DOI: 10.30511/jmms.2026.2105386.1077 - ISSN: 3060-8384- Vol 2(3), 2026

MECHANICS OF SMART STRUCTURES

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

QOM UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Numerical Investigation into the Mechanical Behavior and Energy Absorption Performance of Reinforced Auxetic and Classical Structures under Quasi-Static Compressive Loading

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Erfan taherkhani [1*], Mohammad reza Parsaeiyan[2], Mahdi mardani [3]

[1] M.Sc. in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Applied Design Major, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
erfan.taherkhani2128@gmail.com
[2] PhD Student in Mechanical Engineering (Applied Design), Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.
m.r.parsaeiyan@gmail.com
[3] PhD Student in Mechanical Engineering (Applied Design), Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.
mehdimardani20457@gmail.com

* Correspondence
Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Applied Design Major, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
erfan.taherkhani2128@gmail

Article History
Received: September 8, 2026
Accepted: November 2, 2026
ePublished: November 2, 2026

ABSTRACT

Reinforced auxetic cellular structures offer significant potential for energy absorption and crashworthiness due to their negative Poisson's ratio and uniform stress distribution. In this study, five reinforced configurations—Star-shaped, Honeycomb, Re-entrant, Arrowhead, and Hitler-shaped—were numerically investigated under quasi-static compression. The reinforced star-shaped structure achieved the best crashworthiness performance, exhibiting the highest specific energy absorption SEA=47.1 kJ/kg with a mass of 5.85 g, a controlled peak crushing force (PCF=5126.29 N), and an efficiency of 0.48 at an 18 m displacement. In contrast, the honeycomb design suffered post-collapse instability despite an initial efficiency of 0.94, while the re-entrant configuration, having the highest mass (17.07 g) and peak force (8252.22 N), provided an efficiency of only 0.34 Progressive plastic hinge formation in the star structure mitigated stress concentration, ensuring a stable plateau regime (5000–5500 N) and uniform collapse prior to densification.

Keywords: Auxetic structures, Energy absorption, Specific energy absorption (SEA), Energy absorption efficiency, Classical structures, Numerical simulation.

بررسی عددی رفتار مکانیکی و عملکرد جذب انرژی ساختارهای آگزتیک و کلاسیک تقویت‌شده تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک

عرفان طاهرخانی*

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

محمد رضا پارساییان

دانشجو دکتری مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی، دانشگاه بو علی سینا، همدان، ایران

مهدی مردانی

دانشجو دکتری مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی، دانشگاه بو علی سینا، همدان، ایران

چکیده

ساختارهای سلولی آگزتیک تقویت‌شده به‌دلیل ضریب پواسون منفی، تغییرشکل جانبی همگرا و قابلیت مطلوب در توزیع یکنواخت تنش، از گزینه‌های کارآمد در سامانه‌های جاذب انرژی و حفاظت ضربه‌ای به‌شمار می‌روند. در این پژوهش، رفتار مکانیکی و راندمان جذب انرژی پنج پیکربندی تقویت‌شده کلاسیک شامل ساختارهای «ستاره‌ای»، «لانه‌زنبوری»، «درون‌سو»، «سرنیزه‌ای» و «هیتلری» تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک به روش اجزای محدود مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوی مهاربندی داخلی و هندسه اتصالات، اثر مستقیمی بر جرم، نیروی خردشدگی بیشینه اولیه(PCF) ، نیروی خردشدگی میانگین (MCF) و انرژی ویژه جذب‌شده (SEA) دارد. ساختار تقویت‌شده ستاره‌ای با جرم 5/85 گرم، بالاترین انرژی ویژه جذب‌شده معادل 47/1 کیلوژول بر کیلوگرم، نیروی بیشینه کنترل‌شده 5126/29 نیوتن و بیشینه راندمان جذب انرژی 0/48در جابه‌جایی 18 میلی‌متر را ثبت کرد و به‌عنوان پیکربندی بهینه با بیشترین کارایی وزنی شناخته شد. در مقابل، ساختار تقویت‌شده لانه‌زنبوری با وجود ثبت راندمان لحظه‌ای اولیه 0/94، به دلیل ناپایداری لایه‌ای با افت شدید راندمان مواجه گردید و ساختار درون‌سو با جرم 17/07 گرم و بالاترین نیروی بیشینه (8252/22 نیوتن)، راندمان 0/34 را ارائه داد. تحلیل مکانیزم‌های تغییرشکل نشان داد که تشکیل متوالی لولاهای پلاستیکی در بازوهای ساختار ستاره‌ای ضمن مهار تمرکز تنش، فاز فلات پایدار (۵۰۰۰ تا ۵۵۰۰ نیوتن) و فروریزش یکنواخت را تا پیش از شروع تراکم نهایی فراهم می‌سازد.

کلید واژه‌ها

ساختارهای آگزتیک، جذب انرژی، انرژی ویژه جذب‌شده(SEA) ، راندمان جذب انرژی، ساختار کلاسیک ، شبیه‌سازی عددی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۱۱

* نویسنده مسئول: erfan.taherkhani2128@gmail

۱ مقدمه

مواد اگزتیک دسته‌ای منحصربه‌فرد از متامواد هستند که از نسبت پواسون منفی بهره می‌برند. رفتار این مواد برعکس مواد متداول است؛ بدین صورت که هنگام اعمال کشش، در جهت عمود بر نیروی واردشده ضخیم‌تر می‌شوند و در مقابل، هنگام اعمال نیروی فشاری، در راستای عرضی جمع (منقبض) می‌گردند [۱, ۲]. اصطلاح «اگزتیک» اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط اونز برای توصیف این پدیده وضع شد [۱]. با این حال، سال‌ها پیش از این نام‌گذاری، پژوهشگران متعددی این رفتار را بررسی کرده بودند؛ از جمله در سال ۱۸۴۸، سن‌ونان[۱] نخستین فردی بود که با استفاده از روابط کوشی، احتمال وجود نسبت پواسون منفی را در جامدات ناهمسانگرد مطرح کرد [۲, ۳]. امروزه با به‌کارگیری روش‌های نوین ساخت و با ایجاد تغییر در ساختار مواد مرسوم از قبیل پلیمرها،

[۱] Saint-Venant

فلزات، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها و الیاف، طیف گسترده‌ای از این مواد تولید شده است [۴]. این تنوع مقیاس و ساختار، پتانسیل کاربردی بسیار بالایی را در حوزه‌های مختلف مهندسی فراهم کرده است [۵]. علاوه بر ساختارهای سنتزی، نمونه‌هایی از رفتار اگزتیک در طبیعت نیز مشاهده شده است؛ چنان‌که زیست‌شناسان نسبت پواسون منفی را علاوه بر کانی‌ها، در پوست گربه، پوست سمندر و بافت استخوان اسفنجی بخش فوقانی درشت‌نی گزارش کرده‌اند [۶–۹]. از دیدگاه عملکرد مکانیکی، هنگام برخورد یک جسم خارجی به ماده اگزتیک، نسبت پواسون منفی سبب جمع شدن ماده در محل برخورد شده و مقاومت در برابر فرورفتگی را در مقایسه با مواد معمولی به میزان چشمگیری افزایش می‌دهد [۱۰–۱۲]. همچنین این مواد تحت لنگر خمشی، انحنای هم‌مرکز تشکیل داده و به حالت گنبدی تغییر شکل می‌دهند؛ رفتاری که آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای پوشش سطوح منحنی، سازه‌های سبک و المان‌های نما تبدیل کرده است [۱۳, ۱۴]. علاوه بر این، ظرفیت اتلاف و جذب انرژی در مواد اگزتیک بسیار بالاتر از مواد معمولی است. اسکارپا و همکاران نشان دادند که تحت بارگذاری تناوبی، ظرفیت میراسازی انرژی در فوم‌های اگزتیک تا ۱۰ برابر بیشتر از فوم‌های مرسوم است [۱۵, ۱۶]. آن‌ها در ادامه با استفاده از این فوم‌ها، پارچه‌های صوتی تولید کردند که جذب صوت را در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰ هرتز تا ۵۰ درصد ارتقا داد [۱۷]. ویژگی‌های مطلوب دیگری نظیر نفوذپذیری متغیر، چقرمگی شکست بالاتر و مدول برشی ارتقایافته نیز توسط محققان متعدد به اثبات رسیده است [۱۸–۲۱]. در حوزه مهندسی ایمنی و ورزش‌های پرخطر نظیر اتومبیل‌رانی و موتورسواری، استفاده از ساختارهای اگزتیک در تجهیزات محافظتی (مانند کلاه‌های ایمنی و زانوبندها) شدت آسیب‌های وارده را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد [۲۲]. آلن و همکاران اثبات کردند که استفاده از ضربه‌گیرهای مجهز به فوم اگزتیک، حداکثر شتاب ناشی از ضربه را در مقایسه با ضربه‌گیرهای استاندارد تا ۳ برابر کاهش می‌دهد [۲۳]. همچنین در مهندسی خودرو، ساختارهای ری‌انترانت به دلیل پدیده تراکم داخلی، پس از حذف بار فشاری دچار تاخوردگی الاستیک شده و مجدداً به حالت اولیه خود بازمی‌گردند [۲۴]. در مهندسی عمران نیز کاربرد شبکه‌های اگزتیک در دیوارهای بنایی سبب افزایش تغییرشکل‌پذیری جانبی، جذب انرژی بالاتر و در نتیجه کاهش خسارات سازه‌ای می‌شود [۲۵]. زهرا و همکاران با افزودن فوم اگزتیک پلی‌یورتان به ملات سیمانی مشاهده کردند که تردی و ورقه ورقه شدن ملات پلیمری به شدت کاهش می‌یابد [۲۶]. محققان متعددی گزارش کرده‌اند که استفاده از ماتریس‌های بتنی و سیمانی با الگوی اگزتیک موجب بهبود چشمگیر جذب انرژی ویژه، مقاومت به ترک‌خوردگی خستگی، مقاومت برشی، شکل‌پذیری و اثر محصورشدگی می‌گردد [۲۷–۳۰]. ساختارهای شبکه‌ای اگزتیک گسترده‌ترین رده از این مواد به‌شمار می‌روند. ساختار لانه‌زنبوری ری‌انترانت نخستین ساختار اگزتیک مهندسی‌شده است که در سال ۱۹۸۲ توسط گیبسون معرفی شد [۳۱]. پس از آن، پژوهشگران با بررسی تأثیر پارامترهایی چون ضخامت جداره، ابعاد سلول، زوایای داخلی و تعداد سلول‌ها به بهینه‌سازی آن پرداختند [۳۲–۳۶]. همچنین رفتار الاستیک ساختار RE[۲] توسط مسترز، برینسکی، یانگ، نواک و وانگ و همکاران مورد تحلیل قرار گرفت [۳۷–۳۹]. مطالعات متعدد روی پانل‌های ساندویچی تحت بارهای ضربه‌ای و دینامیکی، برتری قاطع ساختارهای RE نسبت به نمونه‌های متداول را تأیید کرده است [۴۰–۴۲]. از سوی دیگر، ساختار پیکانی یا آروهد که نخستین بار توسط لارسن و همکاران معرفی شد، از دیگر ساختارهای دارای ظرفیت جذب انرژی بالا است [۴۳]. ژائو و همکاران از طریق مدل‌سازی عددی نشان دادند که مقاومت ساختار AR[۳] در برابر ضربات دینامیکی مستقیماً به چگالی نسبی و سرعت برخورد بستگی دارد [۴۴]. گو نیز نشان داد که کاهش ضریب لاغری، افزایش ابعاد سلول و افزایش زاویه داخلی ساختار AR موجب ارتقای جذب انرژی ویژه (SEA) می‌شود [۴۵]. رمنیکوف و

[۲] Re-entrant

[۳] Aspect Ratio

همکاران با مقایسه رفتار ساختارهای مختلف تحت تغییرشکل‌های بزرگ به این نتیجه رسیدند که ساختار AR بالاترین میزان جذب انرژی را ارائه می‌دهد و ساختار RE پایدارترین و قابل‌اعتمادترین رفتار را در میراسازی انرژی به نمایش می‌گذارد [۴۶]. در همین راستا، طاهرخانی و همکاران [۴۷]، اثر اصلاحات هندسی را بر پایداری فراماده با هند فراماده با هندسه آگزتیک بررسی کردند. نتایج نشان داد که ایجاد زیرساختارهای داخلی و تقویت مسیرهای انتقال بار، می‌تواند پایداری تغییرشکل و ظرفیت جذب انرژی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. همچنین، ترکیب بهینه پیکربندی‌های درون‌سو، عملکرد سازه را در کاربردهای صنعتی سبک‌وزن بهبود می‌بخشد. در مطالعه‌ای دیگر، طاهرخانی و همکاران [۴۸]، رفتار مکانیکی و شاخص‌های جذب انرژی سه خانواده از ساختارهای آگزتیک شامل ساختارهای درون‌سو، ستاره‌ای و ترکیبی را تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک درون‌صفحه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل درجه ۲ در خانواده‌های درون‌سو و ستاره‌ای، به‌ترتیب با دستیابی به جذب انرژی ویژه ۸/۴ و ۹/۶ کیلوژول بر گرم، عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های پایه دارد. سلطان‌محمدی و همکاران [۴۹] یک متاساختار اگزتیک بازورود نوین با الهام از ریزساختار ابریشم عنکبوت معرفی کرده با تئوری تیر خمیده و قضیه کاستیلیانو به‌صورت تحلیلی استخراج نمودند که نتایج آن با شبیه‌سازی المان محدود همخوانی بسیار بالایی داشت. مهندسی و همکاران [۵۰] به مدل‌سازی ریاضی ارتعاشات آزاد صفحه مستطیلی اگزتیک با الگوی ستاره‌ای پرداختند؛ آن‌ها فرکانس‌های طبیعی را با تئوری کلاسیک صفحه و روش ریلی-ریتز مبتنی بر چندجمله‌ای‌های چبیشف محاسبه و اعتبارسنجی کردند. مهندسی و همکاران [۵۱] ارتعاشات غیرخطی و تشدید اصلی پوسته استوانه‌ای اگزتیک ستاره‌ای با تکیه‌گاه ساده را در تغییرشکل‌های بزرگ بررسی کردند؛ معادلات دینامیکی حاکم را به روش مقیاس‌های چندگانه و رانگ-کوتا حل نمودند.

مرور منابع نشان می‌دهد که مواد اگزتیک با برخورداری از نسبت پواسون منفی، ظرفیت بالای جذب انرژی، مقاومت برتر در برابر فرورفتگی و تغییر شکل گنبدی تحت خمش، جایگاه ویژه‌ای در طراحی سازه‌های سبک‌وزن و ایمنی‌محور یافته‌اند. در میان این ساختارها، پیکربندی‌های لانه‌زنبوری درون‌سو، سرنیزه‌ای و ستاره ای به‌عنوان پرکاربردترین هندسه‌های کلاسیک شناخته می‌شوند؛ با این حال، هر یک با چالشه‌ایی نظیر تمرکز موضعی تنش، افت زودهنگام ظرفیت یا پیچیدگی ساخت روبه‌رو هستند.

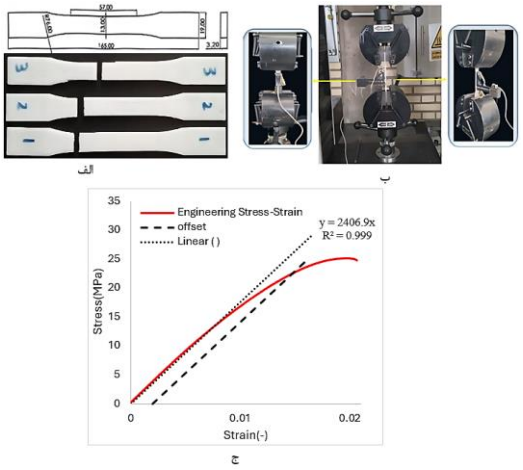
بر همین اساس، هدف پژوهش حاضر، ارزیابی مقایسه‌ای و عددی رفتار مکانیکی و شاخص‌های جذب انرژی ساختارهای کلاسیک اگزتیک (درون‌سو، سرنیزه‌ای، ستاره‌ای و لانه‌زنبوری) تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیک درون‌صفحه‌ای است تا ضمن شناسایی نقاط قوت و محدودیت‌های هر پیکربندی، بستر علمی مناسبی برای توسعه توپولوژی‌های ترکیبی و بهینه‌سازی نسل آینده سازه‌های جاذب انرژی فراهم شود.

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+ 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+[۴]، آزمون کشش مطابق با

[۴] Polylactic Acid

استاندارد ASTM-D638 انجام گرفت [۵۲]. هندسه نمونه مطابق شکل (۱ب) و نمونه‌های مورد استفاده در این آزمون با استفاده از دستگاه سنتام موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی‌سینا مطابق شکل (۱الف) مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل۱ آزمایش کشش PLA+ (الف) نمونه نصب شده در دستگاه Santam، (ب) سه نمونه استاندارد ، (ج) نمودار تنش-کرنش

همان‌طور که در شکل (۱ج) 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 ۱ ماده در مدل‌سازی عددی به‌کار گرفته شدند.

جدول۱ خواص مکانیکی pla+

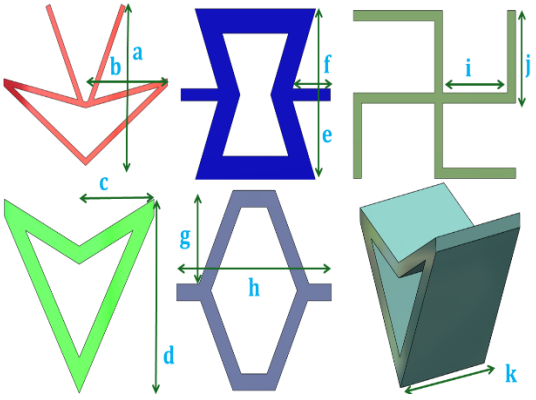
چگالی (kg/m̆)[53]	ضریب پواسون[53]	مدول یانگ(MPa)	تنش تسلیم (MPa)
1250	۰/۳	۲۴۰۶/۹	۲۲/۴۷

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

2-1 هندسه‌های اگزتیک کلاسیک

در این پژوهش، مدل‌سازی هندسی ساختارهای شبکه‌ای آگزتیک با مبنای هندسه ساختار های لانه زنبوری، درون‌سو، سرنیزه‌ای، ستاره‌ای و هیتلری 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 ۲ ارائه شده است.



شکل۲ هندسه سلول‌های واحد آگزتیک با مبنای ساختار های لانه زنبوری، درون‌سو، سرنیزه‌ای، ستاره‌ای و هیتلری

در این پژوهش ساختار ستاره‌ای ، درون سو ، لانه زنبوری و هیتلری به‌عنوان پیکربندی‌های مرجع انتخاب و مدل‌سازی شدند. این ساختارها نماینده خانواده‌های شناخته‌شده سلول‌های آگزتیک در ادبیات پژوهشی هستند و هر یک مکانیزم تغییرشکل مشخصی دارند؛ به‌طوری که در سلول لانه‌زنبوری، خم شدن دیواره‌های سلولی، در سلول درون‌سو، باز شدن گوشه‌های داخلی فرورفته، در سلول سرنیزه‌ای، چرخش و لغزش بازوهای مورب و در سلول لانه زنبوری، اتصال بازو به صورت بیرون رفتگی، مبنای بروز رفتار

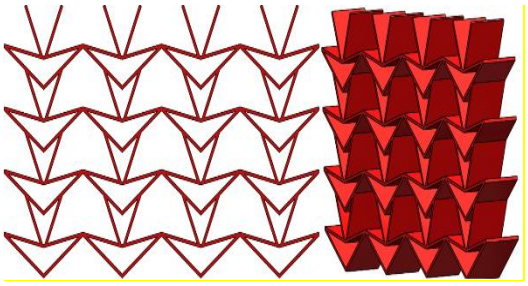
نسبت پواسون منفی و جذب انرژی است. هدف از لحاظ‌کردن این هندسه‌ها، ایجاد یک مبنای مقایسه‌ای معتبر برای سنجش میزان بهبود ظرفیت جذب انرژی و رفتار فشاری ساختار کلاسیک پیشنهادی است. مدل‌سازی هندسی تمامی ساختارهای کلاسیک،، با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks و مطابق با ابعاد استاندارد تعریف‌شده در ادبیات پژوهشی انجام شد. به‌منظور دستیابی به مقایسه‌ای منصفانه و علمی، ابعاد و مشخصات هندسی این ساختارها به‌گونه‌ای تنظیم گردید که تراکم نسبی و جرم نمونه‌ها در محدوده قابل‌مقایسه با ساختار پایه قرار گیرد؛ چرا که جرم و تراکم نسبی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ظرفیت جذب انرژی ویژه (SEA) سازه‌های سلولی هستند. مطابق با آنچه در شکل ۲ و جدول ۳ ارائه شده است، گزارش گردید.

جدول ۳ اندازه و ابعاد پارامترهای هندسی ساختار های کلاسیک

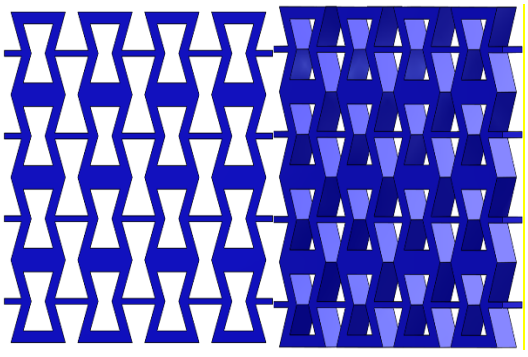
پارامتر هندسی	نماد	اندازه
ارتفاع ساختار سر نیزه ای	a	۲۰(mm)
طول یک طرف نیزه	b	۱۰(mm)
طول بالک ساختار ستاره ای	c	۱۰ (mm)
ارتفاع ساختار ستاره ای	d	۲۰(mm)
ارتفاع ساختار درون سو	e	۷(mm)
طول بالک کوچک ساختار درون سو	f	۲۰(mm)
ارتفاع نصف ساختار لانه زنبوری	g	۱۰(mm)
طول ساختار لانه زنبوری	h	۲۰(mm)
ارتفاع بالک ساختار هیتلری	i	۱۰(mm)
طول بالک ساختار هیلتری	j	۱۰(mm)
عرض ساختار ستاره ایی(ثابت در تمام ساختار ها)	k	۲۰(mm)

۲-۲ طراحی ساختار های کلاسیک

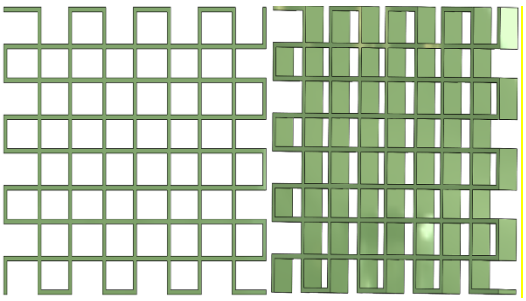
به‌منظور ارزیابی جامع کارایی ساختار های کلاسیک پیشنهادی، پنج هندسه اگزتیک و مرجع شامل ساختارهای سرنیزه‌ای، درون‌سو، هیتلری، ستاره‌ای و لانه‌زنبوری مدل‌سازی شدند. هر یک از این پیکربندی‌ها مکانیزم تغییرشکل متمایزی دارند؛ به‌طوری که ساختار سرنیزه‌ای برپایه چرخش و لغزش بازوهای مورب، ساختار درون‌سو بر اساس گشایش گوشه‌های داخلی و انقباض جانبی، ساختار هیتلری بر مبنای چرخش گره‌های مرکزی، و ساختار لانه‌زنبوری از طریق خمش دیواره‌های سلولی رفتار می‌کنند. در مقابل، ساختار ستاره‌ای پیشنهادی با تلفیق بازوهای شعاعی و هسته مرکزی، از مکانیزم هم‌زمان خمایش بازوها و تغییرشکل هسته بهره می‌برد. برای تضمین اعتبار مقایسه، تمامی نمونه‌ها با عمق اکستروژن یکسان و جرم و تراکم نسبی کنترل‌شده تحلیل شدند و پارامترهای هندسی آن‌ها مطابق جدول (۳) تنظیم گردید. مقایسه عملکردی این ساختارها نشان می‌دهد که پیکربندی‌های درون‌سو و ستاره‌ای مطابقت شکل ۳، به‌دلیل گشایش تدریجی سلول‌ها و توزیع همگن تنش، پلاتوی نیروی پایدارتر و ظرفیت جذب انرژی ویژه (SEA) بالاتری ارائه می‌دهند؛ در حالی که ساختار لانه‌زنبوری فاقد رفتار اگزتیک ذاتی بوده و ساختارهای سرنیزه‌ای و هتلری به‌ترتیب با افت زودهنگام تنش و پیچیدگی‌های ساخت مواجه‌اند. بنابراین، عملکرد بهینه این سازه‌ها حاصل هم‌افزایی سه عامل توپولوژی، تراکم نسبی و صلبیت اتصالات است. در افق آینده، روند پژوهش به سمت مقایسه ساختار ها و علاوه بر این ایجاد نواوری در ساختار ها برای افزایش تحمل بار های مکانیکی و جذب انرژی پیش می رویم.



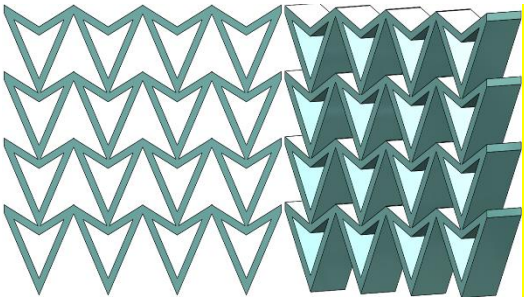
الف) ساختار سرنیزه‌ای



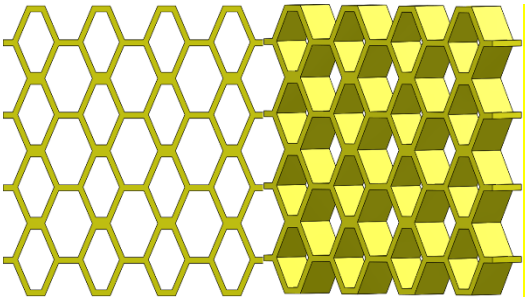
ب) ساختار درون‌سو



ج) ساختار هیتلری



د) ساختار ستاره‌ای



ه) ساختار لانه زنبوری

شکل ۳ مدل‌سازی هندسی ساختار آگزتیک کلاستیک الف) ساختار سرنیزه‌ای ب) ساختار درون سو ج) ساختار هیتلری د) ساختار ستاره‌ای ه) ساختار لانه زنبوری

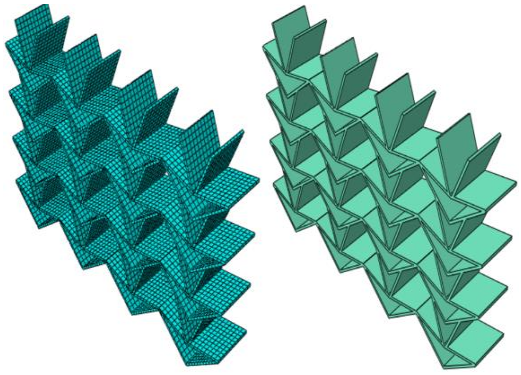
۳-۲ شبیه سازی هندسی

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 ۸). به‌منظور تعریف دقیق رفتار مکانیکی ماده در شبیه‌سازی، از مدل الاستیک-پلاستیک همسانگرد برای پلیمر PLA استفاده شد. 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[۵] و نیروی متوسط لهیدگی MCF[۶] 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

[۵] Specific Energy Absorption

[۶] Mean Crushing Force

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 نجفی و همکاران انجام شد [۵۴]؛ 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 مطابق شکل ۴ 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.



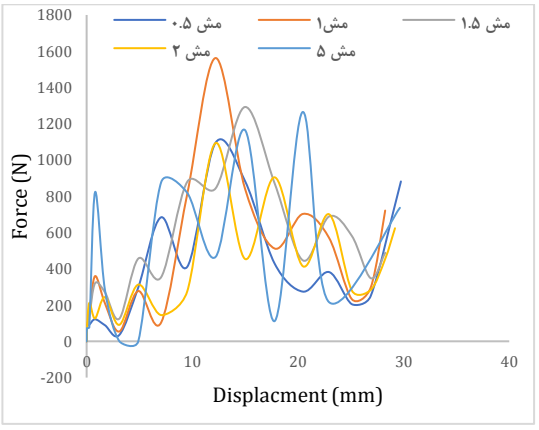
شکل ۴- مدل هندسی و شبکه‌بندی اجزای محدود ساختار سرنیزه‌ای

۴-۲ همگرایی شبکه

به منظور اطمینان از قابلیت اطمینان و دقت نتایج حاصل از تحلیل المان محدودFEA[۷] ، مطالعه همگرایی مش انجام شد. این مطالعه شامل شبیه‌سازی پاسخ سازه تحت بار فشاری با استفاده از اندازه‌های مختلف المان مش بود: ۰٫۵، ۱، ۱٫۵، ۲ و ۵ میلی‌متر. در روش‌شناسی مورد استفاده، المان‌های سه‌بعدی C3D8R با قابلیت تغییرشکل بزرگ و تنظیمات تماس با ضریب اصطکاک ۰٫۳ به کار گرفته شدند. کنترل انرژی ساعت‌شنی نیز برای جلوگیری از مودهای تغییرشکل با انرژی صفر فعال شد .نمودارهای نیرو–جابجایی ارائه شده در شکل ۵، رفتار همگرایی را نشان می‌دهند. مشاهدات کلیدی به شرح زیر است :مش‌های درشت‌تر (۵ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر): این مش‌ها انحرافات قابل توجهی در منحنی‌های نیرو–جابجایی نشان می‌دهند، که بیانگر حساسیت حل به گسسته‌سازی مش است. قله‌ها و دره‌های نیرو ثبت شده کمتر پالایش یافته و پاسخ کلی هنوز پایدار نیست .مش‌های متوسط تا ریز (۱٫۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر): تطابق چشمگیری بین منحنی‌های حاصل از مش‌های ۱ میلی‌متر و ۱٫۵ میلی‌متر مشاهده می‌شود. این همبستگی نزدیک نشان‌دهنده رسیدن حل عددی به حالت استقلال از مش است؛ به طوری که اصلاح بیشتر مش منجر به تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پاسخ سازه نمی‌شود .ریزترین مش

[۷] Finite Element Method

(۰,۵ میلی‌متر): اگرچه مش ۰,۵ میلی‌متر دقیق‌ترین پاسخ را ارائه می‌دهد، اما در مقایسه با مش‌های ۱ و ۱,۵ میلی‌متر، بهبود قابل توجهی در رفتار کلی پاسخ نیرو–جابجایی ایجاد نمی‌کند. با توجه به افزایش چشمگیر هزینه‌های محاسباتی مرتبط با مش‌های ریزتر، استفاده از مش ۰,۵ میلی‌متر برای شبیه‌سازی‌های گسترده از نظر عملی مقرون‌به‌صرفه نیست .نتیجه‌گیری: بر اساس مطالعه همگرایی مش، اندازه‌های مش ۱ میلی‌متر و ۱,۵ میلی‌متر به عنوان پارامترهای بهینه انتخاب شدند. این انتخاب، تعادل ایده‌آلی بین دستیابی به حل بسیار دقیق و مستقل از مش، و حفظ کارایی محاسباتی برقرار می‌کند و در نتیجه، اعتبار و عملی بودن شبیه‌سازی‌های FEA بعدی را تضمین می‌نماید. در این راستا، برای ارزیابی استقلال نتایج از شبکه، مش‌بندی ساختار های کلاسیک مطابق شکل ۵ ارائه شده است. ؛ مشابه آنچه در مرجع مذکور برای کالیبراسیون و تطبیق مدل عددی با نتایج تجربی گزارش شده است [۵۴]. این روند در نهایت امکان ارزیابی واقع‌بینانه‌تر رفتار فشاری ساختار و افزایش اعتبار نتایج شبیه‌سازی را فراهم ساخت.



شکل ۵ بررسی همگرایی مش ساختارسر نیزه ای

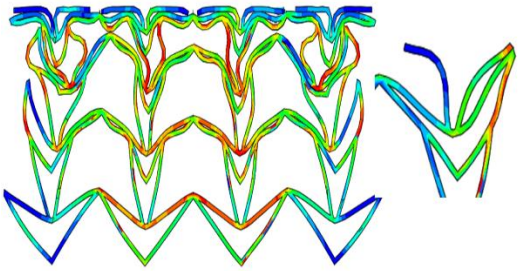
به منظور حصول اطمینان از اعتبار نتایج عددی و استقلال پاسخ‌های ساختاری از شبکه‌بندی (مش)، یک مطالعه سیستماتیک بر روی اندازه المان‌ها و تأثیر آن‌ها بر انرژی جذب‌شده ویژه (SEA) انجام شد. نتایج این تحلیل در جدول ۴ ارائه شده است. فرآیند گسسته‌سازی به‌صورت هدفمند ریزتر شد تا حساسیت پاسخ‌های انرژی به چگالی مش ارزیابی گردد. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار SEA وابستگی محسوسی به اندازه مش دارد، به‌ویژه در مدل‌هایی با مش‌بندی درشت. مقدار SEA با ریزتر شدن مش از ۵ میلی‌متر به ۱ میلی‌متر، به‌صورت صعودی از ۸/۸KJ/kg به ۹/۶KJ/kg افزایش یافته است. این روند صعودی نشان می‌دهد که مش‌های درشت‌تر (۵ و ۲ میلی‌متر) فاقد دقت لازم برای ثبت مکانیزم‌های پیچیده لولای پلاستیک موضعی و ناپایداری‌های دیواره سلولی در ساختار ستاره‌ای پیشنهادی بوده‌اند. با ادامه فرآیند ریزسازی مش، مقادیر SEA به یک رفتار پایدار و همگرا نزدیک می‌شوند. نکته قابل تأمل این است که با ریزتر کردن مش از ۱ میلی‌متر به ۰,۵ میلی‌متر، مقدار SEA با تغییری جزئی از ۹/۶KJ/kg به ۹/۵KJ/kg می‌رسد. این اختلاف بسیار ناچیز (کمتر از ۱ درصد)، نشان‌دهنده دست‌یابی حل به رفتار مجانبی و «استقلال از شبکه» است؛ به این معنی که با مش ۱ میلی‌متر، دقت لازم کسب شده و ریزتر کردن بیشتر آن، بهبود معناداری در دقت عددی ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این، استفاده از مش ۰,۵ میلی‌متری منجر به افزایش غیرمتناسب در درجات آزادی و بار محاسباتی می‌شود، بدون آنکه افزایش دقت قابل ملاحظه‌ای به همراه داشته باشد. از این رو، اندازه مش ۱ میلی‌متر به عنوان پارامتر بهینه انتخاب گردید، چرا که ضمن حفظ بالاترین دقت عددی ۹/۶KJ/kg بهره‌وری محاسباتی را برای تمامی تحلیل‌های پارامتریک بعدی تضمین می‌کند.

جدول۴ مقایسه جذب انرژی ویژهSEA مش بندی

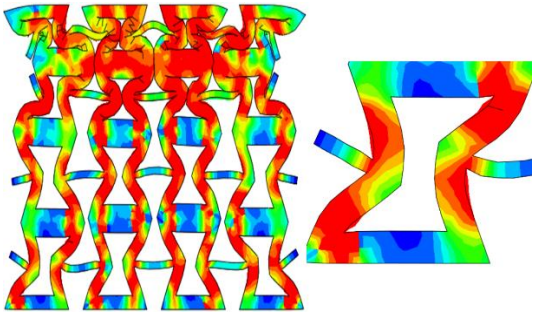
اندازه مش	0/5	1	1/5	2	۵
SEA KJ/kg	۹/۵	۹/۶	۹/۴	۹/۲	۸/۸

شکل ۶ شبیه‌سازی شده کانتور تنش فون میزس، نمودار نیرو-جابجایی و تصاویر کانتورهای سطحی/سفتی نشان می‌دهد چگونه هر ساختار به‌طور متفاوتی از لحاظ مکانیزم‌های تغییرشکل عمل می‌کند و چگونه این مکانیسم‌ها با توزیع تنش در نقاط کلیدی ارتباط برقرار می‌کنند. در ساختار سرنیزه‌ای با وجود داشتن نقاط نوک V و لولاهای پلاستیک در اتصالات، تن این ناحیه نشان‌دهنده

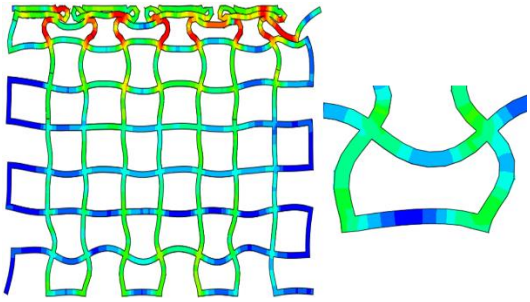
محل شکل‌گیری لولاهای پلاستیک و مسیر اصلی جذب انرژی است و به‌رغم وجود خمش‌های داخلی، توزیع تنش نسبتاً غیر یکنواخت باقی می‌ماند. در ساختار درون‌سو خم‌شدن دنده‌های مایل به داخل به شدت منجر به انقباض عرضی و دگرگونی‌های سریع‌تر در دیواره‌های افقی می‌شود و کانتورهای تنش در این ناحیه به شکل تمرکزهای شدید در گوشه‌های اتصال و دیواره‌های افقی نمایان است؛ این امر با فروپاشی ناشی از ارتباط پیدا می‌کند. در ساختار هیتلری، الگوهای تغییرشکل ناشی از چرخش گره‌ها و کمانش‌های متناوب نشان می‌دهد که توزیع تنش نسبتاً همگن‌تر است و تمرکز تنش محدود است به ناحیه‌های اتصال با زاویه ۹۰ درجه در لایه بالایی؛ این پایداری تنشی از توزیع کمانش‌های منظم بهره می‌برد و پاسخ انرژی را به‌صورت یکنواخت‌تری تامین می‌کند. در ساختار ستاره‌ای، تغییرشکل نرم و پیوسته و اثر منجر به پخش‌شدن تنش در شعاع راس‌ها و بازوها می‌شود و از تمرکز شدید تنش موضعی در نقاط گره‌ای ممانعت بیشتری به عمل می‌آورد؛ این امر موجب جذب انرژی به‌طور تدریجی و پایداری بالاتر در برابر پیش‌آمدهای ناپایدار می‌شود. نهایتاً، ساختار لانه‌زنبوری با گشودگی سلول‌ها به حالت لوزی و پیوستگی پیوندهای میانی، تنش را عمدتاً در گره‌های میانی و نقاط اتصال لوزی‌ها متمرکز نشان می‌دهد و تحلیل کانتورها نشان می‌دهد که کمانش ستون‌های مایل در این ساختار با تخریب تدریجی همراه است. در مجموع، از میان دو ساختار، ساختار ستاره‌ای و ساختار سرنیزه‌ای به‌دلیل توزیع گسترده‌تر لولاهای پلاستیک در طول بازوها و انقباض جانبی پیوسته، انرژی‌گسیختگی آرام‌تر و پایداری بالاتری را ارائه می‌کنند و از ناپایداری کلی پیش از رسیدن به ناحیه جلوگیری می‌کنند.



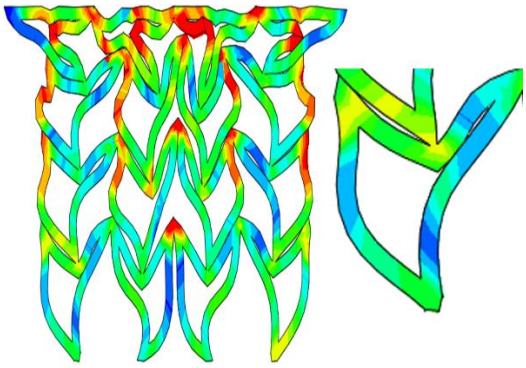
الف) شبیه سازی ساختار سرنیزه‌ای



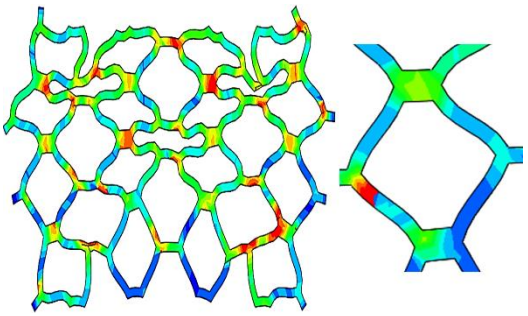
ب) شبیه سازی ساختار درون سو



ج) شبیه سازی ساختار هیتلری



د) شبیه سازی ساختار ستاره‌ای



ه) شبیه سازی ساختار لانه زنبوری

شکل ۶ توزیع تنش فون‌مایزز محاسبه‌شده در ساختار را در مرحله تغییرشکل نشان می‌دهد. الف) ساختار سرنیزه‌ای ب) ساختار درون سو ج) ساختار هیتلری د) ساختار ستاره‌ای ه) ساختار لانه زنبوری

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، رفتار آگزتیک ساختارهای کلاسیک نشان داده شده است که ناشی از بازآرایی هندسی ساختارهای کلاسیک 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[۵۵]:

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

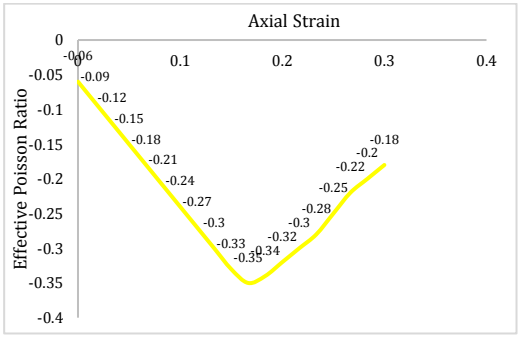
$$\varepsilon_{transverse} = \frac{W - W_0}{W_0} \qquad (2)$$

سپس ضریب پواسون مؤثر از رابطه (۳) محاسبه شد[52].

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

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.

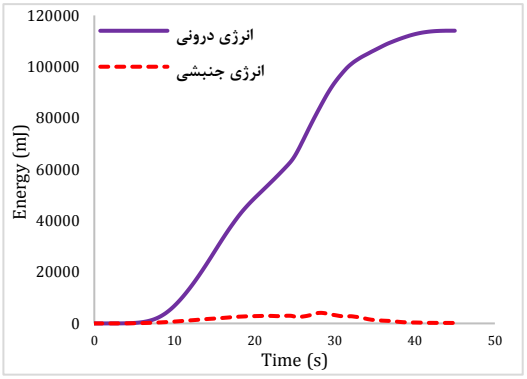


شکل۷ تغییرات ضریب پواسون مؤثر بر حسب کرنش محوری برای ساختار پیشنهادی؛ منفی بودن $veff$در مراحل اولیه و میانی تغییرشکل، رفتار آگزتیک ساختار را تأیید می‌کند.

به‌منظور ارزیابی دقیق پایداری و صحت شبیه‌سازی شبه‌استاتیک انجام‌شده، تاریخچه انرژی جنبشی ALLKE[۸] و انرژی درونی ALLIE[۹]به عنوان معیارهای کلیدی مورد پایش قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل ۸ برای ساختار سرنیزه‌ای مشهود است، انرژی جنبشی در طول کل فرایند بارگذاری روندی کاملاً صاف و پایدار داشته و همواره بسیار کمتر از انرژی درونی (کمتر از ۵٪) باقی مانده است. عدم مشاهده نوسانات چشمگیر در منحنی انرژی جنبشی، مؤید ثبات عددی شبیه‌سازی و انتخاب صحیح پارامتر مقیاس‌دهی جرمی است. شایان ذکر است که با توجه به یکسان بودن پروتکل شبیه‌سازی، سرعت بارگذاری و شرایط مرزی برای تمامی مدل‌ها، روند تراز انرژی در سایر ساختارها نیز کاملاً مشابه بوده و شرط شبه‌استاتیک در تمامی آن‌ها برقرار است؛ لذا به‌منظور جلوگیری از تکرار نمودارهای مشابه، تنها نمودار مربوط به ساختار سرنیزه‌ای به عنوان نمونه نماینده گزارش شده است.

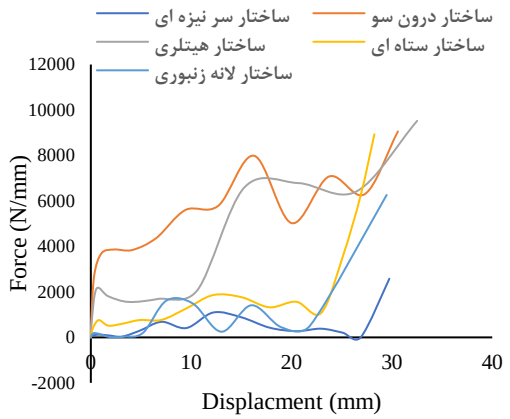
[۸] Kinetic Energy

[۹] Internal Energy



شکل ۸ نمودار انرژی جنبشی به انرژی درونی

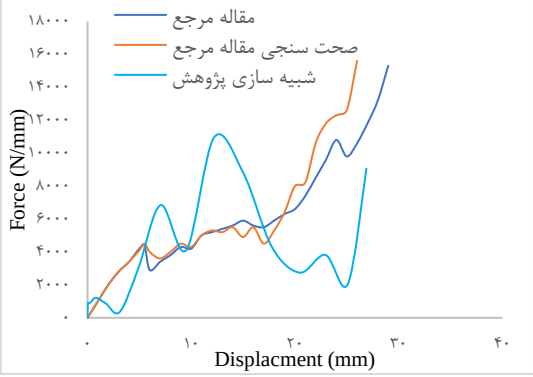
نمودار شکل ۹ پاسخ نیرو–جابجایی پنج ساختارهای کلاسیک شامل ساختار سرنیزه‌ای (خط آبی)، درون‌سو (خط نارنجی)، هیتلری (خط خاکستری)، ستاره‌ای (خط زرد) و لانه زنبوری (خط آبی روشن) را تا جابجایی حدود ۳۲ میلی‌متر مقایسه می‌کند. همه منحنی‌ها از یک پیک اولیه ناشی از تسلیم پلاستیک اولیه آغاز می‌شوند، سپس وارد پلتفرم نوسانی جذب انرژی می‌گردند و در انتها صعود تندی، آغاز مرحله تراکم را نشان می‌دهد. در جابجایی‌های حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر، ساختارهای هیتلری، درون‌سو و ستاره‌ای قله اولیه‌ای در محدوده ۱۵۰۰ تا ۲۲۰۰ نیوتن نشان می‌دهند که معرف بار تسلیم اولیه دیواره‌های باربر است. ساختارهای هیتلری و درون‌سو با سختی اولیه و بار تسلیم بالاتر، پاسخ سفت‌تری دارند، در حالی که ساختارهای سرنیزه‌ای و لانه زنبوری با قله‌های اولیه ملایم‌تر (زیر ۱۰۰۰ نیوتن)، تغییرشکل نرم‌تری را آغاز می‌کنند که برای مهار بار ضربه‌ای مطلوب است. در ناحیه جابجایی ۵ تا ۲۵ میلی‌متر، ساختار درون‌سو با پیک‌های متوالی در محدوده ۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰ نیوتن، بالاترین سطح نیروی پلتفرم را ثبت می‌کند که بیانگر جذب انرژی بالا از طریق فروپاشی لایه‌به‌لایه است؛ با این حال، نوسانات شدید آن (اختلاف قله و دره تا حدود ۳۰۰۰ نیوتن) ناپایداری‌های موضعی متوالی را نشان می‌دهد. ساختار هیتلری با نیروی پلتفرم پایدارتر و دامنه نوسان کمتر، جذب انرژی تدریجی از طریق خمش و کمانش کنترل‌شده دیواره‌ها را نشان می‌دهد. در مقابل، ساختارهای ستاره‌ای، سرنیزه‌ای و لانه زنبوری نیرویی پایین و تقریباً هموار (۵۰۰ تا ۱۸۰۰ نیوتن) دارند که به معنای جذب انرژی تدریجی و پایداری تغییرشکل است. پس از جابجایی حدود ۲۵ تا ۲۷ میلی‌متر، منحنی‌های درون‌سو، هیتلری و ستاره‌ای به‌شدت صعود کرده و به قله‌های ۸۵۰۰ تا ۹۷۰۰ نیوتنی می‌رسند که آغاز برهم‌نشینی دیواره‌هاست. ساختار لانه زنبوری با قله نهایی ضعیف‌تر (حدود ۲۵۰۰ نیوتن) و ساختار سرنیزه‌ای با منحنی نزولی در انتهای سیکل، کمترین سهم جذب انرژی در این محدوده را دارند. ساختارهای درون‌سو و هیتلری با پلتفرم نیروی بالاتر و قله تراکم زودهنگام، جذب انرژی بیشتری نشان می‌دهند، هرچند درون‌سو با نوسانات شدید، بار ضربه‌ای بالاتری اعمال می‌کند. ساختار ستاره‌ای با پلتفرم هموار، قله اولیه پایین و قله تراکم مشابه ساختارهای پرانرژی، تعادل مطلوبی میان جذب انرژی و مهار بار ضربه‌ای برقرار می‌کند و برتری آن در طراحی جذب‌کننده‌های انرژی را توجیه می‌نماید.



شکل ۹ نمودار نیرو- جابه جایی ساختار های کلاسیک

به منظور ارزیابی رفتار مکانیکی و مشخصه‌های جذب انرژی ساختار سرنیزه ای، در گام نخست فرایند صحت‌سنجی مدل اجزای محدود بر اساس داده‌های تجربی مقاله مرجع به انجام رسید.

بدین منظور، مشخصات هندسی، شرایط مرزی گیرداری و بارگذاری فشاری دقیقاً مشابه با آزمون تجربی مرجع مدل‌سازی شد و با توجه به کاربرد پلیمر آکریلونیتریل بوتادین استایرن ABS[۱۰] در نمونه‌های تجربی مرجع، رفتار الاستیک–پلاستیک این ماده به طور کامل در نرم‌افزار تعریف گردید. مقایسه منحنی نیرو–جابجایی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقاله مرجع شکل ۱۰حاکی از انطباق بسیار مطلوب در شیب ناحیه الاستیک، مقدار نیروی پیک اولیه و روند رفتار پس‌تسلیم است که این همبستگی بالا، صحت ابعاد مش‌بندی، فرمولاسیون تماس و اعتبار حل دینامیکی–صریح مدل را به اثبات می‌رساند. پس از حصول اطمینان از دقت و قابلیت اعتماد مدل عددی، همین بستر شبیه‌سازی با حفظ کامل پارامترهای هندسی، شرایط مرزی و سرعت بارگذاری، برای انجام مطالعه اصلی پژوهش با جایگزینی ماده پلی‌لاکتیک اسید ارتقایافته (PLA+) توسعه یافت. انتخاب ماده PLA+ به جای ABS بر پایه ویژگی‌های برتر مکانیکی و رفتاری این پلیمر مهندسی صورت گرفته است؛ به طوری که PLA+ به دلیل دارا بودن مدول الاستیسیته و استحکام تسلیم بالاتر در مقایسه با ABS، موجب افزایش نیروی میانگین خردشدگی (MCF) و در نتیجه ارتقای سطح زیر منحنی نیرو–جابجایی می‌گردد. از سوی دیگر، وجود افزودنی‌ها و اصلاح‌کننده‌های ضربه در ساختار PLA+ موجب افزایش چقرمگی و بهبود انعطاف‌پذیری آن نسبت به PLA معمولی شده است؛ این ویژگی مانع از شکنندگی زودرس و ترک‌خوردگی ناگهانی دیواره‌های سلولی در کرنش‌های پلاستیک بزرگ شده و امکان اتلاف پایدار انرژی را در ناحیه پلتفرم فراهم می‌آورد. افزون بر این، در فرایند ساخت افزایشی (چاپ سه‌بعدی)، PLA+ به دلیل چسبندگی بین‌لایه‌ای قوی‌تر و اعوجاج حرارتی بسیار کمتر نسبت به ABS، یکپارچگی ساختاری بالاتری تحت بارهای فشاری از خود نشان می‌دهد. همان‌گونه که در منحنی نیرو–جابجایی شبیه‌سازی پژوهش حاضر (شکل ۱۰) مشخص است، ساختار بر پایه ماده PLA+ در فاز اولیه تغییر شکل، مقاومت و سختی بالاتری در برابر بارگذاری فشاری از خود نشان داده و در ادامه، با تشکیل لولاهای پلاستیک پیوسته در دیواره‌های سلولی، ناحیه فلات هموارتر و پایداری را تا پیش از شروع فاز تراکم ثبت می‌کند. این رفتار مکانیکی، افزایش چشمگیر ظرفیت کلی جذب انرژی (EA) و جذب انرژی ویژه (SEA) را برای ساختار فراهم کرده و نشان‌دهنده برتری و کارایی بهینه ماده PLA+ در طراحی جاذب‌های انرژی ضربه‌ای است. مقایسه منحنی نیرو–جابجایی حاصل از شبیه‌سازی صحت‌سنجی با نتایج تجربی مقاله مرجع (شکل ۱۰) انطباق بسیار بالایی را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که اختلاف در نیروی پیک اولیه ۴٫۲٪ و در نیروی میانگین ۵٫۸٪ ثبت شده است .این اختلاف جزئی (کمتر از ۶٪) عمدتاً ناشی از بهینه‌سازی اندازه مش‌بندی تفاوت جزئی ایجاد شده در نتایج عددی و تجربی به دلیل تغییرات در شبکه بندی ساختار شبیه سازی شده با مقاله مرجع است.



شکل ۱۰ صحت سنجی و مقایسه پژوهش با مقاله مرجع

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

[۱۰] Acrylonitrile Butadiene Styrene

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[۵۶].

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

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[۱۱]) 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.

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

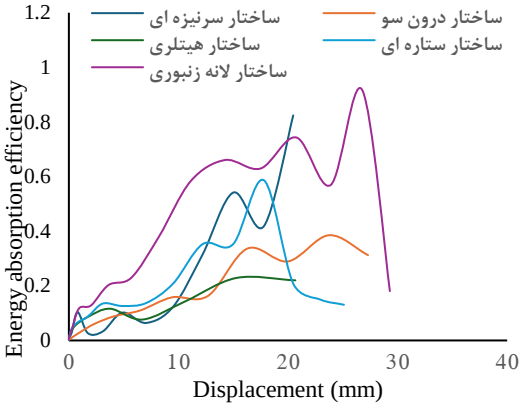
در معادله بالا، PCF[۱۲] نشان‌دهنده نیروی اوج لهیدگی است که به‌عنوان بیشترین نیروی تجربه‌شده در منحنی نیرو–جابه‌جایی، پیش از ورود سازه به ناحیه لهیدگی پایدار تعریف می‌شود. جذب انرژی ویژه (SEA) نیز که معیاری حیاتی در ارزیابی عملکرد مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیک و ضربه به شمار می‌رود، به‌عنوان نسبت 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[۵۷].

شکل ۱۱ نمودار کارایی جذب انرژی بر حسب جابجایی برای پنج ساختار متخلخل شامل ساختار لانه‌زنبوری، سرنیزه‌ای، ستاره‌ای، درون‌سو و هیتلری در شکل نشان داده شده است. بررسی روندهای

[۱۱] Mean Crushing Force

[۱۲] Peak Crushing Force

رفتاری حاکی از تفاوت‌های محسوس در مکانیزم اتلاف انرژی و میزان بهره‌وری هندسه‌های مختلف تحت بار فشاری است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، «ساختار لانه‌زنبوری» بالاترین سطح کارایی را در میان تمامی نمونه‌ها ثبت کرده است؛ به طوری که بازده جذب انرژی آن با یک روند صعودی پیوسته افزایش یافته و در جابجایی حدود ۲۶/۵ میلی‌متر به مقدار بیشینه چشمگیر ۰/۹۳ می‌رسد که نشان‌دهنده تغییرشکل پلاستیک بسیار یکنواخت و استفاده حداکثری از ظرفیت ماده تا پیش از شروع فاز تراکم است. پس از آن، «ساختار سرنیزه‌ای» با ثبت یک جهش تند در ناحیه جابجایی‌های بالا به کارایی بیش از ۰/۸۲ در جابجایی ۲۰/۵ میلی‌متر دست یافته و رتبه دوم را از نظر کارایی لحظه‌ای به خود اختصاص داده است در خصوص «ساختار ستاره‌ای» و «ساختار درون‌سو»، رفتار نوسانی و چندمرحله‌ای مشاهده می‌شود که بیانگر تسلیم و خمش گام‌به‌گام دیواره‌ها و لایه‌های سلولی است؛ کارایی جذب انرژی ساختار ستاره‌ای پس از طی یک قله اولیه، در جابجایی حدود ۱۷/۵ میلی‌متر به اوج خود یعنی مقدار ۰/۵۹رسیده و پس از آن به دلیل شروع به هم فشردگی دیواره‌ها افت می‌کند. ساختار درون‌سو نیز رفتاری ملایم‌تر اما با نوسان کمتر از خود نشان داده و بازده بیشینه آن در حدود ۰/۳۸در جابجایی ۲۴ میلی‌متر تثبیت می‌شود. در مقابل، «ساختار هیتلری» کمترین میزان کارایی جذب انرژی را در کل بازه تغییرشکل از خود نشان می‌دهد؛ به طوری که مقدار کارایی آن پس از جابجایی‌های اولیه تقریباً در سطح ثابتی در حدود ۰/۲۳ محدود مانده و نشان‌دهنده تمرکز تنش زودرس، عدم درگیری کامل تمام اعضای ساختار در جذب انرژی و در نتیجه عملکرد نامطلوب این هندسه در مقایسه با سایر ساختارهای مورد مطالعه است.



شکل ۱۱ نمودار راندمان-جابه جایی ساختار های کلاسیک

جدول ۵ مقادیر حاصل از ارزیابی شاخص‌های کلیدی جذب انرژی شامل جرم، جذب انرژی ویژه (SEA)، نیروی میانگین خردشدگی (MCF) و نیروی بیشینه خردشدگی (PCF) را برای پنج ساختار مورد بررسی نشان می‌دهد. بر اساس این داده‌ها، ساختار درون‌سو با جرم ۸/۱۵ گرم، بیشترین مقدار جذب انرژی ویژه (SEA) را معادل ۶/۲۶ کیلوژول بر کیلوگرم به خود اختصاص داده است؛ با این وجود، این ساختار دارای بالاترین نیروی پیک با مقدار ۷۹۸۹/۱۷ نیوتن و نیروی میانگین خردشدگی ۰/۲۱ نیوتن می‌باشد که نشان‌دهنده نیاز به اعمال نیروی اولیه بسیار زیاد جهت آغاز تغییرشکل است. در مرتبه بعدی، ساختار ستاره‌ای با ثبت جذب انرژی ویژه ۲۵/۹ کیلوژول بر کیلوگرم، عملکردی بسیار نزدیک به ساختار درون‌سو ارائه داده است، با این مزیت بنیادین که جرم آن تنها ۴/۵ گرم بوده و نیروی پیک بسیار پایین‌تری معادل ۱۸۶۳/۱۴ نیوتن به همراه نیروی میانگین خردشدگی مطلوب ۰/۶۵ نیوتن تولید کرده است؛ این ویژگی ساختار ستاره‌ای را از حیث نسبت کارایی به وزن و ایمنی در برابر انتقال شتاب ضربه، در موقعیت بسیار برتری قرار می‌دهد. از سوی دیگر، ساختار هیتلری با جرم ۱۰/۴ گرم موفق به ثبت جذب انرژی ویژه ۳۲/۳ کیلوژول بر کیلوگرم، بیشترین نیروی میانگین خردشدگی به میزان ۶۸/۰ نیوتن و نیروی بیشینه ۶۷۶۸/۴ نیوتن شده است که عملکرد نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد اما وزن سازه‌ای بیشتری را تحمیل

می‌کند. در بخش ساختارهای سبک‌وزن‌تر، ساختار لانه‌زنبوری با جرم ۵/۲ گرم، جذب انرژی ویژه ۱۶ کیلوژول بر کیلوگرم، نیروی میانگین خردشدگی ۰/۲۶ نیوتن و کمترین نیروی بیشینه معادل ۱۰۴۷/۹۵ نیوتن را به ثبت رسانده است که رفتاری نرم‌تر و با انتقال نیروی کمینه ارائه می‌دهد. در نهایت، ساختار سرنیزه‌ای با جرم ۴/۵۲ گرم، نیروی میانگین خردشدگی ۰/۴۷نیوتن، نیروی پیک ۴۴/۱۰۹۵ نیوتن و کمترین مقدار جذب انرژی ویژه معادل ۹/۳ کیلوژول بر کیلوگرم، ضعیف‌ترین کارایی اتلاف انرژی بر واحد جرم را در میان نمونه‌ها نشان داده است. در یک ارزیابی جامع، ساختار ستاره‌ای به دلیل دارا بودن کمترین وزن (۴/۵ گرم)، مقدار SEA بسیار بالا (۲۵/۹ کیلوژول بر کیلوگرم) و سطح نیروی پیک بهینه و ایمن (۱۸۶۳/۱۴ نیوتن)، به عنوان کارآمدترین و متعادل‌ترین ساختار جاذب انرژی در میان پنج نمونه شناخته می‌شود.

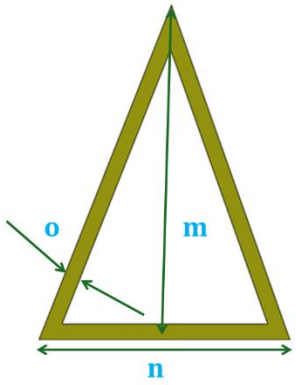
جدول۵ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده

	جرم (g)	SEA_{η} (KJ /kg)	MCF (N)	PCF (N)
ساختار سرنیزه ای	۴/۵۲	۹/۳	۰/۴۷	۱۰۹۵/٤٤
ساختار درون سو	۱۵/۸	۲۶/۶	۰/۲۱	۷۹۸۹/۱۷
ساختار هیتلری	۱۰/۴	۲۳/۳	۰/۶۸	٦٧٨٦/٤
ساختار ستاره ای	۴/۵	۲۵/۹	۰/۶۵	۱۸٦۳/۱٤
ساختار لانه زنبوری	۵/۲	۱۶	۰/۲۶	۱۰۷٤/۹۵

۴ تغییرات هندسی

به منظور ارتقای خواص مکانیکی، پایداری ساختاری در برابر کمانش موضعی و افزایش ظرفیت جذب انرژی، مجموعه‌ای از ساختارهای سلولی متخلخل با اعمال شبکه‌های تقویتی داخلی بازطراحی و مدلسازی شده‌اند.

به‌منظور بهبود رفتار مکانیکی و افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی سازه، المان‌های تقویت‌کننده مثلثی‌شکل به ساختار سلول‌های پایه اضافه شدند. مشخصات هندسی و ابعاد این مهاربندهای مثلثی شامل ارتفاع(m) ، طول قاعده (n) و ضخامت دیواره (o) در شکل ۱۲ و جدول ۶ ارائه شده است.



شکل۱۲ المان مثلثی اضافه شده به ساختار ها

جدول ۶ ابعاد المان مثلثی

اندازه	نماد	پارامتر هندسی
۱۰(mm)	m	ارتفاع مثلث
۷(mm)	n	طول مثلث
۰.۵ (mm)	o	ضخامت مثلث

شکل‌های ارائه‌شده، مدل دوبعدی (چیدمان صفحه تقارن) و نمای سه‌بعدی حجم‌دار این ساختارها را به تصویر می‌کشند که شامل پنج پیکربندی تقویت‌شده به شرح زیر می‌باشند:

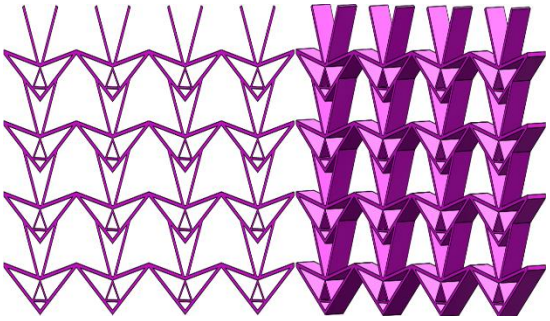
در این ساختار، سلول‌های سرنیزه‌ای به عنوان چارچوب اصلی عمل کرده و به منظور جلوگیری از لغزش جانبی و تسلیم نامتقارن دیواره‌های مایل، عضوهای تقویتی عمودی و قطری در فضای خالی زیرین هر سلول تعبیه شده‌اند. این استراتژی تقویت مثلثی، سختی فشاری اولیه را در راستای اعمال بار به‌طور چشمگیری ارتقا داده و مسیر انتقال بار را از طریق لولاهای پلاستیکی جدید به شکل یکنواخت بازتوزیع می‌کند.

هندسه پایه درون سو که ذاتاً دارای رفتار اگزتیک و نسبت پواسون منفی است، در این طرح به صفحات تقویت‌کننده افقی و مهاربندهای مورب متقاطع مجهز شده است. قرارگیری خطوط تقویت‌کننده سراسری در مرز افقی سلول‌ها موجب پیوستگی صلب‌تر لایه‌ها و جلوگیری از تمرکز تنش در گلویی سلول‌ها شده و باعث می‌شود که تحت بارگذاری فشاری، تغییرشکل به صورت کنترل‌شده و لایه‌به‌لایه رخ دهد. این پیکربندی با چیدمان با تراکم بالا و زوایای تند، از شبکه‌ای متراکم از مهاربندهای قطری و دیواره‌های قائم متناوب تشکیل شده است. حضور پیوسته این

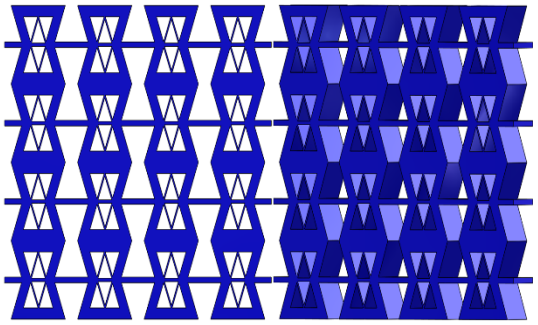
المان‌های تقویتی باعث بالارفتن چگالی نسبی ساختار شده و مقاومت تسلیم را به میزان زیادی افزایش می‌دهد؛ با این حال، به دلیل کاهش فضای آزاد برای حرکت و خمش آزادانه دیواره‌ها، رفتار آن به سمت سفتی بالا و تغییرشکل برشی سوق پیدا می‌کند.

در ساختار ستاره‌ای، بخش‌های داخلی هر رأس و نواحی همگرا شونده به اعضای تقویتی خرپایی شکل تجهیز شده‌اند. این طراحی هوشمندانه مانع از کمانش زودهنگام لبه‌های باریک ستاره شده و با تشکیل گره‌های مستحکم، امکان فعال‌سازی پدیده پواسون منفی را بدون افت ناگهانی بار فراهم می‌آورد. بدین ترتیب، ساختار قادر است مساحت زیر نمودار نیرو–جابجایی را به حداکثر رسانده و جذب انرژی ویژه (SEA) فوق‌العاده‌ای را با حفظ جرم پایین تأمین نماید.

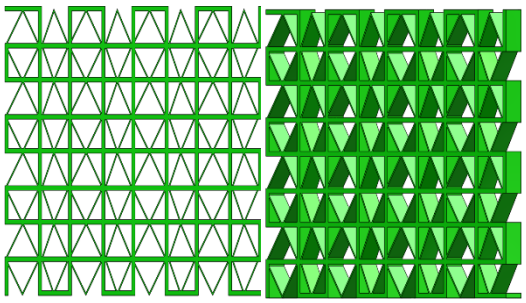
در ساختار لانه زنبوری شش‌ضلعی در فضای هر سلول یک سیستم مهاربندی سه‌وجهی و تیرهای داخلی تعبیه شده است. این آرایش تقویتی موجب تبدیل خمش ساده دیواره‌های شش‌ضلعی به ترکیبی از کشش–فشار در اعضای داخلی می‌شود؛ در نتیجه، دیواره‌ها در جابجایی‌های بالا ثبات خود را حفظ کرده و فاز پلتفرم بسیار طولانی و یکنواختی را بدون افت ناگهانی نیرو تولید می‌کنند.



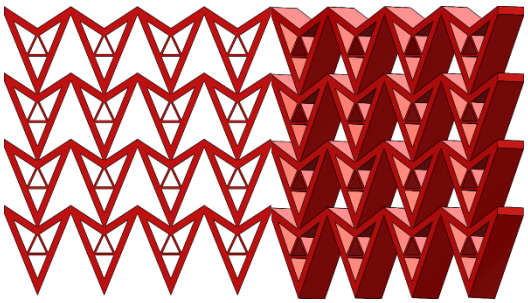
الف) ساختار تقویت شده سرنیزه ای



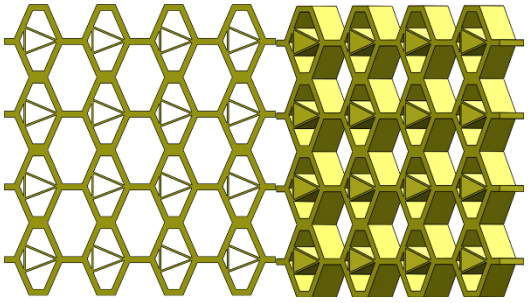
ب) ساختار تقویت شده درون سو



ج) ساختار تقویت شده هیتلری



د) ساختار تقویت شده ستاره ای



ه) ساختار تقویت شده لانه زنبوری

شکل 13 ساختار نوآوری شده تقویت شده با المان مثلثی . الف) ساختار سرنیزه‌ای ب) ساختار درون سو ج) ساختار هیتلری د) ساختار ستاره‌ای ه) ساختار لانه زنبوری

در ادامه پژوهش، شبیه‌سازی عددی ساختارهای سلولی تقویت‌شده با هدف ارزیابی اثر افزودن مهاربندها و شبکه‌های تقویتی داخلی بر رفتار مکانیکی و پایداری سازه‌ای انجام شد. بدین منظور، پنج پیکربندی تقویت‌شده شامل ساختارهای سرنیزه‌ای ، درون‌سو هیتلری ، ستاره‌ای و لانه‌زنبوری مدلسازی و مورد تحلیل قرار گرفتند؛ به‌گونه‌ای که ساختارهای (الف) تا (ه) به‌ترتیب نشان‌دهنده

این پیکربندی‌های تقویت‌شده هستند. تمامی شبیه‌سازی‌ها مطابق چارچوب مدل‌سازی و شرایط ارائه‌شده در رفرنس [۵۵] پیاده‌سازی گردید. برای فراهم‌کردن امکان مقایسه مستقیم و ارزیابی بی‌طرفانه اثر تقویت‌کننده‌ها، جنس ماده (پلیمر PLA+)، ابعاد کلی نمونه، نوع حل‌گر دینامیکی-صریح آباکوس، روش و اندازه مش‌بندی، شرایط مرزی، شرایط تماس عمومی با ضریب اصطکاک ۰٫۰۳)، خودتماسی و میزان جابه‌جایی اعمالی در تمامی مدل‌ها کاملاً یکسان و ثابت در نظر گرفته شد. بارگذاری به‌صورت فشاری شبه‌استاتیکی و محوری اعمال گردید؛ به‌طوری‌که سطح پایینی نمونه کاملاً مقید و ثابت بوده و جابه‌جایی کنترل‌شده به سطح بالایی منتقل شد. تفاوت میان مدل‌ها منحصراً به هندسه سلول واحد، نوع و آرایش المان‌های تقویتی داخلی (مهاربندهای قطری، عمودی و تیرهای میانی) مربوط بود. افزودن این اعضای تقویتی، چگالی نسبی، صلبیت اتصالات گرهی، نحوه تشکیل لولاهای پلاستیکی و مسیرهای انتقال بار را تغییر داده و با به تأخیر انداختن کمانش موضعی دیواره‌ها، روند فروریزش تدریجی و پایداری فاز پلتفرم را متحول می‌سازد. در نهایت، منحنی‌های نیرو–جابجایی استخراج شده و شاخص‌های کلیدی تصادف‌پذیری شامل نیروی بیشینه (PCF)، نیروی میانگین خردایش (MCF)، انرژی جذب‌شده کل (EA) و جذب انرژی ویژه (SEA) محاسبه و ارزیابی تطبیقی شدند. این چارچوب یکسان، امکان بررسی دقیق مکانیزم‌های شکست و تعیین کارآمدترین توپولوژی تقویت‌شده را فراهم می‌آورد.

۴-۱ نتایج شبیه سازی

در تحلیل رفتار مکانیکی ساختارهای سلولی تحت بار فشاری، بررسی کانتورهای تنش فون‌مایزز و نحوه پیشروی لایه‌ای فروریزش نقش کلیدی در درک مکانیزم‌های جذب انرژی ایفا می‌کند. شکل ۱۳، توزیع تنش و مکانیزم تغییرشکل پلاستیک را در پنج پیکربندی تقویت‌شده نشان می‌دهد:

در ساختار سرنیزه‌ای تقویت‌شده، مهاربند مثلثی تعبیه‌شده در انتهای سلول واحد، صلبیت اتصالات تحتانی را به‌شدت افزایش داده است. با اعمال بار فشاری، تمرکز تنش اولیه (نواحی قرمز و نارنجی) در محل تقاطع بازوهای زاویه‌دار بالایی و لولاهای پلاستیکی متصل به راس رخ می‌دهد. مهاربندهای مورب پایینی با تبدیل لنگرهای خمشی به نیروهای محوری (کشش و فشار در المان‌های داخلی)، از باز شدن و کمانش ناگهانی بازوها جلوگیری کرده و سبب فروریزش ردیف‌به‌ردیف و کنترل‌شده سازه از ردیف بالا به پایین شده‌اند.

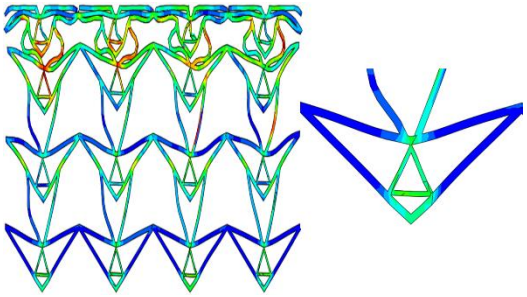
ساختار درون‌سو تقویت‌شده، بالاترین سطح تمرکز تنش پلاستیک یکنواخت (نواحی قرمز رنگ گسترده) را در دیواره‌های مایل و بازوهای متقاطع داخلی نشان می‌دهد. مهاربند ضربدری درون سلول، زاویه درون‌گرای سلول را مقید کرده و مانع چرخش آزادانه بازوها می‌شود؛ این امر مکانیزم غالب تغییرشکل را از «خمش بازوها» به «کشش/فشار مستقیم» تغییر می‌دهد. اگرچه این رفتار مقاومت خردایش و ظرفیت جذب انرژی بالایی ایجاد می‌کند، اما به دلیل سختی سازه‌ای زیاد، به افزایش شدید نیروی پیک اولیه منجر می‌گردد.

در ساختار هیتلری تقویت‌شده، حضور مهاربندهای قطری و عمودی سبب تقسیم سلول به زیربخش‌های صلب‌تر شده است. کانتورهای تنش نشان می‌دهند که تمرکز تنش اصلی در گره‌های مرکزی و تقاطع مهاربندهای عمودی با لایه‌های افقی متمرکز است. مهاربندها با مهار کمانش ستون‌های عمودی، فروریزش را در لایه بالایی محدود کرده و با جلوگیری از پیچش نامتقارن، رفتار پایداری در جذب انرژی در طول فاز پلتفرم پدید آورده‌اند.

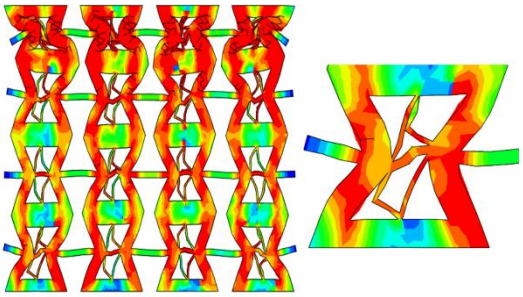
ساختار ستاره‌ای تقویت‌شده عملکردی بسیار متوازن و بهینه از حیث توزیع تنش و یکنواختی تغییرشکل به نمایش می‌گذارد. تقویت‌کننده داخلی در راس ستاره، بارهای فشاری را به‌طور متقارن در سراسر بازوهای اگزتیک توزیع کرده و از ایجاد تمرکز تنش موضعی بحرانی پیش از موعد جلوگیری می‌کند. تغییرشکل پلاستیک همگام با اثر اگزتیک (انقباض جانبی هماهنگ) رخ داده و فروریزش لایه‌ای یکنواخت و پایدار، بدون کمانش کلی نامتقارن،

مشاهده می‌شود که توجیه‌کننده راندمان بالای جذب انرژی ویژه (SEA) در این ساختار است.

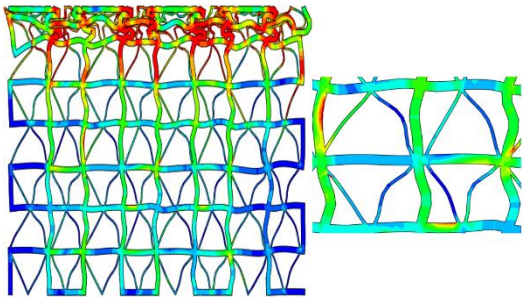
در ساختار لانه‌زنبوری متداول تقویت‌شده با مهاربند مثلثی داخلی، افزودن مهاربند زاویه‌دار مانع از کمانش الاستیک زودهنگام دیواره‌های شش‌ضلعی شده است. تمرکز تنش به وضوح در محل اتصال مهاربند به دیواره‌های عمودی مشاهده می‌شود (ناحیه قرمز در سلول واحد). مهاربند داخلی همانند یک ستون مهاربندی‌شده عمل کرده و با انتقال مستقیم بار به گره‌های پایینی، مد فروریزش را از خمش موضعی به تغییرشکل ترکیبی فشاری-برشی تبدیل می‌کند.



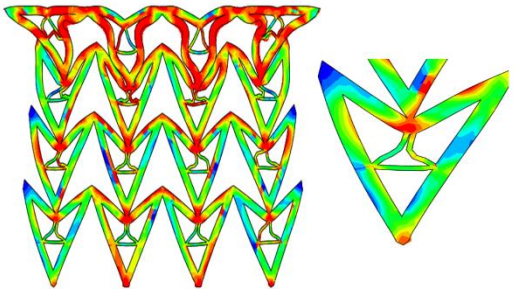
الف) شبیه سازی ساختار تقویت شده سرنیزه ای



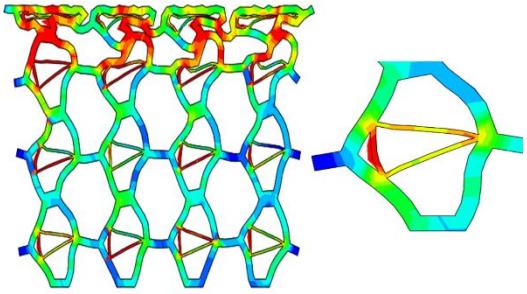
ب) شبیه سازی ساختار تقویت شده درون سو



ج) شبیه سازی ساختار تقویت شده هیتلری



د) شبیه سازی ساختار تقویت شده ستاره ای



ه) شبیه سازی ساختار تقویت شده لانه زنبوری

شکل 14 کانتورهای توزیع تنش فون‌مایزز و مودهای تغییرشکل/فروریزش ساختارهای سلولی تقویت‌شده تحت بارگذاری فشاری تک‌محوره: (الف) ساختار سرنیزه‌ای تقویت‌شده، (ب) ساختار درون‌سو تقویت‌شده، (ج) ساختار هیتلری تقویت‌شده، (د) ساختار ستاره‌ای تقویت‌شده، و (ه) ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده

منحنی‌های نیرو–جابجایی مطابق شکل 15 حاصل از آزمون فشار شبه‌استاتیکی ساختارهای تقویت‌شده (شکل فوق)، نشان‌دهنده سه فاز رفتاری متمایز شامل: ناحیه الاستیک خطی اولیه، ناحیه فاز فلات یا پلتفرم (فروریزش پیش‌رونده) و ناحیه متراکم‌شدگی نهایی هستند. افزودن مهاربندها و شبکه‌های تقویتی داخلی،

ویژگی‌های مکانیکی هر یک از این نواحی را به‌طور معناداری دگرگون ساخته است:

- **ساختار درون‌سو تقویت‌شده (منحنی نارنجی)**

این ساختار با ثبت بالاترین نیروی بیشینه در میان تمامی نمونه‌ها، در جابجایی حدود ۱۴ میلی‌متر به قله نیرویی نزدیک به ۸۰۰۰ نیوتن می‌رسد. حضور تقویت‌کننده‌های ضربدری درون سلول، زاویه فرورفتگی را به‌شدت مقید کرده و مود تغییرشکل را از «خمش الاستیک بازوها» به «کشش و فشار محوری مستقیم» تغییر داده است. اگرچه این پدیده منجر به افزایش چشمگیر سطح زیر منحنی و ظرفیت جذب انرژی کل می‌شود، اما نوسانات شدید نیرو و نیروی پیک اولیه بسیار بالا، راندمان کلی جذب انرژی را به دلیل شوک‌های وارده به سازه محافظت‌پذیر محدود می‌سازد. در جابجایی بالای ۳۰ میلی‌متر نیز با شروع متراکم‌شدگی سریع، نیرو به بیش از ۸۵۰۰ نیوتن جهش می‌یابد.

- **ساختار ستاره‌ای تقویت‌شده (منحنی آبی)**

نیروی بیشینه اولیه در جابجایی حدود ۱۲ میلی‌متر به حدود ۵۱۰۰ نیوتن و قله دوم در جابجایی ۲۰ میلی‌متر به حدود ۵۴۰۰ نیوتن می‌رسد. ساختار ستاره‌ای تقویت‌شده پایدارترین و ایده‌آل‌ترین رفتار را در فاز فلات به نمایش می‌گذارد. توزیع متقارن بازوها به همراه مهاربند مرکزی، موجب تسلیم تدریجی و لایه‌به‌لایه سلول‌ها شده است. افت نیروی پس از قله‌ها ملایم بوده و نمودار فاقد دره‌های عمیق سقوط نیرو است. ورود سریع به فاز تراکم بعد از جابجایی ۲۵ میلی‌متر (شیب بسیار تند و صعود نیرو تا بیش از ۸۸۰۰ نیوتن) نشان‌دهنده پرشدن فضاهای خالی و قفل‌شدگی کامل ساختار در کورس جابجایی مفید است.

- **ساختار هیتلری تقویت‌شده (منحنی سبز)**

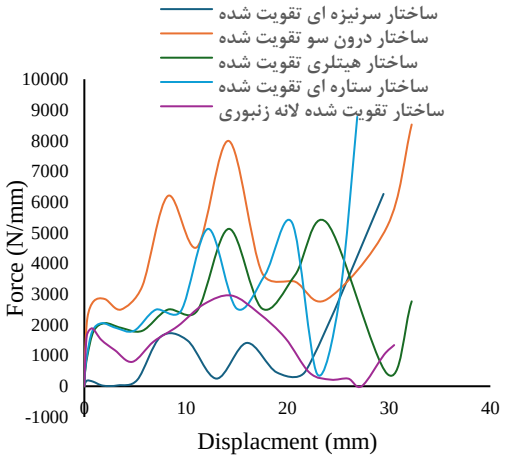
رفتار و مشخصات: این ساختار دارای دو قله نیروی متوالی در حدود ۵۱۰۰ نیوتن (جابجایی ۱۴ میلی‌متر) و ۵۴۰۰ نیوتن (جابجایی ۲۳ میلی‌متر) است. مهاربندهای قطری و قائم در ساختار هیتلری، سختی جانبی بالایی فراهم کرده‌اند. با این وجود، به دلیل چرخش نامتقارن گره‌ها، پس از رسیدن به قله دوم، یک افت شدید نیرو تا محدوده زیر ۵۰۰ نیوتن در جابجایی ۳۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود که ناشی از کمانش موضعی هم‌زمان چندین سلول در یک لایه است.

- **ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده (منحنی بنفش)**

نیروی قله پلاتو در حدود ۳۰۰۰ نیوتن (در جابجایی ۱۴ میلی‌متر) ثبت شده است. افزودن مهاربند به سلول شش‌ضلعی، کمانش زودهنگام دیواره‌ها را مهار کرده و نموداری بسیار هموار و بدون نوسان مخرب تا جابجایی ۱۸ میلی‌متر پدید آورده است. کاهش تدریجی نیرو پس از جابجایی ۱۸ میلی‌متر به دلیل تسلیم لولاهای پلاستیکی پایینی سلول‌ها است. این ساختار کمترین نیروی بیشینه مخرب را در میان نمونه‌های پرقدرت ارائه می‌دهد که برای محافظت در برابر ضربه‌های با شتاب منفی مجاز پایین مناسب است.

- **ساختار سرنیزه‌ای تقویت‌شده (منحنی سرمه‌ای)**

در مراحل اولیه بارگذاری (تا جابجایی ۵ میلی‌متر)، نیرو در سطح پایینی قرار دارد و سپس به قله‌های ملایمی در حدود ۱۷۰۰ نیوتن (جابجایی ۹ میلی‌متر) و ۱۴۰۰ نیوتن (جابجایی ۱۶ میلی‌متر) می‌رسد. سلول‌های سرنیزه‌ای انعطاف‌پذیری بالایی دارند و مهاربند مثلثی آن‌ها دیرتر وارد فاز درگیری کامل می‌شود. با افزایش فشردگی و تماس سطوح داخلی پس از جابجایی ۲۳ میلی‌متر، نیرو با شیبی پیوسته و یکنواخت تا بیش از ۶۲۰۰ نیوتن افزایش می‌یابد که نشانگر عملکرد پایدار در مرحله تراکم نهایی بدون کمانش کلی نامتقارن است.



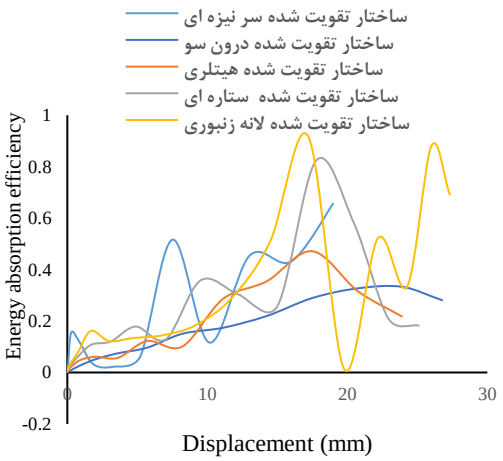
شکل 15 نمودار نیرو-جابه جایی ساختارهای تقویت شده کلاسیک

راندمان جذب انرژی (η) به عنوان یکی از کلیدی‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد سازه‌های جاذب ضربه شناخته می‌شود که نشان‌دهنده میزان بهره‌وری سازه در تبدیل کار مکانیکی اعمال‌شده به انرژی تغییرشکل پلاستیک است. از منظر فیزیکی، مقدار بیشینه در منحنی راندمان جذب انرژی، مشخص‌کننده مرز پایان فاز پلتفرم و آغاز فاز تراکم سازه است؛ بنابراین جابه‌جایی متناظر با این قله، نمایانگر کرنش مؤثر تراکم در فرآیند خردایش تلقی می‌گردد. با توجه به شکل ۱۵، مقایسه تطبیقی رفتار پنج پیکربندی تقویت‌شده نشان‌دهنده تفاوت‌های ساختاری بارزی در یکنواختی و پایداری فرآیند جذب انرژی است. در میان طرح‌های مورد بررسی، ساختار تقویت‌شده ستاره‌ای (منحنی خاکستری) ایده‌آل‌ترین و پایدارترین رفتار را به نمایش می‌گذارد. منحنی راندمان این ساختار بدون افت‌های نوسانی و با شیبی پیوسته و یکنواخت صعود کرده و در جابه‌جایی ۱۸ میلی‌متر به مقدار بیشینه ۰/۸۴می‌رسد. تقارن هندسی سلول‌های آگزتیک و توزیع همگن مهاربندهای داخلی در این الگو مانع از قفل‌شدگی زودهنگام دیواره‌ها شده و با ایجاد یک فاز پلتفرم طولانی و ایمن، جذب انرژی مؤثر را تا پیش از شروع تراکم نهایی میسر می‌سازد؛ پس از این نقطه اوج نیز منحنی با شیبی کاملاً ملایم افت می‌کند که نشانه حفظ ظرفیت باربری حتی در تغییرشکل‌های بالاست. در مقابل، ساختار تقویت‌شده لانه‌زنبوری (منحنی زرد) دارای رفتاری به‌شدت نوسانی و ناپایدار است. این ساختار اگرچه در جابه‌جایی ۱۷ میلی‌متر به بالاترین مقدار راندمان لحظه‌ای یعنی ۰/۹۴ دست می‌یابد، اما بلافاصله به دلیل بروز کمانش موضعی شدید و شکست لایه‌ای دیواره‌ها، با افتی ناگهانی مواجه شده و راندمان آن در جابه‌جایی ۰/۲۰ میلی‌متر تا مرز ۰/۱ (نزدیک به صفر) سقوط می‌کند. با تماس مجدد دیواره‌های فروریخته و آغاز تراکم لایه‌های زیرین، راندمان مجدداً اوج گرفته و در جابه‌جایی ۲۶/۵ میلی‌متر قله دوم خود معادل ۰/۸۹ را ثبت می‌نماید؛ این افت‌وخیزهای شدید حاکی از غیریکنواخت بودن فرآیند جذب کار و انتقال ضربات ناگهانی به سازه محافظت‌شده است.

بررسی ساختار تقویت‌شده سرنیزه‌ای (منحنی آبی روشن) حاکی از یک فرآیند فروریزش چندمرحله‌ای است. این ساختار نخستین پیک راندمان خود را در جابه‌جایی ۷/۵ میلی‌متر با مقدار ۰/۵۲ و قله دوم را در جابه‌جایی ۱۳/۵ میلی‌متر با راندمان ۰/۴۷ ثبت می‌کند. متعاقباً با درگیر شدن کامل پایه‌ها و مهاربندهای تحتانی در تغییرشکل‌های فراتر از ۱۵ میلی‌متر، راندمان مجدداً سیر صعودی یافته و در جابه‌جایی ۱۹ میلی‌متر به بیشینه ۰/۶۶ می‌رسد که مؤید عملکرد پله‌ای مهاربندهای زاویه‌دار در مهار پیش‌رونده نیرو است. از سوی دیگر، ساختار تقویت‌شده هیتلری (منحنی قهوه‌ای) روندی هموار و تدریجی با کمترین نوسانات موضعی را نشان می‌دهد. راندمان این ساختار در جابه‌جایی ۱۷/۵ میلی‌متر به مقدار بیشینه ۰/۴۸ رسیده و پس از آن با افت پیوسته ادامه می‌یابد که نشان‌دهنده اثر مهاربندها در کنترل چرخش‌های کایرال گره‌ها و همگن‌سازی لولاهای پلاستیکی است. در نهایت، ساختار تقویت‌شده درون‌سو (منحنی سرمه‌ای) ملایم‌ترین نرخ رشد راندمان را با ثبت بیشینه ۰/۳۴ در جابه‌جایی ۲۲/۸ میلی‌متر به ثبت رسانده است. پایین‌تر بودن مقدار عددی راندمان در این ساختار ناشی از ثبت نیروی بیشینه اولیه بسیار بزرگ است که در رابطه تحلیلی راندمان، مقدار شاخص را کاهش می‌دهد؛ با این

وجود، صعود یکنواخت آن تا انتهای کورس فشاری، پایداری اتصالات در برابر فروریزش ناگهانی را به اثبات می‌رساند.

در مجموع، تحلیل داده‌های شکل ۱۵ نشان می‌دهد که ساختار تقویت‌شده ستاره‌ای به دلیل دستیابی به راندمان بالای ۸۴ درصد در کورس جابه‌جایی مناسب (۱۸ میلی‌متر)، پایداری ساختاری کامل و اجتناب از هرگونه رفتار نوسانی مخرب، مناسب‌ترین و بهینه‌ترین پیکربندی جهت کاربرد در سیستم‌های جاذب انرژی تصادف‌پذیری و بارهای ضربه‌ای به شمار می‌رود.



شکل 16 راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه های شبیه سازی شده ساختارهای تقویت شده کلاسیک

بررسی کمی و تطبیقی شاخص‌های کلیدی جذب انرژی در جدول ۶، دیدگاه دقیقی از عملکرد مکانیکی، ظرفیت باربری و کارایی وزنی هر یک از ساختارهای تقویت‌شده کلاسیک ارائه می‌دهد. برای ارزیابی جامع یک جاذب انرژی ایده‌آل در کاربردهای ضربه‌ای و ایمنی، سه فاکتور اساسی شامل «انرژی ویژه جذب‌شده (SEA)»، «نیروی بیشینه اولیه (PCF)» و «جرم کل سازه» به‌صورت هم‌زمان ارزیابی می‌شوند. در میان تمام نمونه‌های بررسی‌شده، ساختار تقویت‌شده ستاره‌ای با ثبت بالاترین مقدار انرژی ویژه جذب‌شده معادل 47/1کیلوژول بر کیلوگرم و جرم بسیار سبک 5/85 گرم، برجسته‌ترین و کارآمدترین رفتار مکانیکی را از خود نشان می‌دهد. بالا بودن چشمگیر شاخص SEA در این ساختار گویای آن است که به ازای هر واحد جرم، بیشترین سهم از انرژی جنبشی اعمال‌شده را از طریق تغییرشکل پلاستیک یکنواخت مستهلک نموده است. از سوی دیگر، نیروی بیشینه اولیه (PCF) در این ساختار معادل 5126/29 نیوتن به دست آمده که در محدوده بهینه‌ای قرار دارد؛ این مقدار، مقاومت الاستیک اولیه مناسبی برای تحمل بار ضربه فراهم می‌کند بدون آنکه شتاب منفی مخربی را به سازه محافظت‌شده تحمیل نماید.

در نقطه مقابل، ساختار تقویت‌شده درون‌سو با جرم 17/07 گرم، سنگین‌ترین نمونه در بین طرح‌ها محسوب می‌شود. این ساختار اگرچه انرژی ویژه جذب‌شده قابل قبولی برابر با 32/2 کیلوژول بر کیلوگرم را ثبت کرده است، اما به دلیل رفتار صلب اولیه خود دارای بالاترین نیروی بیشینه اولیه برابر با 8252/22 نیوتن می‌باشد. این پیک نیروی بسیار بزرگ از دیدگاه مهندسی تصادف‌پذیری نامطلوب تلقی می‌شود؛ زیرا بار ضربه‌ای شدیدی را به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌سازد. به همین ترتیب، ساختار تقویت‌شده هیتلری نیز با جرم 13/28 گرم، نیروی بیشینه اولیه بسیار بالای 7988/18 نیوتن و انرژی ویژه جذب‌شده 19/8 کیلوژول بر کیلوگرم، دارای کارایی وزنی به نسبت پایینی است که نشان‌دهنده مشارکت محدودتر بازوهای جانبی در فرآیند استهلاک انرژی نسبت به وزن مصرفی سازه است. از سوی دیگر، ساختار تقویت‌شده لانه‌زنبوری با جرم 6/02 گرم، مقدار انرژی ویژه جذب‌شده مطلوبی برابر با ۰/۳۶ کیلوژول بر کیلوگرم و نیروی میانگین خردایش معادل ۸۰/۰ کیلونیوتن ثبت نموده است. نیروی بیشینه اولیه این سازه برابر با ۵۹/۲۹۵۳ نیوتن است که نسبت به ساختارهای کایرال و درون‌سو ملایم‌تر است؛ با این وجود، به دلیل عدم تقارن در توزیع آگزتیک، مقدار SEA آن حدود 32/5 درصد کمتر از ساختار ستاره‌ای است.

در نهایت، ساختار تقویت‌شده سرنیزه‌ای سبک‌ترین طرح با وزن 4/98 گرم و کمترین نیروی بیشینه اولیه معادل1614/6نیوتن است؛ اما این ساختار به دلیل سختی محوری پایین در مراحل

اولیه، کمترین انرژی ویژه جذب‌شده را معادل 11/1 کیلوژول بر کیلوگرم به ثبت رسانده است که کارایی آن را در بارهای ضربه‌ای با انرژی بالا محدود می‌سازد.

جدول 7 مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده ساختارهای تقویت شده کلاسیک

	جرم (g)	SEA_{η} (KJ/kg)	MCF (N)	PCF (N)
ساختار تقویت شده سرنیزه ای	۴,۹۸	۱۱,۱	۰,۲۵	۱۶۱۴/۶
ساختار تقویت شده درون سو	۱۷,۰۷	۳۲,۲	۰,۲۶	۸۲۵۲/۲۲
ساختار تقویت شده هیتلری	۱۳,۲۸	۱۹,۸	۰,۱۳	۷۹۸۸/۱۸
ساختار تقویت شده ستاره ای	۵,۸۵	۴۷,۱	۰,۱۵	۵۱۲۶/۲۹
ساختار تقویت شده لانه زنبوری	۶,۰۲	۳۶	۰,۸	۲۹۵۳/۵۹

۵ نتیجه گیری

این پژوهش با هدف تحلیل و مقایسه تطبیقی عملکرد مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی پنج پیکربندی از ساختارهای سلولی تقویت‌شده، شامل ساختارهای «ستاره‌ای»، «لانه‌زنبوری»، «درون‌سو»، «سرنیزه‌ای» و «هیتلری»، به صورت عددی انجام پذیرفت. یافته‌های حاصل نشان می‌دهد که الگوی مهاربندی و نحوه بازآرایی اتصالات داخلی، نقشی تعیین‌کننده در کنترل رفتار فروریزش، پایداری فاز پلتفرم و راندمان استهلاک انرژی ایفا می‌کند. در میان پیکربندی‌های بررسی‌شده، ساختار تقویت‌شده ستاره‌ای به دلیل رفتار آگزتیک و تقارن هندسی مهاربندها، با ثبت بیشترین انرژی ویژه جذب‌شده معادل ۱/۴۷ کیلوژول بر کیلوگرم و جرم ۸۵/۵ گرم، کارآمدترین عملکرد وزنی را ارائه داده و به عنوان پیکربندی بهینه برای جذب انرژی ضربه‌ای شناخته شد. این در حالی است که ساختار لانه‌زنبوری، علی‌رغم ثبت راندمان لحظه‌ای اولیه بالا (۹۴/۰)، به دلیل شکست لایه‌ای و ناپایداری‌های مقطعی، عملکرد پایداری از خود نشان نداد. همچنین، ساختار درون‌سو با ثبت بیشترین نیروی بیشینه اولیه (۲۲/۸۲۵۲ نیوتن)، بالاترین ظرفیت باربری را داشت، اما به دلیل سختی اولیه بسیار بالا، راندمان جذب انرژی آن به ۳۴ درصد محدود گردید. ساختارهای هیتلری و سرنیزه‌ای نیز به ترتیب رفتارهای فروریزش هموار و مرحله‌ای را به نمایش گذاشتند که هر یک کاربردهای خاص خود را در سناریوهای مختلف ایجاب می‌کند.

تحلیل نمودارهای نیرو–جابه‌جایی مؤید آن است که پاسخ مکانیکی سازه‌های تقویت‌شده از مراحل مشخصِ رفتار الاستیک خطی، فاز پلتفرم فروریزش و فاز تراکم نهایی پیروی می‌کند. پایداری فروریزش در ساختار ستاره‌ای، ناشی از جلوگیری از تمرکز تنش موضعی و انتقال شتاب‌های منفی ناگهانی است، به‌طوری‌که این ساختار فاز پلتفرمی بسیار هموار را در محدوده نیرویی ۵۰۰۰ تا ۵۵۰۰ نیوتن تشکیل می‌دهد. تشکیل لولاهای پلاستیکی متوالی در اعضای زاویه‌دار این سازه، از کمانش کلی نابهنگام جلوگیری کرده و حداکثر کار مکانیکی را تا پیش از شروع قفل‌شدگی هندسی مستهلک می‌سازد.

با وجود دستاوردهای حاصل در شناسایی پیکربندی‌های بهینه، پژوهش حاضر دارای محدودیت‌هایی است که مسیر را برای تحقیقات آتی روشن می‌سازد. از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به تمرکز بر بارگذاری‌های شبه‌استاتیک و نادیده گرفتن رفتار دینامیکی تحت نرخ کرنش بالا، فرض ایده‌آل بودن ساختارها با صرف‌نظر از تلورانس‌های ساخت افزایشی (مانند تخلخل‌های داخلی یا ناهمسانگردی لایه‌ها)، عدم بررسی عملکرد خستگی چرخه‌ای و رفتار ساختارها تحت بارگذاری‌های چندمحوره و محیطی اشاره کرد.

منابع

[1] K. E. Evans, "Auxetic polymers: a new range of materials," *Endeavour*, vol. 15, no. 4, pp. 170–174, 1991, doi: 10.1016/0160-9327(91)90123-S.
[2] A. J. C. B. de Saint-Venant, *Résumé des leçons sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*, Paris, 1848.
[3] G. N. Greaves, "Poisson's ratio over two centuries: challenging hypotheses," *Notes and Records of the Royal Society of London*, vol. 67, no. 1, pp. 37–58, 2013.
[4] R. Critchley et al., "A review of the manufacture, mechanical properties and potential applications of auxetic foams," *Physica Status Solidi (b)*, vol. 250, no. 10, pp. 1963–1982, 2013.
[5] K. E. Evans and A. Alderson, "Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking," *Advanced Materials*, vol. 12, no. 9, pp. 617–628, 2000.
[6] D. J. Gunton and G. A. Saunders, "The Young's modulus and Poisson's ratio of arsenic, antimony and bismuth," *Journal of Materials Science*, vol. 7, no. 9, pp. 1061–1068, 1972.
[7] J. F. V. Vincent, C. Lees, and J. E. Hillerton, "Poisson's ratio in skin," *Biomedical Materials and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 19–23, 1991.
[8] J. F. V. Vincent, G. Jeronimidis, B. H. V. Topping, and A. I. Khan, "The mechanical design of skin—towards the development of new materials," *Natural Structural Principles in Models of Architecture*, pp. 165–170, 1991.
[9] J. L. Williams and J. L. Lewis, "Properties and an anisotropic model of cancellous bone from the proximal tibial epiphysis," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 104, no. 1, pp. 50–56, 1982.
[10] Z. Wang and H. Hu, "Auxetic materials and their potential applications in textiles," *Textile Research Journal*, vol. 84, no. 15, pp. 1600–1611, 2014.
[11] K. L. Alderson et al., "Novel fabrication route for auxetic polyethylene. Part 1. Processing and microstructure," *Polymer Engineering & Science*, vol. 45, no. 4, pp. 568–578, 2005, doi: 10.1002/pen.20311.
[12] K. L. Alderson et al., "How to make auxetic fibre reinforced composites," *Physica Status Solidi (b)*, vol. 242, no. 3, pp. 509–518, 2005.
[13] Z. Wang, A. Zulifqar, H. Hu, and H. Kong, "Auxetic composites in aerospace engineering," in *Auxetic Materials and Structures*, 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100037-3.00007-9.
[14] L. Mirante, *Auxetic Structures: toward Bending-Active Architectural Applications*, 2015, pp. 1–251.
[15] F. Scarpa, L. G. Ciffo, and J. R. Yates, "Dynamic properties of high structural integrity auxetic open cell foam," *Smart Materials and Structures*, vol. 13, no. 1, pp. 49–56, 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/1/006.
[16] F. Scarpa, J. A. Giacomin, A. Bezazi, and W. A. Bullough, "Dynamic behavior and damping capacity of auxetic foam pads," in *Smart Structures and Materials 2006: Damping and Isolation*, 2006, vol. 6169, doi: 10.1117/12.658453.
[17] F. Scarpa and F. C. Smith, "Passive and MR fluid-coated auxetic PU foam - mechanical, acoustic, and electromagnetic properties," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, no. 12, pp. 973–979, 2004, doi: 10.1177/1045389X04046610.
[18] Y. Prawoto, "Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: a structural review on the negative Poisson's ratio," *Computational Materials Science*, vol. 58, pp. 140–153, 2012, doi: 10.1016/j.commatsci.2012.02.012.
[19] J. Choi and R. Lakes, "Fracture toughness of re-entrant foam materials with a negative Poisson's ratio: experiment and analysis," *International Journal of Fracture*, vol. 80, pp. 73–83, 1996.
[20] F. Scarpa and P. J. Tomlin, "On the transverse shear modulus of negative Poisson's ratio honeycomb structures," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 23, no. 8, pp. 717–720, 2000.
[21] N. Chan and K. E. Evans, "The mechanical properties of conventional and auxetic foams. Part II: shear," *Journal of Cellular Plastics*, vol. 35, no. 2, pp. 166–183, 1999.
[22] O. Duncan et al., "Review of auxetic materials for sports applications: expanding options in comfort and protection," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 6, p. 941, 2018.
[23] T. Allen et al., "Auxetic foams for sport safety applications," *Procedia Engineering*, vol. 112, pp. 104–109, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.183.
[24] K. E. Evans and K. L. Alderson, "Auxetic materials: the positive side of being negative," *Engineering Science and Education Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 148–154, 2000.
[25] S. Pichandi, *Development of Composite Auxetic Structures for Civil Engineering Applications*, Ph.D. dissertation, Universidade do Minho, 2016.
[26] T. Zahra and M. Dhanasekar, "Characterisation of cementitious polymer mortar–auxetic foam composites," *Construction and Building Materials*, vol. 147, pp. 143–159, 2017.
[27] G. Tzortzinis, A. Gross, and S. Gerasimidis, "Auxetic boosting of confinement in mortar by 3D reentrant truss lattices for next generation steel reinforced concrete members," *Extreme Mechanics Letters*, vol. 52, 2022, doi: 10.1016/j.eml.2022.101681.
[28] R. Zhong et al., "Mechanical properties of concrete composites with auxetic single and layered honeycomb

Multidisciplinary Optimization, vol. 58, no. 4, pp. 1805–1822, 2018.
[42] Y. Wang et al., "Analysis and parametric optimization of a novel sandwich panel with double-V auxetic structure core under air blast loading," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 142, pp. 245–254, 2018.
[43] U. D. Larsen, O. Sigmund, and S. Bouwstra, "Design and fabrication of compliant micromechanisms and structures with negative Poisson's ratio," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 99–106, 1997.
[44] X. Zhao et al., "Dynamic crushing of double-arrowed auxetic structure under impact loading," *Materials & Design*, vol. 160, pp. 527–537, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.09.041.
[45] Q. Gao et al., "Crashworthiness analysis of double-arrowed auxetic structure under axial impact loading," *Materials & Design*, vol. 161, pp. 22–34, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.11.013.
[46] A. Remennikov et al., "Development and performance evaluation of large-scale auxetic protective systems for localised impulsive loads," *International Journal of Protective Structures*, vol. 10, no. 3, pp. 390–417, 2019, doi: 10.1177/2041419619858087.

[٤٧] 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).
[٤٨] 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
[٤٩] Soltanmohammadi, S., Ghanbari, J., Adelkhani, R., & Mohandesi, N. (2026). *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, 27(3), 162–187. https://doi.org/10.1080/15502287.2026.2679427
[٥٠] Mohandesi, N., Talebitooti, M., & Fadaee, M. (2024). *Mathematical modeling of free vibration of star-shaped auxetic rectangular plate*. Archive of Applied Mechanics. https://doi.org/10.1007/s00419-024-02678-3
[٥١] Mohandesi, N., Fadaee, M., & Talebitooti, M. (2025). *Nonlinear vibration of simply supported star-shaped auxetic cylindrical shell*. Archive of Applied Mechanics, 95(202). https://doi.org/10.1007/s00419-025-02913-5

structures," *Construction and Building Materials*, vol. 322, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126453.
[29] C. Luo et al., "A novel concrete-filled auxetic tube composite structure: design and compressive characteristic study," *Engineering Structures*, vol. 268, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114759.
[30] Y. Xu et al., "Cementitious cellular composites with auxetic behavior," *Cement and Concrete Composites*, vol. 111, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103624.
[31] L. J. Gibson, M. F. Ashby, G. S. Schajer, and C. I. Robertson, "The mechanics of two-dimensional cellular materials," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 382, pp. 25–42, 1982.
[32] G. Imbalzano, P. Tran, T. D. Ngo, and P. V. S. Lee, "A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings," *Composite Structures*, vol. 135, pp. 339–352, 2016.
[33] G. Imbalzano et al., "Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: comparisons and parametric designs," *Composite Structures*, vol. 183, pp. 242–261, 2018.
[34] L. L. Hu, M. Z. Zhou, and H. Deng, "Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation," *Composite Structures*, vol. 207, pp. 323–330, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.09.066.
[35] H. Al-Rifaie and W. Sumelka, "The development of a new shock absorbing uniaxial graded auxetic damper (UGAD)," *Materials*, vol. 12, no. 16, 2019.
[36] X. Zhang et al., "Numerical investigation on dynamic crushing behavior of auxetic honeycombs with various cell-wall angles," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 2, 2015.
[37] I. G. Masters and K. E. Evans, "Models for the elastic deformation of honeycombs," *Composite Structures*, vol. 35, no. 4, pp. 403–422, 1996.
[38] L. Yang, O. Harrysson, H. West, and D. Cormier, "Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 69, pp. 475–490, 2015.
[39] I. E. Berinskii, "Elastic networks to model auxetic properties of cellular materials," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 115, pp. 481–488, 2016.
[40] N. Novak, M. Vesenjak, and Z. Ren, "Computational simulation and optimization of functionally graded auxetic structures made from inverted tetrapods," *Physica Status Solidi (b)*, vol. 254, no. 12, 2017.
[41] C. Wang et al., "Multi-objective explosion-proof performance optimization of a novel vehicle door with negative Poisson's ratio structure," *Structural and*

[۵۲]M. Murariu and P. Dubois, "PLA composites: From production to properties," *Elsevier*, 2016.
[۵۳]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.
[۵۴]Najafi M, Ahmadi H, Liaghat GH. Experimental and numerical investigation of energy absorption in auxetic structures under quasi-static loading. Modares MechEng. 2020;20(2):415-24. https://doi.org/10.22068/mme.10886
[۵۵]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.
[۵۶]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.
[۵۷]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.