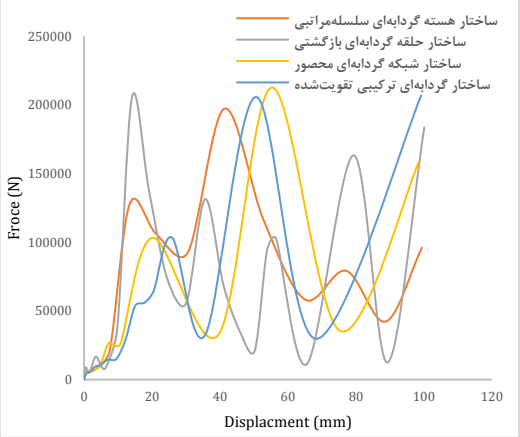


د) ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده

شکل ۱۴ مقایسه توزیع تنش فون‌میسس در ساختارهای گردابی اصلاح‌شده تحت بارگذاری فشاری؛ نمایش نحوه عملکرد ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتبی، حلقه گردابه‌ای بازگشتی، شبکه گردابه‌ای محصور و گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده

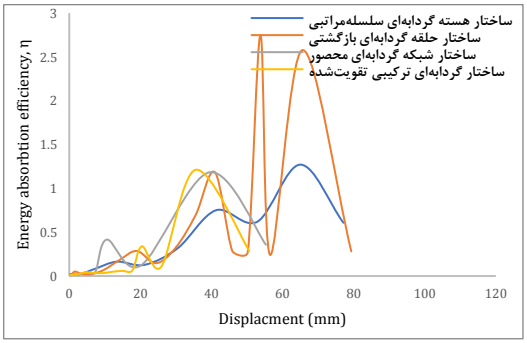
ارزیابی عملکرد مکانیکی ساختارهای طراحی‌شده تحت بارگذاری فشاری، بیانگر ارتباط مستقیم میان توپولوژی هندسی و ظرفیت جذب انرژی آن‌هاست. تحلیل توزیع تنش فون‌میسز در کنار منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی، مکانیزم‌های پیچیده تغییر شکل مطابق شکل ۱۵ را در این آگزتیک‌ها آشکار می‌سازد. در فاز ابتدایی بارگذاری، ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی به دلیل صلبیت خمشی بالای رباط‌های منحنی، سریع‌ترین واکنش را به بار اعمالی نشان داده و به بالاترین پیک نیروی اولیه در میان تمامی ساختارها دست می‌یابد. با این حال، بررسی کانتورهای تنش نشان می‌دهد که تمرکز شدید تنش در محل اتصال حلقه‌ها به ستون‌های تکیه‌گاهی، منجر به تشکیل لولاهای پلاستیک زودهنگام می‌شود. این پدیده در نمودار نیرو-جابه‌جایی به صورت افت شدید باربری پس از پیک اول نمایان گشته و نوسانات شدیدی را در فاز پساکمانشی ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده ناپایداری ساختاری در مواجهه با ضربات ناگهانی است. در مقابل، ساختار هسته گردابه‌ای

سلسله‌مراتب‌وار رویکرد متفاوتی را در اتلاف انرژی برمی‌گزینند. وجود هسته‌های تودرتو باعث می‌شود که فرآیند تسلیم به صورت چندمرحله‌ای رخ دهد. کانتورهای تنش در این مدل نشان می‌دهند که تا پیش از دفرمه شدن کامل بازوهای بیرونی، هسته‌های داخلی در سطوح پایین‌تری از انرژی باقی می‌مانند. این امر در منحنی نیرو-جابه‌جایی با ایجاد پیک‌های متوالی و منظم در فواصل مشخص بازنمایی شده است. این رفتار منجر به تشکیل یک ناحیه لهیدگی تدریجی پایدار و پهن می‌گردد که برای جذب انرژی یکنواخت و جلوگیری از انتقال شتاب‌های مخرب به سازه اصلی، بسیار ایده‌آل است. از سوی دیگر، ساختار شبکه گردابه‌ای محصور به دلیل بهره‌گیری از تقارن هندسی بالا و دیواره‌های محدودکننده، توزیع تنش متقارن‌تری را تجربه می‌کند. صلبیت ناشی از محصوریت شبکه باعث می‌شود که این ساختار در برابر کمانش موضعی مقاومت بیشتری نشان داده و دیرتر به پیک نیروی خود برسد. این تأخیر در رسیدن به نقطه تسلیم، پایداری هندسی مناسبی را در تغییر شکل‌های بزرگ فراهم می‌کند، هرچند که از نظر سطح نیروی میانگین، در جایگاهی پس از مدل‌های سلسله‌مراتب‌وار و ترکیبی قرار می‌گیرد. در نهایت، ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده به عنوان بهینه‌ترین پیکربندی از منظر تعادل میان سختی و شکل‌پذیری معرفی می‌شود. در این ساختار، المان‌های تقویت‌کننده داخلی نقش ستون‌های باربر محلی را ایفا کرده و با تغییر مسیر انتقال تنش، از تسلیم زودهنگام رباط‌های ظریف جلوگیری می‌کنند. اگرچه پیک اول این ساختار کمتر از مدل بازگشتی است، اما توانایی آن در حفظ و حتی افزایش ظرفیت باربری در جابه‌جایی‌های بزرگ (بیش از ۸۰ میلی‌متر) مشهود است. صعود مداوم منحنی در فاز نهایی بارگذاری نشان‌دهنده ورود موفق به فاز متراکم‌شدن بدون تجربه افت شدید نیرو است.



شکل ۱۵ نمودار نیرو-جابه جایی ساختارهای نوآورانه گردابی

شکل ۱۶ نشان می‌دهد بازده جذب انرژی چهار ساختار با افزایش جابه‌جایی رفتاری غیرخطی و نوسانی دارد که ناشی از تغییر شکل مرحله‌ای، خمش اعضا و چرخش هسته‌های گردابه‌ای است. ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی بیشترین بازده لحظه‌ای را در جابه‌جایی‌های میانی نشان می‌دهد، اما افت سریع پس از قله بیانگر کاهش پایداری آن در ادامه فشردگی است. در مقابل، ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتبی و ساختار ترکیبی تقویت‌شده عملکرد یکنواخت‌تری دارند و بازده جذب انرژی را در بازه گسترده‌تری حفظ می‌کنند. همچنین شبکه گردابه‌ای محصور رفتاری میانی دارد و به دلیل توزیع مناسب‌تر بار، نوسانات کنترل‌شده‌تری از خود نشان می‌دهد. بنابراین، اگرچه ساختار بازگشتی بیشترین بازده لحظه‌ای را دارد، ساختارهای ترکیبی و سلسله‌مراتبی از نظر پایداری جذب انرژی مناسب‌تر ارزیابی می‌شوند.



شکل ۱۶ راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه های شبیه سازی شده ساختارهای نوآورانه گردابه‌ای

مطابق جدول ۶ با داده‌ها، یک رابطه مستقیم میان افزایش پیچیدگی هندسی (و به تبع آن جرم) با توانمندی جذب انرژی وجود دارد. ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده با جرم 291/5 گرم، بالاترین میزان SEA_m معادل (KJ /kg) 49/8 را به ثبت رسانده است. در مقابل، ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتبی با کمترین جرم (210/6گرم)، پایین‌ترین بازده انرژی (KJ /kg) 12/5را داراست. مقایسه این دو نشان می‌دهد که با افزایش حدود ۳۸ درصدی جرم در مدل ترکیبی تقویت‌شده، ظرفیت جذب انرژی ویژه نزدیک به ۴ برابر بهبود یافته است که نشان‌دهنده کارایی بالای استراتژی تقویت در بهینه‌سازی توپولوژی است.

در شاخص PCF، تفاوت فاحشی میان پیکربندی‌ها مشاهده می‌شود. ساختار شبکه گردابه‌ای محصور با مقدار 212636/2، بالاترین نیروی ضربه اولیه را ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده سختی بالای این شبکه به دلیل محصورشدگی سلول‌هاست. نکته قابل توجه در ساختار ترکیبی تقویت‌شده است؛ این ساختار با وجود داشتن بالاترین SEA، نیروی اوج خود را در محدوده 103272/8 کنترل کرده است (تقریباً نصف مدل محصور). این کاهش ۵۱ درصدی PCF در مدل ترکیبی نسبت به مدل محصور، نشان‌دهنده توانایی این هندسه در تعدیل ضربه اولیه و جلوگیری از انتقال بارهای مخرب است.

شاخص MCFنشان‌دهنده میانگین نیروی تحمل‌شده توسط سازه در طول فرآیند لهیدگی است. مقدار بالاتر MCFبیانگر تحمل نیروی متوسط بیشتر و در نتیجه ظرفیت بالاتر سازه برای جذب انرژی در طول تغییرشکل است؛ بااین‌حال، این شاخص به‌تنهایی معیار مستقیمی برای سنجش پایداری نیرو نیست.ساختار سلسله‌مراتبی با مقدار 0/74 بالاترین میزان MCF را دارد که نشان‌دهنده رفتار سخت‌شونده در جابه‌جایی‌های پایین است. در سمت دیگر، ساختار ترکیبی تقویت‌شده با مقدار 0/34، کمترین میزان MCF را ثبت کرده است. ترکیب این MCF پایین با SEA بالا در مدل ترکیبی، بیانگر وجود یک «ناحیه تنش ثابت» طولانی و ایده‌آل است؛ به این معنا که ساختار بدون نیاز به اعمال نیروی میانگین بسیار بالا، توانسته است حجم بالایی از انرژی را از طریق تغییر شکل‌های پلاستیک پایدار جذب کند.

ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی در موقعیت میانی قرار دارد؛ این مدل با SEA_m معادل (KJ /kg)25/5 و PCF حدود 205704، رفتاری مشابه با مدل شبکه محصور از نظر سختی اولیه نشان می‌دهد، اما از نظر کارایی انرژی (SEA) حدود ۴۳ درصد ضعیف‌تر از مدل محصور عمل کرده است. این موضوع تأکید می‌کند که محصور کردن شبکه گردابه‌ای، تأثیر به‌سزایی در ارتقای بازدهی انرژی نسبت به مدل‌های حلقوی ساده دارد.

جدول ۶ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده ساختارهای نوآورانه گردابه‌ای

نوآورانه	جرم (g)	SEA_m(KJ/ kg)	MCF	PCF
ساختار هسته گردابه‌ای سلسله‌مراتبی	210/6	12/5	۲۱/۹	19716
ساختار حلقه گردابه‌ای بازگشتی	234/4	۲۵/۵	۴۹/۸	205704
ساختار شبکه گردابه‌ای محصور	۲۸۶/۸	۴۵/۲	۱۰۸	212636/2
ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده	۲۹۱.۵	۴۹/۸	۱۲۰/۴	103272/8

۵ نتیجه‌گیری

۱- دستاورد محوری و هندسه بهینه

در میان پیکربندی‌های مختلف ارزیابی‌شده در این پژوهش، ساختار گردابه‌ای ترکیبی تقویت‌شده به عنوان هندسه برگزیده و بهینه معرفی شد. ارزیابی‌های رفتاری نشان داد که این طرح نوین به دلیل توزیع بهینه تنش و مکانیسم چرخشی سلول‌های واحد، قادر است توازنی ارتقایافته میان کاهش وزن (جرم ساختاری) و افزایش ظرفیت جذب انرژی (SEA) برقرار سازد؛ توازنی که به دلیل تمرکز تنش شدید یا فروریزش ناگهانی، در سایر ساختارهای متداول مشاهده نگردید. این کارایی مکانیکی منحصربه‌فرد، ساختار توسعه‌یافته را به گزینه‌ای بسیار کارآمد و ایدهآل جهت استفاده در

هسته پنل‌های ساندویچی تحت بارهای ضربه‌ای، سپرهای محافظتی خودروسازی و تجهیزات جاذب انرژی هوافضا تبدیل می‌کند.

۲- یافته‌های مرتبط با کنترل نیرو و پایداری سازه

یافته‌های عددی این پژوهش نشان داد که ساختار گردابه‌ای ترکیبی، علیرغم برخورداری از ظرفیت جذب انرژی بالا، رفتار ضربه‌گیری ملایمی از خود نشان می‌دهد. این پیکربندی توانسته است نیروی واکنش اوج را به شکل معناداری در مقایسه با ساختارهای صلب و محصور متداول کاهش دهد. در منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی این ساختار، یک ناحیه سکوی طولانی و پایدار مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تغییر شکل هموار سلول‌ها تحت بارگذاری است. این رفتار هموار مانع از انتقال تنش‌های شوک‌آور و مخرب به سازه زیرین یا سرنشینان می‌گردد. علاوه بر این، مکانیسم فروریزش ساختار کاملاً بر پایه تغییر شکل پلاستیک کنترل‌شده استوار است که نوسانات شدید نیرو و ناپایداری‌های ناگهانی ناشی از پساکمانش را به حداقل می‌رساند.

۳- محدودیت‌های اساسی پژوهش

- هرچند نتایج این تحقیق کارایی بالای هندسه پیشنهادی را اثبات می‌کند، اما تعمیم کاربردی آن با محدودیت‌های زیر همراه است:
- محدودیت در نرخ کرنش: ارزیابی‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های این مطالعه صرفاً تحت بارگذاری‌های فشار شبه‌استاتیک انجام شده و رفتار دینامیکی ساختار در شرایط ضربه پرسرعت و نرخ‌های کرنش بالا مورد بررسی قرار نگرفته است.
- چالش‌های ساخت و تولید: پیچیدگی هندسی لیگامان‌های گردابه‌ای و دیواره‌های تقویت‌کننده، ساخت این متامواد را با روش‌های قالب‌گیری و تولید سنتی ناممکن یا بسیار هزینه‌بر می‌سازد؛ از این رو تولید آن‌ها وابستگی شدیدی به روش‌های ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی) با دقت و رزولوشن بالا دارد.
- ناشناخته بودن رفتار چرخه عمر: رفتار خستگی ساختار تحت بارگذاری‌های تکرارشونده و دوره‌ای، و همچنین دوام طولانی‌مدت هسته آگزتیک در شرایط واقعی، در این فاز از پژوهش بررسی نشده است.

۴. چشم‌انداز و پیشنهادهای آتی

- در راستای تکمیل این پژوهش و ارتقای کاربرد صنعتی متامواد پیشنهادی، محورهای زیر برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود:
- بررسی قابلیت‌های آکوستیکی و ارتعاشی: مطالعه رفتار میرایی ارتعاشات و خواص جذب صوت ساختار، با توجه به قابلیت میرایی ذاتی ناشی از حرکت چرخشی هسته‌های گردابه‌ای.
- بهینه‌سازی هوشمند ساختاری: استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و بهینه‌سازی توپولوژی جهت تعیین چیدمان و ضخامت بهینه المان‌های تقویت‌کننده به صورت متغیر در فضا.
- ارزیابی عملکرد در شرایط محیطی سخت: مطالعه رفتار ترمومکانیکی و تغییر شکل این متامواد آگزتیک در شرایط دمایی متغیر (دماهای بسیار بالا یا پایین) به منظور سنجش قابلیت اطمینان آن‌ها در بدنه فضاپیماها و خودروهای نسل جدید.

۶ تقدیر و تشکر

نویسنده مراتب سپاس و قدردانی خود را از تمامی افرادی که در انجام این پژوهش با ارائه دیدگاه‌های علمی، راهنمایی‌های تخصصی و همکاری‌های ارزشمند یاری‌رسان بوده‌اند، صمیمانه اعلام می‌دارند. همچنین از همراهی و حمایت تمامی همکاران و پژوهشگرانی که در پیشبرد این تحقیق نقش مؤثری داشته‌اند، قدردانی می‌شود.

منابع

[1] K.E. Evans, K.L. Alderson, Auxetic materials: the positive side of being negative, Eng. Sci. Educ. J. 9 (2000) 148–154.
[2] M. Mir, M.N. Ali, J. Sami, U. Ansari, Review of mechanics and applications of auxetic structures, Adv. Mater. Sci. Eng. 2014 (2014) 753496. https://doi.org/10.1155/2014/753496.
[3] K.L. Alderson, A. Fitzgerald, K.E. Evans, The strain dependent indentation resilience of auxetic microporous polyethylene, J. Mater. Sci. 35 (2000) 4039–4047. https://doi.org/10.1023/A:1004830103411.
[4] J.B. Choi, R.S. Lakes, Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis, Int. J. Fract. 80 (1996) 73–83. https://doi.org/10.1007/BF00036481.
[5] Z. Wang, A. Zulifqar, H. Hu, Auxetic composites in aerospace engineering, in: S. Rana, R. Fangueiro (Eds.), Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering, Woodhead Publishing, 2016: pp. 213–240.
[6] W. Hou, X. Yang, W. Zhang, Y. Xia, Design of energy-dissipating structure with functionally graded auxetic cellular material, Int. J. Crashworthiness 23 (2018) 366–376. https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1328764.
[7] M. Sanami, N. Ravirala, K. Alderson, A. Alderson, Auxetic materials for sports applications, Procedia Eng. 72 (2014) 453–458. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.079.
[8] V. Mironov, T. Boland, T. Trusk, G. Forgacs, R.R. Markwald, Organ printing: computer-aided jet-based 3D tissue engineering, Trends Biotechnol. 21 (2003) 157–161. https://doi.org/10.1016/S0167-7799(03)00033-7.
[9] R. Lakes, Foam structures with a negative Poisson's ratio, Science 235 (1987) 1038–1040. https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038.
[10] Q. Wang, Z. Yang, Z. Lu, X. Li, Mechanical responses of 3D cross-chiral auxetic materials under uniaxial compression, Mater. Des. 186 (2020) 108226. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108226.
[11] J. Grima, A. Alderson, K. Evans, Auxetic behaviour from rotating rigid units, Phys. Status Solidi 242 (2005) 561–575. https://doi.org/10.1002/pssb.200460376.
[12] L. Ai, X.L. Gao, Three-dimensional metamaterials with a negative Poisson's ratio and a non-positive coefficient of thermal expansion, Int. J. Mech. Sci. 135 (2018) 101–113. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.042.
[13] S. Tomita, et al., Transition of deformation modes from bending to auxetic compression in origami-based metamaterials for head protection from impact, Sci. Rep. 13 (2023) 12221. https://doi.org/10.1038/s41598-023-39200-
[14] S. Farhangdoust, G. Georgeson, J.-B. Ihn, F.-K. Chang, Kirigami auxetic structure for high efficiency power harvesting in self-powered and wireless structural health monitoring systems, Smart Mater. Struct. 30 (2021) 015037. https://doi.org/10.1088/1361-665X/abcaaf.
[15] J.X. Qiao, C.Q. Chen, Impact resistance of uniform and functionally graded auxetic double arrowhead honeycombs, Int. J. Impact Eng. 83 (2015) 47–58. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.04.005.
[16] Q. Liu, J. Ma, Z. He, Z. Hu, D. Hui, Energy absorption of bio-inspired multi-cell CFRP and aluminum square tubes, Compos. Part B Eng. 121 (2017) 134–144. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.034.
[17] H. Jiang, Y. Ren, Q. Jin, G. Zhu, Y. Hu, F. Cheng, Crashworthiness of novel concentric auxetic reentrant honeycomb with negative Poisson's ratio biologically inspired by coconut palm, Thin-Walled Struct. 154 (2020) 106911. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106911.
[18] H. Huang, S. Xu, Crashworthiness analysis and bionic design of multi-cell tubes under axial and oblique impact loads, Thin-Walled Struct. 144 (2019) 106333. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106333.
[19] X.C. Zhang, N.N. Liu, C.C. An, H.X. Wu, N. Li, K.M. Hao, Dynamic crushing behaviors and enhanced energy absorption of bio-inspired hierarchical honeycombs with different topologies, Def. Technol. 22 (2023) 99–111. https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.11.013.
[20] M. Zou, S. Xu, C. Wei, H. Wang, Z. Liu, A bionic method for the crashworthiness design of thin-walled structures inspired by bamboo, Thin-Walled Struct. 101 (2016) 222–230. https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.12.023.
[21] F. Wang, Systematic design of 3D auxetic lattice materials with programmable Poisson's ratio for finite strains, J. Mech. Phys. Solids 114 (2018). https://doi.org/10.1016/j.jmps.2018.01.013.
[22] H. Yang, B. Wang, L. Ma, Designing hierarchical metamaterials by topology analysis with tailored Poisson's ratio and Young's modulus, Compos. Struct. 214 (2019) 359–378. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.076.
[23] Y. Zheng, Y. Wang, X. Lu, Z. Liao, J. Qu, Evolutionary topology optimization for mechanical metamaterials with auxetic property, Int. J. Mech. Sci. 179 (2020) 105638. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105638.
[24] C. Nguyen, X. Zhuang, L. Chamoin, X. Zhao, H. Nguyen-Xuan, T. Rabczuk, Three-dimensional topology optimization of auxetic metamaterial using isogeometric analysis and model order reduction, Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 371 (2020) 113306. https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113306.

auxetic rectangular plate," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 94, pp. 3455–3467, 2024, doi: 10.1007/s00419-024-02678-3.

[35] S. Soltanmohammadi, J. Ghanbari, R. Adelkhani, and N. Mohandesi, "Novel reentrant auxetic meta-structure inspired by spider silk microstructure: Analytical investigation on mechanical properties," *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 27, no. 3, pp. 162–187, 2026, doi: **10.1080/15502287.2026.2679427**.

[۳۶] M. Murariu and P. Dubois, "PLA composites: From production to properties," Elsevier, 2016.

[۳۷] M. Seetoh et al., "Extremely stiff and lightweight auxetic metamaterial designs enabled by asymmetric strut cross-sections," Materials, vol. 15, no. 18, p. 6428, 2022.

[۳۸] Zhang, X. G., Ren, X., Jiang, W., Zhang, X. Y., Luo, C., Zhang, Y., & Xie, Y. M. (2022). A novel auxetic chiral lattice composite: Experimental and numerical study. Composite Structures, 282, 115043 https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115043

[۳۹] M. Najafi, H. Ahmadi, and G. Liaghat, "Experimental and numerical investigation of energy absorption in auxetic structures under quasi-static loading," Modares Mechanical Engineering, vol. –, 2020.

[۴۰] Wang H, Lu Z, Yang Z, Li X. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance. Compos Struct 2019;208:758–70. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.024. 2019/01/15/.

[۴۱] N. A. Bhatti and M. A. Wahab, "Finite element analysis of fretting fatigue under out of phase loading conditions," Tribology International, vol. 109, pp. 552–562, 2017.

[۴۲] C. W. Isaac and C. Ezekwem, "A review of the crashworthiness performance of energy absorbing composite structure within the context of materials, manufacturing and maintenance for sustainability," Composite Structures, vol. 257, p. 11308, 2021.

[25] M. Xu, Z. Xu, Z. Zhang, L. Lei, Y. Bai, D. Fang, Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: theoretical and experimental studies, Int. J. Mech. Sci. 159 (2019) 43–57. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.05.044.

[26] H. Wang, Z. Lu, Z. Yang, X. Li, A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance, Compos. Struct. 208 (2019) 758–770. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.024.

[27] A. Ingrole, A. Hao, R. Liang, Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement, Mater. Des. 117 (2017) 72–83. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.067.

[28] P. Fan, Y. Chen, J. Xiong, H. Hu, In-plane mechanical properties of a novel hybrid auxetic structure, Smart Mater. Struct. 31 (2022) 075003. https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac68b5.

[29] C. Qi, et al., Quasi-static crushing behavior of novel re-entrant circular auxetic honeycombs, Compos. Part B Eng. 197 (2020) 108117. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108117.

[30] W. Lv, D. Li, L. Dong, Study on mechanical properties of a hierarchical octet-truss structure, Compos. Struct. 249 (2020) 112640. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112640.

[31] E. Taherkhani, M.R. Parsaiyan, M. Mardani, Analysis of the effect of geometric changes on the energyabsorption performance of honeycomb structures, J. Mech. Smart Struct. 2 (2026) 1044. https://doi.org/10.30511/jmms.2026.2087786.1044 (in Persian).

[32] Taherkhani, E., & Paykar, H. "Investigation of Geometry and Energy Absorption Capacity in Re-entrant and Star-Shaped Structures." In press, 2026. https://doi.org/10.22034/stme.2026.582366.1215

[33] N. Mohandesi, M. Fadaee, and M. Talebitooti, "Nonlinear vibration of simply supported star-shaped auxetic cylindrical shell," *Archive of Applied Mechanics*, vol. 95, no. 202, 2025.

[34] N. Mohandesi, M. Talebitooti, and M. Fadaee, "Mathematical modeling of free vibration of star-shaped