

Numerical Investigation of Geometric Effects on Energy Absorption Capacity of 2D and 3D Re-entrant Structures

Erfan Taherkhani^{1*}, Mohamad Reza Parsaeiyan¹, Ashkan Mosayebi¹, Mahdi Mardani² and Rohalah Panahi Liavoli²

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Babaei Faculty, National Skills University (NSU), Tehran, Iran

* Corresponding author, Email: erfah.taherkhani2128@gmail.com

ABSTRACT

Introduction and Objectives: Auxetic structures have attracted significant attention in recent years due to their negative Poisson's ratio and features such as high impact resistance and enhanced energy absorption. Re-entrant structures are among the most widely used auxetic geometries. This study aims to investigate the mechanical behavior and energy absorption capacity of these structures and to propose geometric modifications to improve their performance.

Materials and Methods: To determine the mechanical properties of the material, including Young's modulus and yield stress, standard tensile specimens were fabricated using an FDM 3D printer with PLA+ filament and tested experimentally. A two-dimensional model of the re-entrant structure was then simulated under in-plane quasi-static compression using ABAQUS. To enhance the energy absorption behavior, two geometric modifications were applied, namely replacing sharp re-entrant corners with smooth arc-shaped curves and adding triangular reinforcing members. These modifications were evaluated in both 2D and 3D models.

Results: The findings showed that the proposed modifications significantly improved the specific energy absorption without altering the overall deformation mechanism. In the 2D models, improvements of 22% and 44% were observed, while in the 3D models, energy absorption increased by 41% and 66%. Smoother stress distribution and the elimination of sharp angles also delayed structural failure.

Conclusion: The results indicate that geometric modifications in re-entrant auxetic structures can effectively enhance their energy absorption performance, offering a practical approach for designing more efficient auxetic systems by combining these modifications.

Keywords: Auxetic structure, Energy absorption, Re-entrant structure, Finite element simulation, Geometric innovation, Negative Poisson's ratio, Three-dimensional re-entrant structure.

بررسی عددی اثر هندسه بر ظرفیت جذب انرژی در ساختارهای دوبعدی و سه بعدی درون سو

عرفان طاهرخانی^{۱*}، محمد رضا پارسایان^۱، اشکان مسیبی^۱، مهدی مردانی^۲ و روح الله پناهی لیاولی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده شهید بابایی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

*نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: erfane.taherkhani2128@gmail.com

چکیده

مقدمه و اهداف: ساختارهای آگزتیک، به دلیل ضریب پواسون منفی و ویژگی‌های مانند مقاومت مناسب در برابر ضربه و ظرفیت بالای جذب انرژی، در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساختارهای درون سو از رایج‌ترین هندسه‌های آگزتیک هستند. هدف این پژوهش، بررسی رفتار مکانیکی و ارزیابی ظرفیت جذب انرژی این ساختارها و ارائه اصلاحات هندسی برای بهبود عملکرد آنها است.

مواد و روش‌ها: برای تعیین خواص مکانیکی ماده شامل مدول الاستیسیته و تنش تسلیم، نمونه‌های استاندارد کشش با چاپگر سه بعدی و فیلامنت PLA+ ساخته و آزمایش شدند. سپس مدل دوبعدی ساختار درون سو تحت بار فشاری شبه‌استاتیکی در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد. به منظور افزایش کارایی جذب انرژی، دو اصلاح هندسی شامل جایگزینی زوایای تند با فوس‌های هلالی و افزودن اعضای مثلثی تقویتی اعمال و این تغییرات در مدل‌های دوبعدی و سه بعدی ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد اصلاحات پیشنهادی بدون ایجاد اختلال در رفتار کلی سازه، موجب افزایش قابل توجه جذب انرژی ویژه می‌شوند. در مدل‌های دوبعدی، افزایش ۲۲ و ۴۴ درصدی و در مدل‌های سه بعدی، افزایش ۴۱ و ۶۶ درصدی در ظرفیت جذب انرژی مشاهده شد. همچنین یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش و حذف زوایای تند، نقش مهمی در تأخیر شکست سازه داشت.

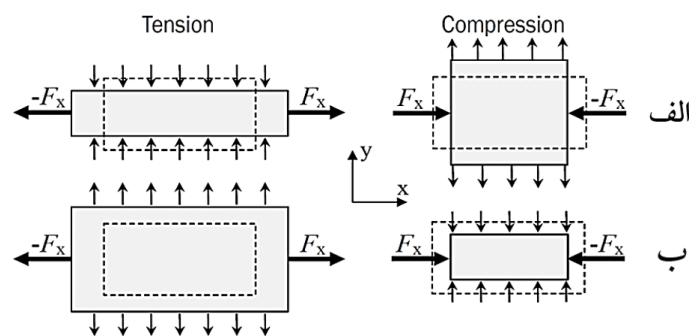
نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد اصلاحات هندسی در ساختارهای آگزتیک درون سو، می‌تواند عملکرد جذب انرژی آنها را به طور مؤثری بهبود دهد و با ترکیب این اصلاحات، امکان طراحی ساختارهای آگزتیک کارآمدتر فراهم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ساختار آگزتیک، جذب انرژی، ساختار درون سو، شبیه‌سازی اجزای محدود، نوآوری هندسی، نسبت پواسون منفی، ساختار سه بعدی درون سو.

ساختارهای سلولی آگزتیک^۱، به دلیل بهره‌مندی از ضریب پواسون منفی^۲ (مطابق شکل ۱) و قابلیت تغییر شکل‌های غیرمتعارف، طی سال‌های اخیر در حوزه طراحی سازه‌های سبک‌وزن و جاذب‌های انرژی مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. در میان این ساختارها، هندسه‌هایی همچون ساختار درون‌سو^۳ پایه، ساختارهای درون‌سو اصلاح‌شده و همچنین ساختارهای سه‌بعدی درون‌سو، به‌عنوان نسل جدیدی از فراموادهای مبتنی بر تغییرشکل‌های فشاری مطرح شده‌اند. این ساختارهای نوین، با جایگزینی المان‌های مستقیم با المان‌های منحنی و بهره‌گیری از توزیع هندسی بهینه‌شده، رفتاری مکانیکی متفاوت نسبت به سلول‌های آگزتیک کلاسیک ایجاد می‌کنند و امکان جذب انرژی^۴ بیشتر، پایداری بالاتر در تغییرشکل و توزیع یکنواخت‌تر تنش را فراهم می‌سازند (۱).

بر همین اساس، پژوهش‌های پیشین بر پایه ساختارهای درون‌سو و نوآورانه بررسی شدند. خاقانی و همکاران (۳)، دو ساختار آگزتیک با نام‌های درون‌سو و ستاره‌ای را در کنار ساختار متداول هانی‌کام بررسی کردند و نشان دادند که نیروی نهایی در ساختارهای درون‌سو و ستاره‌ای، به‌ترتیب ۱۲۵ و ۱۶۴ درصد نسبت به ساختار هانی‌کام افزایش یافته است. روبرژو و همکاران (۴)، یک ساختار آگزتیک دوبعدی و یک روش طراحی متناظر، شامل دو تبدیل هندسی، معرفی کردند. این روش طراحی نه تنها امکان بازتولید ساختارهای آگزتیک موجود را فراهم ساخت، بلکه پارامتری را نیز ارائه کرد که ارتباط نزدیکی با نسبت پواسون، مدول یانگ و تراکم‌پذیری داشت. لیلیراث و همکاران (۵)، به توصیف ساختارهای آگزتیک شناسایی‌شده و طراحی‌شده تا آن زمان پرداختند و در این راستا، رویکردهای مختلف به‌کاررفته برای تعریف رفتار مکانیکی^۵ این ساختارها را بررسی کردند و همچنین به محدودیت‌های آن‌ها و مطالعات انجام‌شده برای تکمیل و توسعه این پژوهش‌ها اشاره کردند. العماره و همکاران (۶)، یک ساختار آگزتیک جدید با نام ساختار آگزتیک کایرال بازگشتی را معرفی کردند. این ساختار ترکیبی از ویژگی‌های

توپولوژیکی کندوی شش‌ضلعی بازگشتی و کندوی ضدتراکایرال بود. نتایج نشان داد که ساختار آگزتیک کایرال بازگشتی نسبت به کندوی بازگشتی، چگالی کمتری داشت و علاوه بر این، هنگام بارگذاری در راستای X، ویژگی‌های کششی بالاتر و اثر آگزتیک قوی‌تری نسبت به ساختار بازگشتی از خود نشان داد. شیرزاد و همکاران (۷)، ساختاری را بررسی کردند که رفتار بافت‌های اندام انسان مانند استخوان و تاندون را تقلید می‌کرد. خواص مکانیکی داربست‌ها با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال به‌صورت تجربی ارزیابی شد و نتایج نشان داد که ساختارهای آگزتیک مثلی، باعث افزایش مدول یانگ و استحکام تسلیم، به‌ترتیب ۲۸ و ۲۷/۵ درصد تحت بار فشاری و ۳۵ و ۴۰ درصد تحت بار کششی شدند. کاراکاپوروآ و همکاران (۸)، شکل‌های سلول آگزتیک شامل درون‌سو، پیکان دوطرفه، ستاره‌ای و هندسه دویو را همراه با نوع ماده، شامل آلومینیوم و فولاد کربنی و همچنین متغیرهای هندسی مورد بررسی قرار دادند تا بیشترین مقدار جذب انرژی ویژه حاصل شود. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که بیشترین جذب انرژی ویژه مربوط به سلول آگزتیک ستاره‌ای ساخته‌شده از آلومینیوم با ضخامت ۲/۹۵ میلی‌متر بود. ماکو و همکاران (۹)، رفتار مکانیکی سه نوع ساختار سلولی آگزتیک شامل کایرال شش‌ضلعی دوبعدی، کایرال چهارضلعی دوبعدی و کایرال چهارضلعی سه‌بعدی را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که هر سه ساختار در بیشتر مراحل تغییرشکل، هم در بارگذاری شبه‌استاتیکی و هم در بارگذاری ضربه‌ای، رفتار آگزتیک غالبی از خود نشان دادند. لیو و همکاران (۱۰)، ساختارهای درون‌سو آگزتیک را به‌عنوان موضوع مطالعه خود در نظر گرفتند و آن‌ها را به سه دسته اصلی شامل ساختارهای درون‌سو، ساختارهای کایرال و ساختارهای صلب چرخشی تقسیم کردند. نتایج نشان داد که هر کدام از ساختارها دارای ویژگی‌های خاصی هستند و کاربردهای متنوعی دارند. اعتمادی و همکاران (۱۱)، مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی و مدل‌های اجزای محدود^۶ را برای ارزیابی توانایی جذب انرژی ساختارهای آگزتیک جدید انجام دادند. نتایج نشان داد که



شکل ۱- الف) ساختارهای معمولی، ب) ساختارهای آگزتیک (۲).

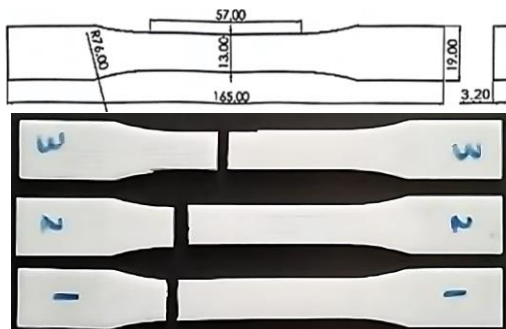
مکانیکی ساختارهای خاص، بررسی اثر برخی پارامترهای هندسی، یا بهینه‌سازی موضعی یک نوع ساختار متمرکز بوده است. همچنین، اگرچه در برخی مطالعات رفتار ساختارهای آگزتیک دوبعدی یا سه‌بعدی به صورت مستقل بررسی شده، مقایسه‌ای منسجم و هدفمند میان ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی درون‌سو، به‌ویژه از منظر ظرفیت جذب انرژی و شاخص‌های مرتبط با عملکرد فشاری، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، هنوز درک روشنی از میزان تأثیر تفاوت‌های هندسی این دو گروه ساختاری بر پاسخ مکانیکی و کارایی جذب انرژی آن‌ها وجود ندارد. بر همین اساس، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با استفاده از تحلیل عددی، اثر هندسه بر ظرفیت جذب انرژی در ساختارهای دوبعدی و سه‌بعدی درون‌سو به صورت نظام‌مند بررسی شود. در این راستا، تفاوت عملکرد این ساختارها بر پایه شاخص‌های مکانیکی و معیارهای مرتبط با جذب انرژی ارزیابی شده تا امکان شناخت دقیق‌تر رفتار آن‌ها و ارائه دیدگاهی روشن‌تر برای کاربردهای مهندسی فراهم شود.

۲- مواد و روش تحقیق

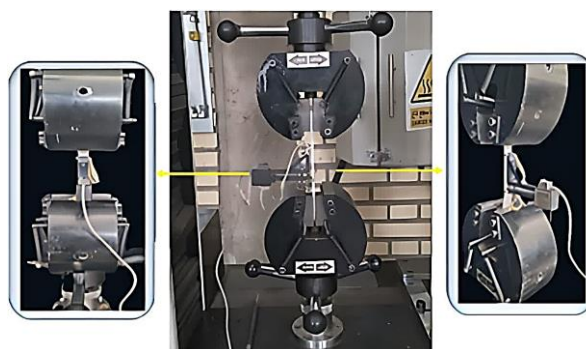
پلی‌لاکتیک‌اسید^۷، یک پلیمر زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر است که از منابع گیاهی مانند نشاسته ذرت و نیشکر تولید می‌شود. نسخه بهبودیافته آن، یعنی PLA+، با افزودنی‌های خاص تقویت شده است تا مقاومت مکانیکی و حرارتی بالاتری داشته باشد. دمای ذوب PLA+ معمولاً بین ۲۰۵ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد است که آن را برای چاپ سه‌بعدی ایده‌آل می‌کند. این

توپولوژی‌های اصلاح‌شده فراماده، بهبود قابل‌توجهی در ظرفیت جذب انرژی و جذب انرژی ویژه ایجاد کردند. زاویستوفسکی و همکاران (۱۲)، بهینه‌سازی پارامتری چندسلول واحد دوبعدی آگزتیک را با هدف شناسایی پارامترهای هندسی با بیشترین تأثیر بر نسبت پواسون و همچنین شناسایی هندسه‌هایی با قوی‌ترین رفتار آگزتیک ارائه کردند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی سلول واحد، رفتار آگزتیک را در ساختارهای بزرگ‌تر نیز بهبود داد و تنش معادل در آرایه‌های چندسلولی کاهش یافت. هو و همکاران (۱۳)، یک ساختار درون‌سو را به عنوان پایه انتخاب کردند تا ساختارهای شبکه‌ای لانه‌زنبوری آگزتیک هیبریدی سه‌بعدی جدیدی توسعه دهند. نتایج نشان داد که تفاوت قابل‌توجهی در رفتار مکانیکی این ساختارها تحت بارگذاری کششی و فشاری وجود داشت؛ به‌طور خاص، کمترین مقدار جذب انرژی در حالت کششی، ۸۶ درصد بیشتر از بیشترین مقدار جذب انرژی در حالت فشاری بود.

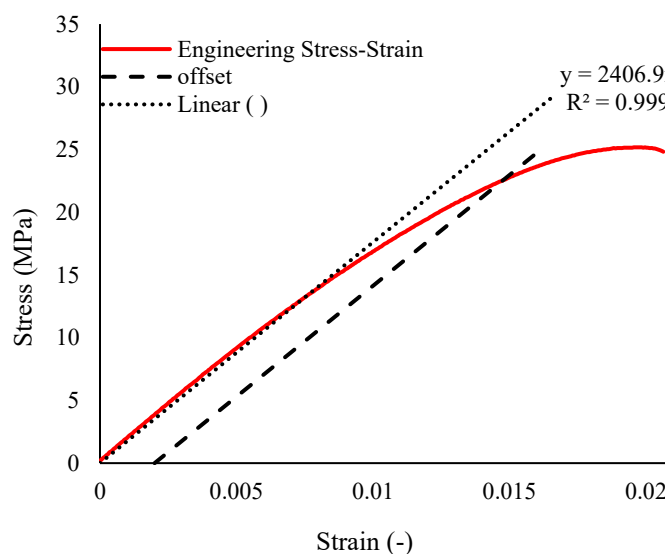
با توجه به مرور پژوهش‌های پیشین، مشخص می‌شود که ساختارهای آگزتیک، به‌ویژه ساختارهای درون‌سو، به دلیل ویژگی‌های هندسی خاص خود، ظرفیت قابل‌توجهی در بهبود رفتار مکانیکی، کنترل الگوی تغییرشکل و افزایش قابلیت جذب انرژی دارند. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که این ساختارها، در مقایسه با بسیاری از ساختارهای متداول، می‌توانند عملکرد مطلوب‌تری از نظر استحکام، سختی، نسبت پواسون منفی و توانایی جذب انرژی از خود نشان دهند. با این حال، بخش عمده پژوهش‌های موجود، بر معرفی هندسه‌های جدید، توصیف رفتار



ب



الف



ج

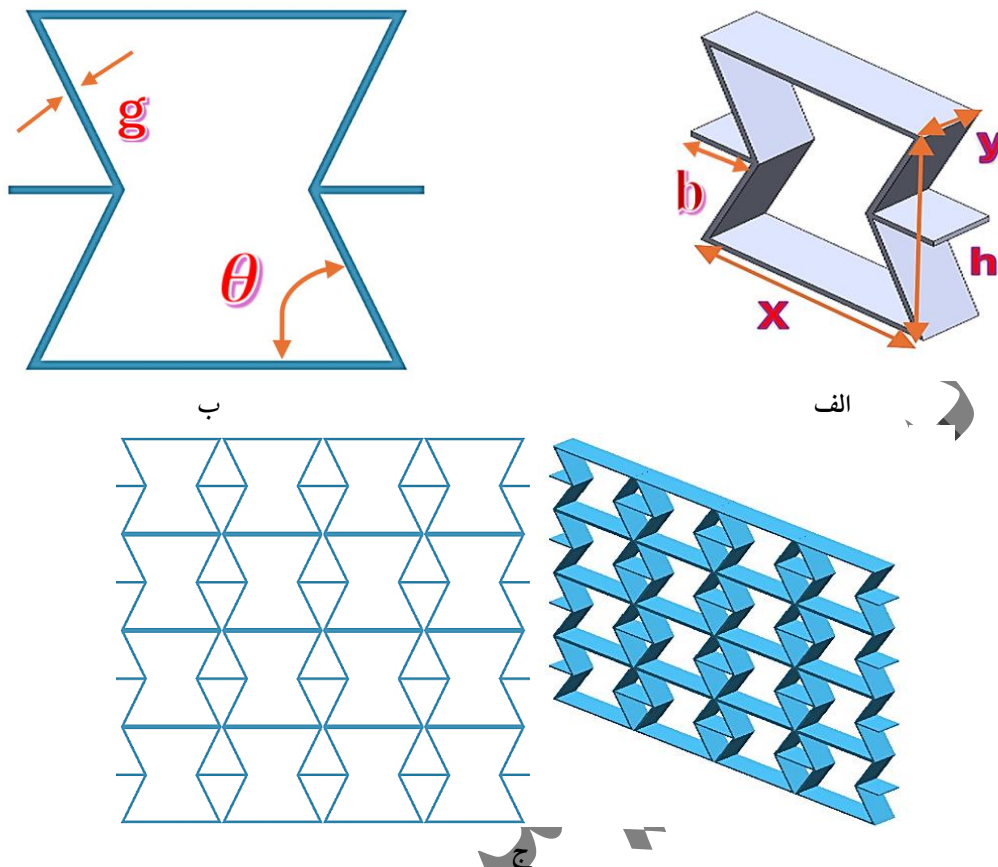
شکل ۲- تصاویر آزمایش کشش PLA+: (الف) نمونه نصب شده در دستگاه Santam، (ب) سه نمونه استاندارد و (ج) نمودار تنش-کرنش.

موازی با ناحیه الاستیک خطی منحنی تنش-کرنش واقعی استفاده شد. همچنین، مشخصات و تنظیمات مربوط به فرایند چاپ سه‌بعدی و ماده مورد استفاده، در جدول (۱) ارائه شده مطابق با مرجع (۱۷) است تا شرایط ساخت نمونه‌ها به صورت شفاف و قابل تکرار گزارش شود.

خواص مکانیکی ماده PLA+، شامل مقادیر چگالی، ضریب پواسون، مدول یانگ و تنش تسلیم، در جدول (۲) ارائه شده است که به عنوان ورودی‌های مدل عددی مورد استفاده قرار گرفت.

ماده به دلیل خواص ارتقایافته، در تولید قطعات مهندسی با نیاز به تحمل فشار و دمای بیشتر، کاربرد فراوانی دارد. همچنین، PLA+ به دلیل چاپ‌پذیری مناسب، پایداری نسبی خواص مکانیکی و امکان تولید نمونه‌هایی با دقت ابعادی قابل قبول، برای ساخت نمونه‌های این پژوهش انتخاب شد. برای تعیین خواص PLA+، آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM-D638 انجام گرفت (۳). هندسه نمونه مطابق شکل (۲-ب) و نمونه‌های مورد استفاده در این آزمون با استفاده از دستگاه ستام موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بوعلی سینا مطابق شکل (۲-الف) مورد آزمایش قرار گرفتند.

همان‌طور که در شکل (۲-ج) نشان داده شده است، از روش افست ۰/۰۰۲ برای تعیین خواص مکانیکی ماده و با رسم خطی



شکل ۳- طراحی و ابعاد ساختار آگزتیک درون سو (الف) نمای سه بعدی سلول واحد به همراه پارامترهای هندسی x , y , h و b ; (ب) نمای دوبعدی سلول واحد و تعریف زاویه درون سو θ و پارامتر g ; (ج) آرایش تکرارشونده ساختار در نمای دوبعدی و سه بعدی.

۲-۱- مواد و روش ها

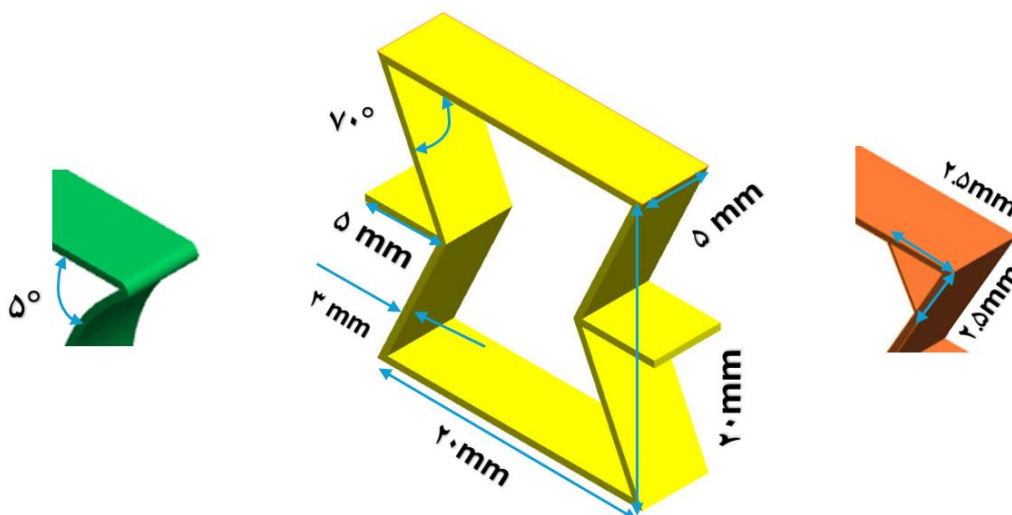
در این پژوهش، مدل سازی هندسی ساختار شبکه آگزتیک با هندسه درون سو که در ادبیات فنی تحت عنوان ساختار «ساعت شنی» نیز شناخته می شود، با استفاده از نرم افزار SolidWorks Premium 2017 انجام شد و سپس مدل FE و شبیه سازی عددی در محیط Abaqus/CAE 2017 پیاده سازی گردید. جزئیات هندسی سلول واحد و چیدمان نهایی شبکه در شکل (۳) ارائه شده است. به منظور تبیین دقیق ویژگی های هندسی و درک بهتر ماهیت سازه، شکل (۳-الف) نمای سه بعدی سلول واحد را نشان می دهد که در آن پارامترهای کلیدی هندسی مشخص شده اند؛ همچنین شکل (۳-ب) پروفیل دوبعدی سلول واحد را جهت نمایش هندسه پایه و زوایای داخلی ارائه می کند. علاوه بر این، شکل (۳-ج) آرایه مونتاژ شده سلول ها را در قالب

جدول ۱- تنظیمات نرم افزار پریتتر سه بعدی (۱۷)

الگوی پرشدگی داخلی	شبکه ای خطی
الگوی پرشدگی خارجی	شبکه ای خطی
درصد پرشدگی داخلی	۱۰۰
درصد هم پوشانی پیرامونی	۴۵
قطر نازل (میلی متر)	۰.۴
دمای نازل (درجه سانتی گراد)	۲۰۰
دمای بستر چاپ (درجه سانتی گراد)	۶۰

جدول ۲- خواص مکانیکی PLA+

چگالی (kg/m^3) (۱۷)	ضریب پواسون (۱۷)	مدول یانگ (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
۱۲۵۰	۰/۳	۲۴۰۶/۹	۲۲/۴۷



شکل ۴- طراحی و اندازه گذاری ساختار درون سو.

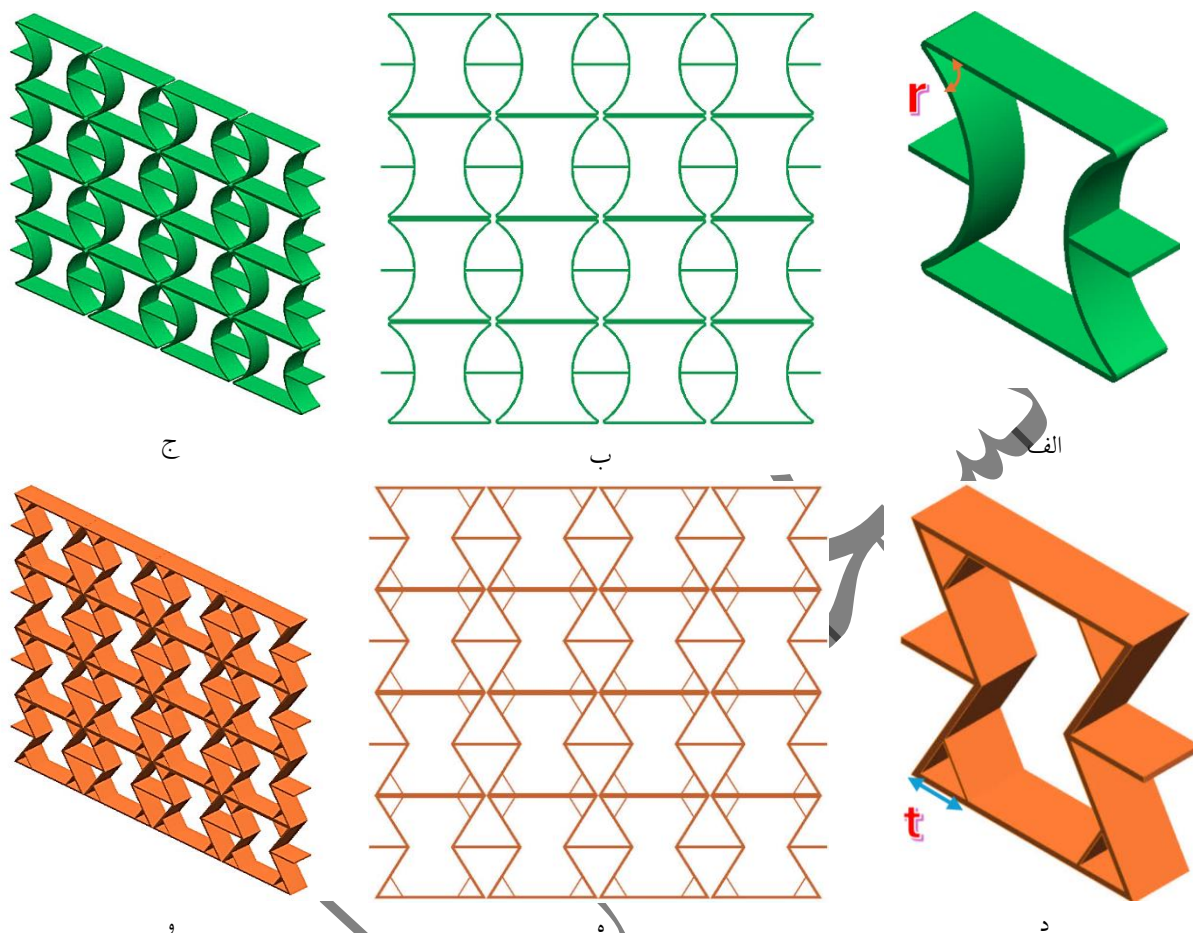
جدول ۳- ابعاد و پارامترهای طراحی ساختار درون سو

پارامتر هندسی	نماد	واحد	درون سو	درون سو هلالی	درون سو تقویت شده
طول قاعده سلول واحد	x	mm	۲۰	۲۰	۲۰
ارتفاع سلول واحد	h	mm	۲۰	۲۰	۲۰
ضخامت خارج از صفحه (عمق)	y	mm	۵	۵	۵
پهنای باله های افقی جانبی	b	mm	۵	۵	۵
زاویه دیوار داخلی	θ	°	۷۰	۷۰	۷۰
شعاع فیلت گوشه های تیز	r	°	-	۵	-
طول صفحات تقویت کننده	t	mm	-	-	۲/۵
ضخامت جداره	g	mm	۳	۳	۳

سه بعدی مطابق شکل (۴)، انجام شده و شبکه نهایی از طریق تکرار منظم سلول های واحد شکل گرفته است. مقادیر دقیق پارامترهای هندسی و زوایای مربوط به سلول واحد، در جدول (۳) ارائه شده است.

به منظور ارتقای عملکرد مکانیکی و بهبود پارامترهای جذب انرژی، دو طرح اصلاح شده بر پایه هندسه درون سوی ساده توسعه یافته اند که جزئیات هندسی آن ها در شکل (۵) ارائه شده است. ردیف بالای این شکل به ساختار درون سوی اصلاح شده (هلالی) اختصاص دارد؛ به طوری که شکل (۵-الف) نمای سه بعدی تک سلول، شکل (۵-ب) نمای دوبعدی شبکه و شکل

یک شبکه (به صورت نمای دوبعدی و سه بعدی) نمایش می دهد تا نحوه اتصال سلول ها و تشکیل شبکه به صورت شفاف قابل مشاهده باشد. پارامترهای هندسی سلول واحد شامل طول قاعده (x)، عمق یا ضخامت خارج از صفحه (y)، ارتفاع سلول (h) و پهنای باله های افقی جانبی (b) است که نحوه تعریف آن ها در شکل (۳-الف) مشخص شده است. شایان ذکر است که اگرچه در برخی بخش ها از نماهای دوبعدی برای تسهیل درک هندسه و معرفی پارامترها استفاده شده است، تمامی مدل ها در ادامه در چارچوب سه بعدی و در Abaqus/CAE تحلیل شده اند. کلیه مراحل مدل سازی و شبیه سازی عددی بر مبنای طراحی



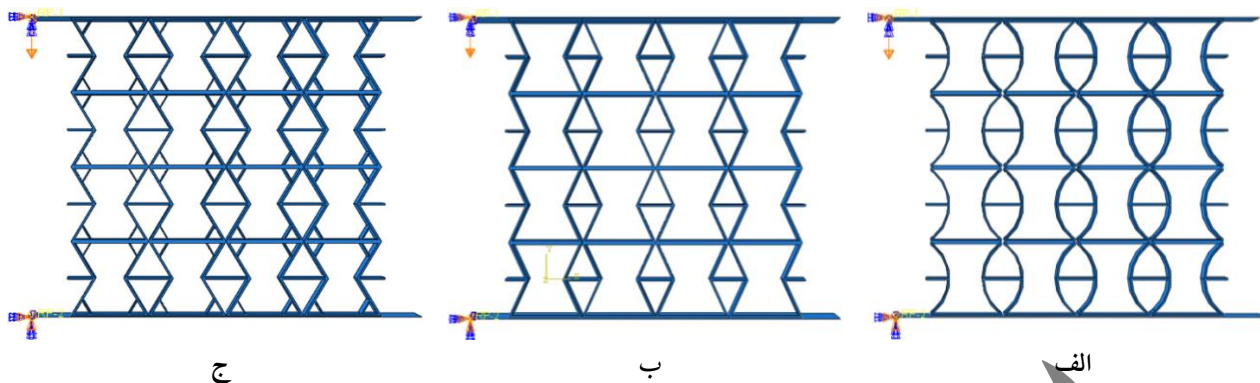
شکل ۵- مقایسه ساختارهای آگزتیک درون سو؛ (الف) سلول واحد هلالی با شعاع انحنا r ، (ب) شبکه دوبعدی هلالی، (ج) آرایه سه بعدی هلالی، (د) سلول واحد تقویت شده با ضخامت دیواره t ، (ه) شبکه دوبعدی تقویت شده، (و) آرایه سه بعدی تقویت شده.

اعمال گردیده است. جزئیات کامل ابعادی مربوط به پارامترهای کلیدی از جمله طول، ارتفاع، ضخامت جداره، شعاع فیلتهای، زاویه داخلی و ضخامت صفحات تقویت کننده، برای تمامی ساختارهای ساده، هلالی و تقویت شده به منظور مقایسه و تکرارپذیری، در جدول (۳) خلاصه شده است.

۲-۲- شبیه سازی اجزای محدود

در این بخش، تجزیه و تحلیل FE ساختارهای درون سو، به منظور ارزیابی پاسخ مکانیکی آنها تحت بارگذاری فشاری ارائه شده است. مدل های هندسی توسعه یافته در نرم افزار سالیدورکس، با فرمت استاندارد ذخیره و به محیط های قطعه^۹ و مونتاژ نرم افزار آباکوس وارد شدند. به منظور شبیه سازی دقیق آزمون فشار

(۵-ج) نمای سه بعدی شبکه مونتاژ شده را نشان می دهد. در این هندسه، تمرکز تنش در گوشه های تیز داخلی از طریق اعمال فیلتهای^۹ (گرد کردن گوشه ها با شعاع مشخص)، تعدیل شده است تا صلبیت موضعی بهبود یابد. ردیف پایین نیز ساختار درون سویی تقویت شده را به تصویر می کشد که در آن شکل (۵-د) تک سلول سه بعدی، شکل (۵-ه) نمای دوبعدی شبکه و شکل (۵-و) نمای سه بعدی شبکه متصل را نشان می دهد. در این طرح، از صفحات تقویت کننده با ضخامت مشخص در زاویه داخلی (محل تلاقی بازوهای مایل سلول)، استفاده شده است تا پایداری دیواره ها در برابر کمایش افزایش یابد. در تمام طرح های مذکور، منظور از ضخامت جداره، فاصله بین مرزهای داخلی و خارجی دیواره (گوشت دیواره) است که در هر سه راستا به صورت یکنواخت



شکل ۶- شبیه‌سازی FE ساختارهای دوبعدی درون‌سو در نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری فشاری؛ (الف) ساختار درون‌سوی هلالی، (ب) ساختار درون‌سوی پایه (سلول ریتترت معمولی)، و (ج) ساختار درون‌سوی تقویت‌شده.

اجزای مختلف شبکه در حین چین‌خوردگی و تراکم، خودتماسی برای سطوح خارجی سازه فعال گردید. فرمول‌بندی تماس در تحلیل، به‌صورت General Contact اعمال شد تا تمامی نواحی محتمل تماس در طول فشردگی پوشش داده شوند. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق رفتار غیرخطی و فرآیند شکست ماده PLA+ در نرم‌افزار آباکوس، خواص مکانیکی ماده در دو ناحیه الاستیک و پلاستیک تعریف گردید. در بخش الاستیک، مقادیر مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (ν) وارد شدند. برای تعریف رفتار پلاستیک ماده، داده‌های تجربی حاصل از آزمون کشش تک‌محوره که به‌صورت منحنی تنش-کرنش مهندسی بودند، با استفاده از روابط ریاضی (۱) و (۲) به مقادیر تنش حقیقی (σ_{true}) و کرنش پلاستیک معادل ϵ_{pl} تبدیل شدند.

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{pl} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (2)$$

که در آن‌ها، σ_{true} و ϵ_{eng} به ترتیب تنش و کرنش مهندسی حاصل از آزمون تجربی هستند. داده‌های حاصل از این محاسبات به‌صورت نقاط گسسته (تنش حقیقی برحسب کرنش پلاستیک معادل)، در بخش رفتار پلاستیک ماده (Plasticity < Plastic) در نرم‌افزار آباکوس وارد گردید.

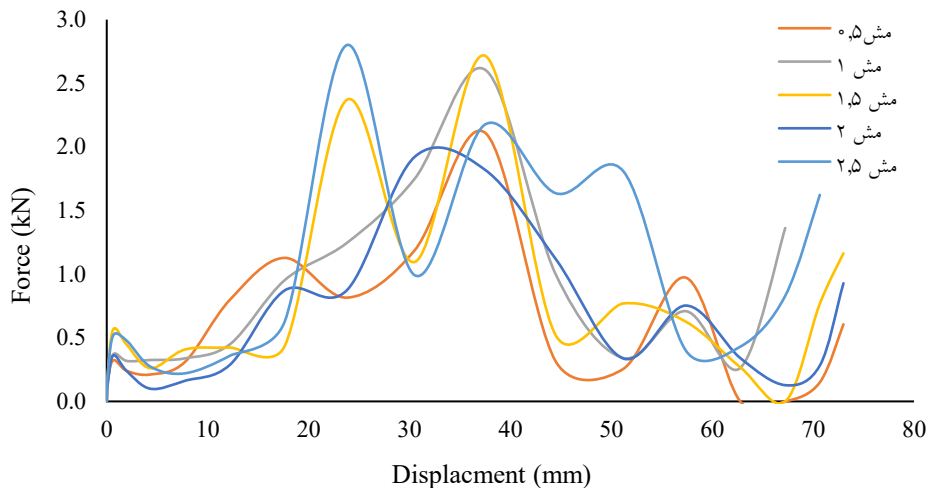
افزون بر رفتار پلاستیک، جهت شبیه‌سازی شروع و رشد آسیب در ساختار، از معیار آسیب شکل‌پذیر استفاده شد. پارامترهای ورودی این مدل شامل کرنش شکست^۱، نسبت

شبه‌استاتیک، تکیه‌گاه‌های بارگذاری بالا و پایین به‌عنوان سطوح صلب مدل‌سازی شدند. سطح پایینی به‌طور کامل در تمامی درجات آزادی مهار گردید، درحالی‌که برای سطح بالایی، جابجایی کنترل‌شده در راستای محور y جهت اعمال فشار بر ساختار شبکه‌ای لحاظ شد. از نقاط مرجع برای اعمال دقیق شرایط مرزی و استخراج داده‌ها استفاده شده است. مدل FE و شرایط بارگذاری در شکل (۶) به تصویر کشیده شده است. نیروی واکنش، از نقطه مرجع سطح صلب متحرک استخراج گردید. برای اطمینان از اعمال جابجایی به‌صورت روان و پیوسته و حفظ ماهیت شبه‌استاتیک تحلیل، از یک تابع دامنه خطی در ماژول بارگذاری استفاده شد تا از ایجاد اثرات دینامیکی ناخواسته و تغییرات ناگهانی در پروفیل بارگذاری جلوگیری شود. خواص ماده بر اساس آزمون کشش تجربی نمونه‌های دمبلی استخراج به‌طور مستقیم در مدل عددی اعمال شد. همچنین، روش شبیه‌سازی و تنظیمات تحلیل بر پایه روش‌شناسی معتبر ارائه‌شده در مرجع (۱۳) انتخاب گردید که صحت آن برای ساختارهای جدارنازک مشابه به‌صورت تجربی تأیید شده است.

در شبیه‌سازی، تماس میان صفحات صلب بارگذاری و نمونه، از الگوریتم تماس سطح-به-سطح استفاده شد. رفتار نرمال تماس، به‌صورت جلوگیری از نفوذ تعریف گردید و در راستای مماسی، از مدل اصطکاک کولمب با ضریب اصطکاک ثابت استفاده شد. همچنین به‌منظور لحاظ‌کردن تماس احتمالی بین

جدول ۴- مقادیر آسیب شکل پذیر برای مدل سازی ساختار درون سو

ردیف	کرنش شکست	نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش فون مایزر	نرخ کرنش
۱	۰/۰۲۴	-۵	۰/۰۰۱
۲	۰/۰۲۴	۵	۰/۰۰۱



شکل ۷- آزمون مش های انجام شده.

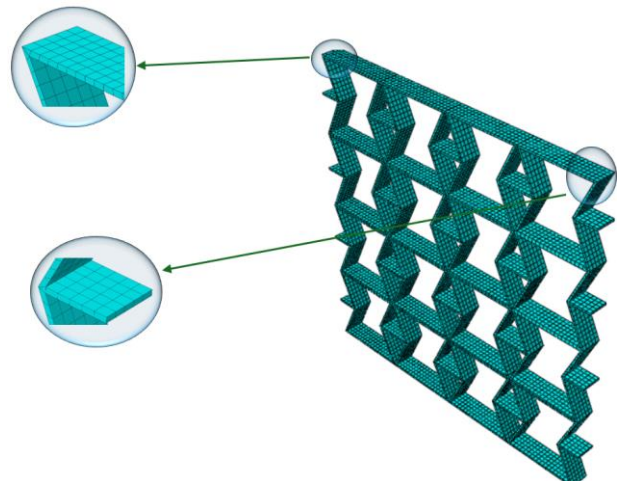
المان ها، به دلیل کارایی محاسباتی بالا و مقاومت در برابر پدیده قفل شدگی برشی در تحلیل های مربوط به تغییر شکل های بزرگ و همچنین رفتار فشاری، گزینه ای بسیار مناسب برای این نوع شبیه سازی ها محسوب می شوند. به منظور انتخاب اندازه شبکه بهینه و اطمینان از استقلال نتایج شبیه سازی از اندازه مش، یک تحلیل همگرایی شبکه روی ساختار درون سوی تقویت شده انجام گرفت. در این بررسی، پنج اندازه مش مختلف شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلی متر مورد ارزیابی قرار گرفتند. نمودار نیرو-جابجایی حاصل از این آزمون (شکل ۷)، نشان می دهد که رفتار کلی سازه در تمامی اندازه های مش از یک الگوی مشابه پیروی می کند؛ به طوری که سازه کار تغییر شکل، موقعیت قله های نیرو و روند فروریزش پیش رونده ساختار به خوبی حفظ شده است.

با این حال، بررسی مقداری نتایج نشان می دهد که مش های درشت تر (۲/۵ و ۲ میلی متر) به دلیل سختی خمشی کمتر ناشی از ابعاد المان ها، مقادیر نیروی کمتری را در طول فرآیند فروریزش پیش بینی می کنند. با ریز تر شدن شبکه به سمت ۱/۵ میلی متر، پاسخ

سه محوری تنش^{۱۱} (نسبت تنش هیدرواستاتیک^{۱۲} به تنش فون مایزر^{۱۳}) و نرخ کرنش^{۱۴} است که مقادیر آن بر اساس نتایج تجربی به دست آمده مطابق با جدول (۴) (جدول مربوط به خواص آسیب)، در نرم افزار تعریف شدند. فرآیند حذف المان های کاملاً آسیب دیده نیز با تعریف مدل تکامل آسیب بر پایه جابجایی شکست معادل، انجام پذیرفت.

با در نظر گرفتن ماهیت غیرخطی مسئله، شامل تغییر شکل های بزرگ، تماس های پیش رونده و رفتار پیچیده مواد، حل کننده مناسب در نرم افزار آباکوس Explicit برای مدل سازی FE انتخاب شد. جهت تعریف برهم کنش ها بین اجزای مختلف ساختار آگزتیک و همچنین سطوح جدار داخلی هسته در هنگام فروریزش، از الگوریتم تماس عمومی با ضریب اصطکاک ۰/۳ بهره گرفته شد (۱۳). در خصوص شبکه بندی، با توجه به هندسه پیچیده ساختار و نیاز به دقت بالا در نمایش رفتار کلی و تغییر شکل های بزرگ، از المان های پیوسته سه بعدی هشت گرهی با انتگرال گیری کاهش یافته (C3D8R)، استفاده گردید. این نوع

بارگذاری مورد ارزیابی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، انرژی جنبشی در تمامی مراحل بارگذاری مقداری بسیار ناچیز داشته و نسبت آن به انرژی داخلی همواره کمتر از پنج درصد است. این موضوع مؤید آن است که تحلیل بدون نیاز به استفاده از مقیاس جرمی، در شرایط شبه‌استاتیکی واقعی انجام شده و ثبات عددی و اعتبار نتایج به‌طور کامل حفظ گردیده است.



شکل ۸- نمایش مش‌بندی نهایی ساختار درون‌سو.

۲-۴- تحلیل منحنی نیرو-جابجایی و رفتار فروپاشی

شکل (۱۱)، نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی عددی سه ساختار مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، هر سه ساختار رفتاری نوسانی با قله‌ها و دره‌های متوالی از خود نشان می‌دهند. این رفتار نوسانی عمدتاً ناشی از ماهیت جدارنازک این ساختارها است که در طول فرآیند فشرده‌سازی، منجر به وقوع کماتش‌های موضعی و الگوی چین‌خوردگی مرحله‌به‌مرحله می‌شود. برخلاف ساختارهای فشرده که فلات تنش یکنواختی ایجاد می‌کنند، این ساختارها به‌دلیل هندسه خاص خود، دچار فروریزش متناوب شده که منجر به نوسانات شدید نیرو می‌گردد. در نهایت، با نزدیک شدن به انتهای فرآیند، افزایش ناگهانی نیرو نشان‌دهنده مرحله تراکم نهایی سازه است.

جهت اطمینان از دقت روش‌شناسی FE، تعریف تماس‌ها و شرایط مرزی، در گام نخست مدل‌سازی با هندسه و ماده الاستومری به‌کاررفته در مقاله مرجع یعنی ماده پلی‌اورتان ترموپلاستیک^{۱۵} پیاده‌سازی شد (۱۳). همان‌گونه که در منحنی تنش بر حسب کرنش مشاهده می‌شود (شکل ۲-ج)، نتایج شبیه‌سازی صحت‌سنجی (منحنی نارنجی) در ناحیه الاستیک، تنش تسلیم اولیه در حدود ۲/۵ تا ۳/۲ مگاپاسکال و رفتار پساتسلیم تا کرنش‌های بالاتر، تطابق و همگرایی بسیار مطلوبی با داده‌های مقاله مرجع (منحنی آبی) نشان می‌دهد که بیانگر اعتبار کامل مدل‌سازی FE است.

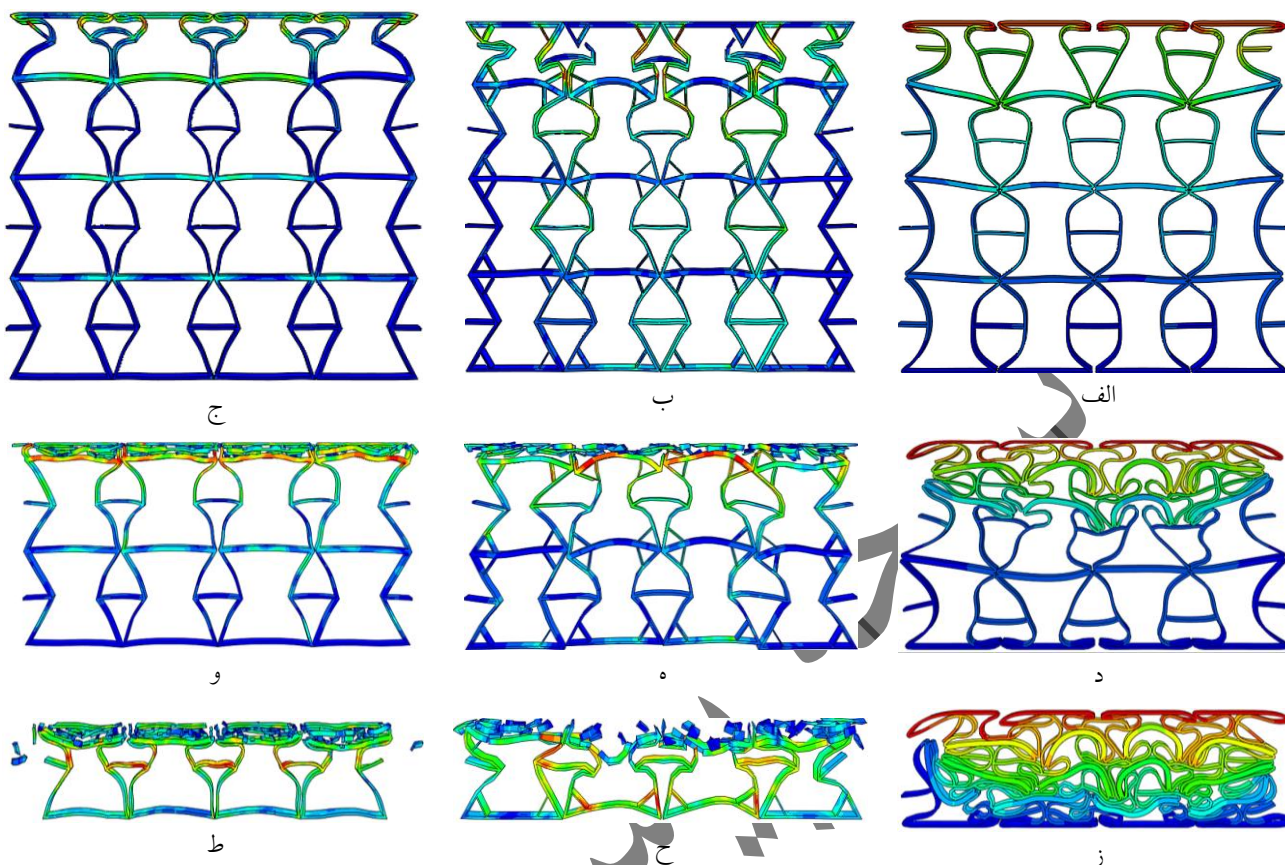
در ادامه، با هدف ارتقای ظرفیت باربری، بهبود جذب انرژی

عدد سازه به‌وضوح همگرا شده و انحراف منحنی‌ها کاهش می‌یابد. در نهایت، با ریزترکردن شبکه از ۱ به ۰/۵ میلی‌متر، تغییرات در مقادیر کلیدی پاسخ (نظیر قله نیرو و انرژی جذب) بسیار ناچیز و کمتر از پنج درصد ثبت شد که نشان‌دهنده دست‌یابی به استقلال کامل نتایج از شبکه در محدوده مش یک میلی‌متر مطابق شکل (۸) است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن توازن میان دقت تحلیل در بازنمایی تغییر شکل‌های بزرگ و کنترل هزینه محاسباتی، اندازه مش نهایی برای تمامی شبیه‌سازی‌های این پژوهش برابر با یک میلی‌متر تعیین گردید.

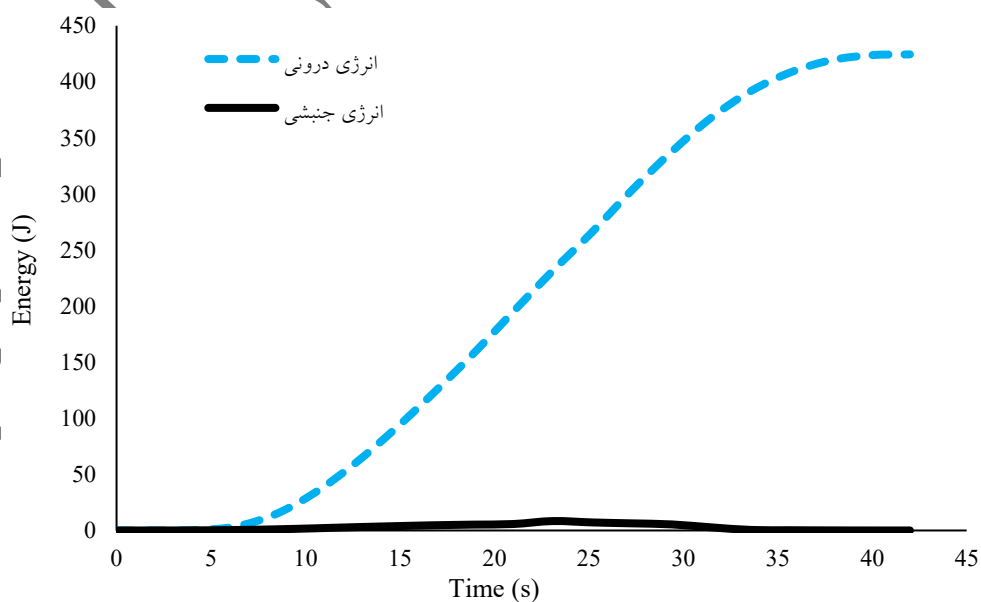
شکل (۹)، روند تغییر شکل سه پیکربندی مختلف ساختار تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی. ستون‌ها از راست به چپ، به‌ترتیب مربوط به درون‌سو، درون‌سو تقویت‌شده و درون‌سو هلالی هستند. ردیف‌ها نیز از بالا به پایین، مراحل آغاز بارگذاری، مرحله میانی و مرحله نهایی/تخریب یا تراکم شدید را نشان می‌دهند. زیر شکل‌ها با حروف فارسی مشخص شده‌اند: (الف)، (ب)، (ج) در ردیف بالا، (د)، (ه)، (و) در ردیف میانی و (ز)، (ح)، (ط) در ردیف پایین.

۲-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

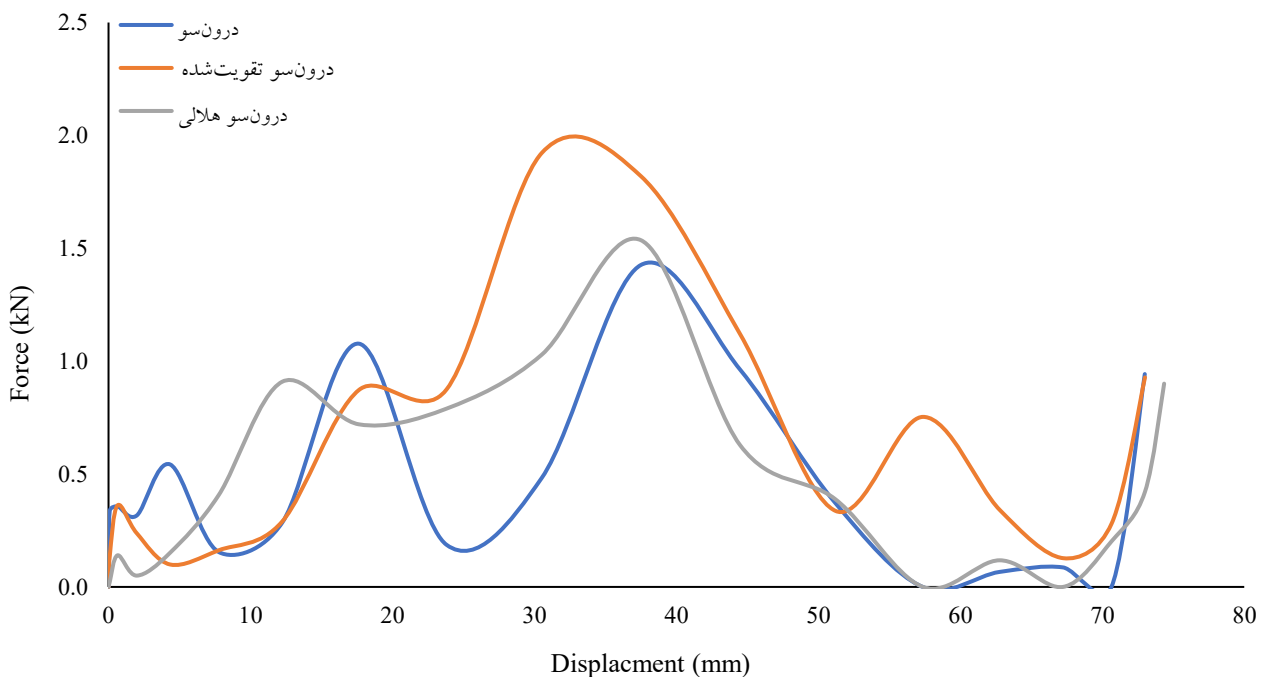
به‌منظور اطمینان از صحت ماهیت شبه‌استاتیکی تحلیل و دقت شبیه‌سازی، نسبت انرژی جنبشی به انرژی داخلی در طول فرآیند



شکل ۹- تحلیل FE و بررسی فرآیند فروریزش ساختار دوبعدی درون سو تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیکی؛ (الف) تا (ط) به ترتیب مراحل تغییر شکل ساختار از شروع بارگذاری تا تراکم کامل را نشان می دهند.



شکل ۱۰- نمودار انرژی جنبشی- انرژی درونی.



شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی.

سلول‌های ساختار است. برخلاف ماده TPU که تغییر شکل‌های الاستیک بزرگ و پیوسته را تجربه می‌کند، ماده PLA+ انرژی مکانیکی را از طریق لهیدگی و تغییر شکل پلاستیک سلول‌ها جذب می‌نماید.

• **سهولت ساخت و کاربرد صنعتی:** انتخاب PLA+ علاوه بر بهبود مشخصات مکانیکی، فرآیندپذیری آسان‌تر، پایداری ابعادی بسیار بهتر در چاپ و صرفه اقتصادی بالاتری را نسبت به فیلامنت‌های انعطاف‌پذیر در ساخت سازه‌های جاذب انرژی فراهم می‌سازد.

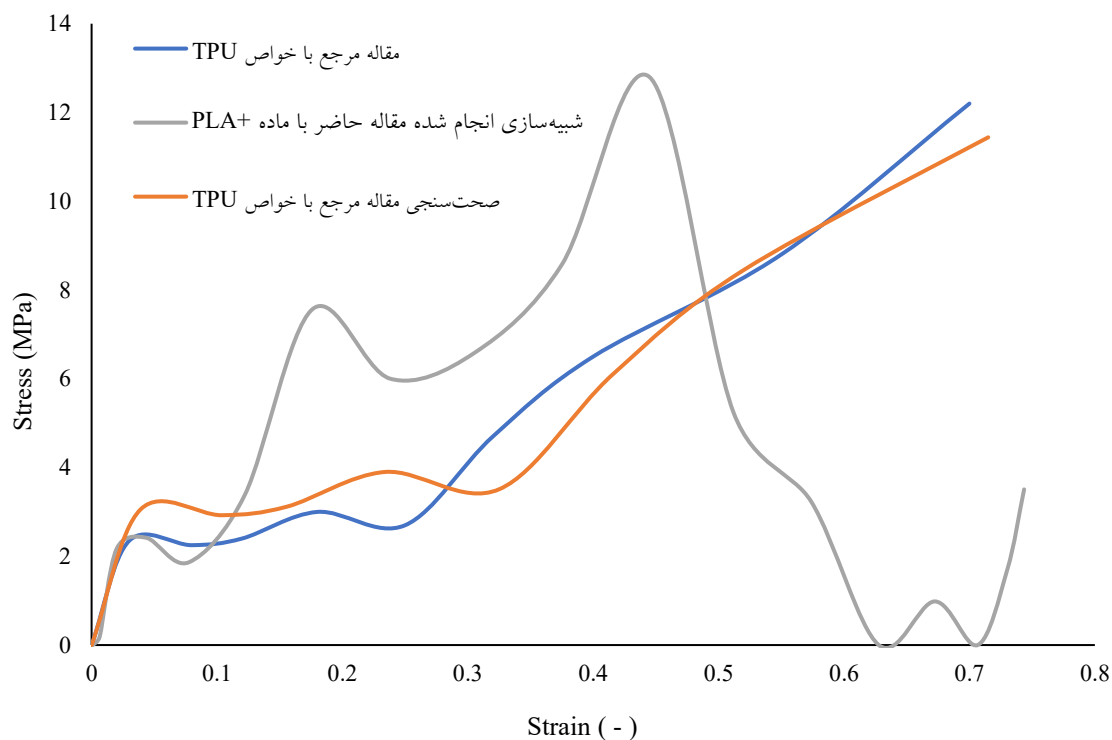
۲-۵- محاسبه جذب انرژی

ساختارها وظیفه اصلی جاذب‌های انرژی، کاهش انتقال نیروهای مخرب به اجزای ساختاری یا تجهیزات حساس است. به‌طور کلی، پاسخ تنش-کرنش چنین موادی را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم کرد: ناحیه الاستیک خطی، منطقه فلات و منطقه متراکم‌شدن. کل انرژی جذب‌شده در طول فرآیند خردکردن یا فشرده‌سازی با ادغام ناحیه زیر منحنی نیرو-جابجایی تا شروع

ویژه و همچنین تسهیل فرآیند ساخت بر پایه فناوری چاپ سه‌بعدی متداول، ماده ترموپلاستیک زیست‌سازگار PLA+ (با خواص پلاستیک تجربی مستخرج از جدول ۲)، جایگزین ماده انعطاف‌پذیر TPU شد. رفتار مکانیکی ساختار حاصل (منحنی سبز)، تفاوت‌های بنیادین و مزایای مشخصی را نسبت به مدل پایه نشان می‌دهد:

• **افزایش چشمگیر استحکام و ظرفیت باربری:** سختی و استحکام تسلیم بالاتر ماده PLA+، سبب شده است که منحنی در کرنش‌های میانی (ناحیه کرنش ۰/۳۵ تا ۰/۵) وارد یک فاز سختی‌پذیری شدید با قله تنش بسیار بالا یعنی حدود ۱۲/۸ مگاپاسکال گردد؛ این درحالی است که سازه مرجع با جنس TPU به دلیل انعطاف‌پذیری بالا، تنها به تنش حدود هفت مگاپاسکال در این کرنش دست می‌یابد. مطابق شکل (۱۲-د) نشان‌دهنده افزایش بیش از ۸۰ درصدی بیشینه تنش در این ناحیه است.

• **پدیده کماتش موضعی و سازوکار تغییر شکل متوالی:** افت تنش پس از کرنش ۰/۴۵ و نوسانات مشاهده‌شده در فاز پلاتو، ناشی از کماتش موضعی کنترل‌شده و فروریزش ردیف‌به‌ردیف



شکل ۱۲- صحت سنجی نمودار مقاله مرجع و مقایسه نمودار شبیه سازی شده در مقاله با نمودار صحت سنجی شده مقاله.

در نتیجه، معیارهای مختلفی برای تخمین ε_D پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر، روش بهره‌وری انرژی برای تعیین شروع فشردگی، با راندها جذب انرژی که با رابطه (۴) تعریف شده است، استفاده شد (۱۶).

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma(\varepsilon)} \quad (4)$$

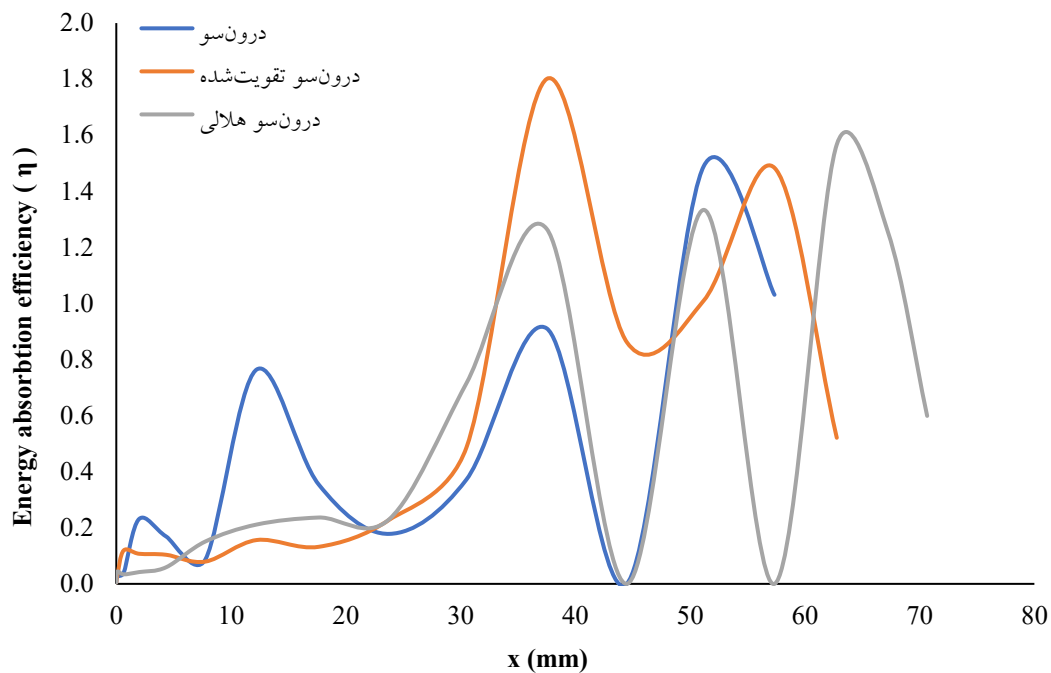
در این فرمول، $\eta(\varepsilon)$ بازده جذب انرژی، $\sigma(\varepsilon)$ نشان‌دهنده تنش آنی و ε کرنش فشاری است. پس از محاسبه راندها جذب انرژی، منحنی رسم می‌شود. کرنش مربوط به حداکثر بازده جذب انرژی به عنوان کرنش چگالی، ε_D در نظر گرفته می‌شود. انرژی جذب شده در واحد حجم که به عنوان جذب انرژی خاص جذب انرژی ویژه بر پایه جرم (رابطه ۵) نشان داده می‌شود، معمولاً برای ارزیابی و مقایسه عملکرد جذب انرژی مواد مختلف و پیکربندی‌های ساختاری استفاده می‌شود.

$$SEA_m = \frac{EA}{M} \quad (5)$$

فشردگی کرنش، همان‌طور که در رابطه (۳) بیان شده است، اندازه‌گیری می‌شود.

$$EA = \int_0^{l_D} F(x) dx = V \int_0^{\varepsilon_D} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

که در آن، EA نشان‌دهنده انرژی جذب شده است، $f(x)$ و x و l_D ، به ترتیب نیروی فشاری، جابجایی و طول فشردگی اعمال می‌شوند. نمادهای $\sigma(\varepsilon)$ و ε ، نشان‌دهنده تنش و کرنش فشاری هستند و ε_D نشان‌دهنده کرنشی است که در آن ناحیه تراکم شروع می‌شود. در مواد فلزی، پس از مرحله الاستیک اولیه، یک منطقه فلات معمولاً ظاهر می‌شود که در آن فروپاشی پیشرونده تحت یک بار تقریباً ثابت رخ می‌دهد. پس از آن، ناحیه تراکم ایجاد می‌شود، جایی که فشرده‌سازی مداوم منجر به افزایش سریع تنش به دلیل فشردگی مواد می‌شود. شناسایی شروع تراکم در مواد غیرفلزی، مانند پلیمرها یا شبکه‌های سلولی، چالش برانگیز است؛ زیرا منحنی‌های نیرو-جابجایی، اغلب قله‌های متعددی را در ناحیه فلات نشان می‌دهند که ممکن است کاملاً مسطح نباشند.



شکل ۱۳- راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده دوبعدی.

میانگین نیروی خردکننده^{۱۶}، به عنوان کل انرژی جذب شده جذب انرژی تقسیم بر جابجایی خردکننده (رابطه ۶) مربوطه (d) تعریف می‌شود. این پارامتر به عنوان یک معیار مهم برای ارزیابی توزیع بار در طول فرآیند تغییر شکل عمل می‌کند و راهنمایی ارزشمندی را برای بهینه‌سازی و طراحی سازه‌های جذب انرژی ارائه می‌دهد (۱۷).

نیرو-جابجایی است. شکل (۱۳)، بازده جذب انرژی را به عنوان تابعی از جابجایی برای ساختار درون‌سو، بر اساس آزمون فشرده‌سازی شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقیق کارایی ساختارهای طراحی شده تحت بارگذاری دینامیکی، شاخص انرژی جذب شده ویژه^{۱۹}، به عنوان معیار اصلی مقایسه انتخاب شده است. با توجه به تفاوت در پیکربندی‌های هندسی و به تبع آن تغییرات در جرم نمونه‌ها، استفاده از SEA امکان سنجش عملکرد انرژی گیر ساختارها را فارغ از اثرات جرمی فراهم می‌آورد. در این پژوهش، ساختار بهینه بر اساس بالاترین مقدار SEA شناسایی می‌شود تا کارآمدترین پیکربندی هندسی برای مدیریت انرژی ضربه تعیین گردد (۱۷).

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۱)، منحنی راندمان جذب انرژی برای هر سه ساختار رفتار نوسانی و غیریکنواختی را نشان می‌دهد که ناشی از کماتش موضعی، تاخوردگی^{۲۰} پیشرونده و انتقال مرحله‌ای بار در سازه‌های جدارنازک است. با این حال، ساختار درون‌سو هلالی در بازه جابه‌جایی گسترده‌تری راندمان جذب انرژی را حفظ می‌کند، درحالی‌که ساختار درون‌سو

راندمان نیروی خردکننده^{۱۷}، به عنوان نسبت نیروی خردکننده متوسط MCF به نیروی خردکننده قله تعریف می‌شود و می‌توان آن را بر اساس رابطه (۷) محاسبه کرد. برای یک جاذب انرژی ایده‌آل، حداکثر مقدار CFE است. این پارامتر اندازه‌گیری مستقیمی از اثربخشی جاذب در اتلاف یکنواخت نیروها و به حداقل رساندن نوسانات نیرو در طول فرآیند تغییر شکل ارائه می‌دهد (۱۶).

$$MCF = \frac{EA}{d} \quad (۶)$$

راندمان نیروی خردکننده^{۱۷}، به عنوان نسبت نیروی خردکننده متوسط MCF به نیروی خردکننده قله تعریف می‌شود و می‌توان آن را بر اساس رابطه (۷) محاسبه کرد. برای یک جاذب انرژی ایده‌آل، حداکثر مقدار CFE است. این پارامتر اندازه‌گیری مستقیمی از اثربخشی جاذب در اتلاف یکنواخت نیروها و به حداقل رساندن نوسانات نیرو در طول فرآیند تغییر شکل ارائه می‌دهد (۱۶).

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \times 100 \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، تقسیم MCF بر نیروی بیشینه خردشدگی^{۱۸}، نشان‌دهنده بالاترین نیروی تجربه شده قبل از شروع خردشدن در

جدول ۵- مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی به دست آمده ساختار دوبعدی

دوبعدی	جرم (g)	جذب انرژی (kJ)	جذب انرژی ویژه (kJ/m ³)	نیروی متوسط خردشدگی (N)	راندمان نیروی خردشدگی (-)	بیشترین نیروی خردشدگی (N)
درون سو پایه	۴/۵۶	۱۶/۵	۰/۹	۳۲	۰/۲۲۵	۱۴۲۵/۶
درون سو هلالی	۵/۱۷	۱۹/۶	۱/۱	۳۸	۰/۲۴۷	۱۵۳۵/۶
درون سو تقویت شده	۴/۶۵	۲۵/۶	۱/۳	۴۵	۰/۲۳۴	۱۹۲۲/۴

SEA در نظر گرفته شود.

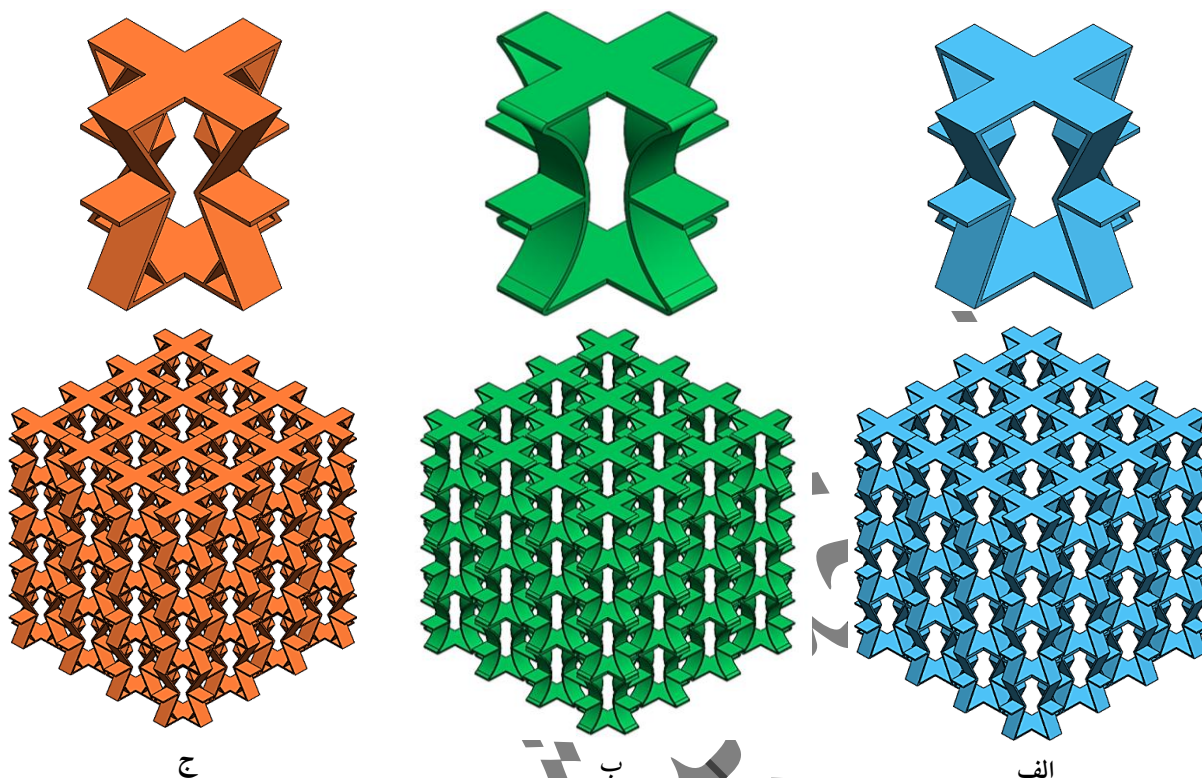
با تقسیم EA بر جرم، جذب انرژی ویژه بر پایه جرم محاسبه خواهد شد. طبق طراحی انجام شده، جرم ساختار نوآورانه درون سو پایه ۴/۵۶ جرم ساختار درون سو هلالی ۵/۱۷ گرم ساختار درون سو تقویت شده ۴/۶۵ گرم است.

۶-۲- نوآوری هندسی

نوآوری اصلی پژوهش حاضر بر ایجاد تغییرات هدفمند در هندسه هر سه ساختار مورد مطالعه استوار است؛ به گونه‌ای که ضمن حفظ ماهیت اصلی ساختارهای درون سو، آرایش هندسی آن‌ها از حالت دوبعدی به پیکربندی‌های سه‌بعدی توسعه یافته است. این رویکرد، همسو با گسترش استفاده از ساختارهای سه‌بعدی در پژوهش‌های اخیر، با هدف توسعه دامنه کاربرد این دسته از ساختارها ارائه شده است. در این راستا، بدون تغییر در ابعاد و اندازه کلی ساختارها، اجزای سازه‌ای به گونه‌ای بازآرایی شده‌اند که ساختارهای درون سو در داخل یکدیگر قرار گرفته و در نواحی میانی دارای اشتراک هندسی و سازه‌ای باشند. انتظار می‌رود این پیکربندی، علاوه بر افزایش پیچیدگی هندسی، از طریق افزایش اثر متقابل میان اجزا و ایجاد مسیرهای انتقال بار بیشتر، بر نحوه توزیع تنش، الگوی تغییر شکل و عملکرد باربری ساختار اثرگذار باشد. با این حال، ارزیابی دقیق میزان این اثرگذاری بر اساس نتایج کمی و کیفی حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی انجام می‌شود. در همین راستا، مقایسه پاسخ سازه‌های دوبعدی و سه‌بعدی از نظر توزیع تنش، نیروی خردشدگی، بیشینه نیروی خردشدگی و شاخص‌های جذب انرژی در بخش نتایج و

تقویت شده بیشترین مقدار قله موضعی راندمان جابه‌جایی ۳۸ میلی‌متر نشان می‌دهد. از سوی دیگر، ساختار درون سو پایه نوسانات بیشتری داشته و افت راندمان در مراحل میانی بارگذاری در آن محسوس‌تر است. این نتایج بیانگر آن است که اصلاح هندسی و اعمال تقویت‌کننده‌ها، علاوه بر افزایش ظرفیت جذب انرژی، بر نحوه توزیع و پایداری فرآیند جذب انرژی نیز اثر قابل توجهی دارد. در همین راستا، جدول (۵) پارامترهای مختلف مربوط به جذب انرژی که از نتایج شبیه‌سازی استخراج شده‌اند را ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل، مقدار جذب انرژی ویژه برای نمونه‌های مورد بررسی به ترتیب برای ساختار درون سو پایه، درون سو هلالی و درون سو تقویت شده برابر با ۰/۹، ۱/۱ و ۱/۳ کیلوژول بر مترمکعب به دست آمده است. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که ساختار درون سو تقویت شده نسبت به نمونه پایه، بیش از ۴۴ درصد بهبود در عملکرد جذب انرژی را نشان می‌دهد که بیانگر تأثیر قابل توجه اصلاحات هندسی و تقویتی اعمال شده در این ساختار است.

همچنین، برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد خردشدگی، پارامترهای PCF و MCF نیز از منحنی‌های نیرو-جابجایی استخراج شدند. نتایج نشان داد که PCF و MCF در ساختارهای مورد بررسی یکسان نیستند؛ به گونه‌ای که PCF عمدتاً در مرحله آغازین تغییر شکل و در اثر شروع کماتش موضعی ایجاد می‌شود، در حالی که MCF بیانگر سطح نیروی پایدار در طول فرآیند خردشدگی است. از این رو، ارزیابی عملکرد سازه تنها بر اساس قله اولیه نیرو کافی نبوده و نسبت MCF/PCF یا راندمان نیروی خردشدگی CFE نیز باید به عنوان یک شاخص مکمل در کنار

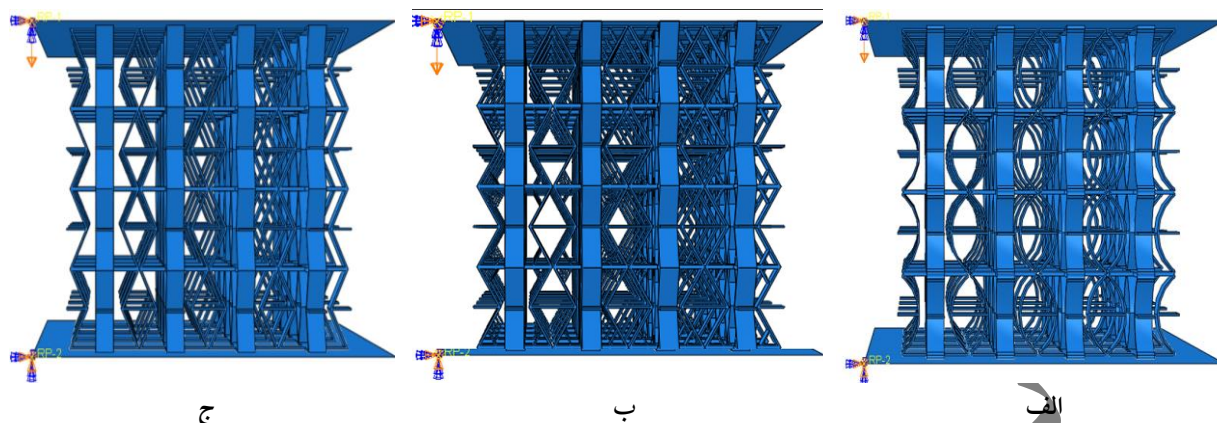


شکل ۱۴- مدل سازی هندسی تک سلول و شبکه های سه بعدی درون سو؛ (الف) ساختار درون سوی پایه، (ب) ساختار درون سوی هلالی، و (ج) ساختار درون سوی تقویت شده.

به صورت تجربی تأیید شده است. تنها تفاوت قابل ملاحظه در فرآیند مدل سازی، به افزایش ابعاد هندسی و گسترش مدل از حالت دوبعدی به سه بعدی بازمی گردد. این تحول هندسی، به طور طبیعی منجر به افزایش تعداد المان ها و پیچیدگی هندسه مدل سه بعدی شده است. با این وجود، اصول کلی شبیه سازی، اعم از مراحل ایجاد مدل هندسی، تعریف خواص مصالح، اعمال شرایط مرزی، اعمال بارگذاری و انجام تحلیل عددی، در هر دو حالت دوبعدی و سه بعدی به صورت مشابه و بر اساس یک چارچوب یکسان پیاده سازی شده است. برای نمایش بصری این هم خوانی در فرآیند مدل سازی، شکل (۱۵) خلاصه ای از مراحل و نحوه شبیه سازی را ارائه می دهد که شباهت رویکرد به کاررفته در مدل های دوبعدی و سه بعدی را به وضوح نشان می دهد. این یکسان سازی در روش تحلیل، امکان ارزیابی دقیق تر و مؤثرتر تأثیرات تغییرات هندسی ناشی از تبدیل ساختار از حالت دوبعدی به سه بعدی را فراهم می آورد و همچنین مطابقت شبیه سازی بر

بحث ارائه شده است. مطابق شکل (۱۴)، نحوه قرارگیری ساختارها در درون یکدیگر و نواحی اشتراک ایجاد شده در بخش میانی، مبنای هندسی این توسعه از حالت دوبعدی به سه بعدی را به وضوح نشان می دهد.

در ادامه این پژوهش، فرآیند شبیه سازی عددی ساختارهای سه بعدی که هندسه آن ها پیش تر در شکل (۱۳) معرفی شد، مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد. رویکرد شبیه سازی این ساختارهای نوین، بر همان چارچوب تحلیلی و شرایطی استوار است که پیش تر برای ساختارهای دوبعدی در بخش نخست مقاله به کار گرفته شده بود. به منظور ایجاد امکان مقایسه دقیق و معنادار میان نتایج حاصل از هر دو دسته از مدل ها، تمامی پارامترهای اصلی مدل سازی، شامل شرایط مرزی، نوع بارگذاری و روش تحلیل، به صورت یکسان در نظر گرفته شده اند. روش شبیه سازی و تنظیمات تحلیل بر پایه متدولوژی معتبر ارائه شده در مرجع (۱۳) انتخاب گردید که صحت آن برای ساختارهای جدارنازک مشابه



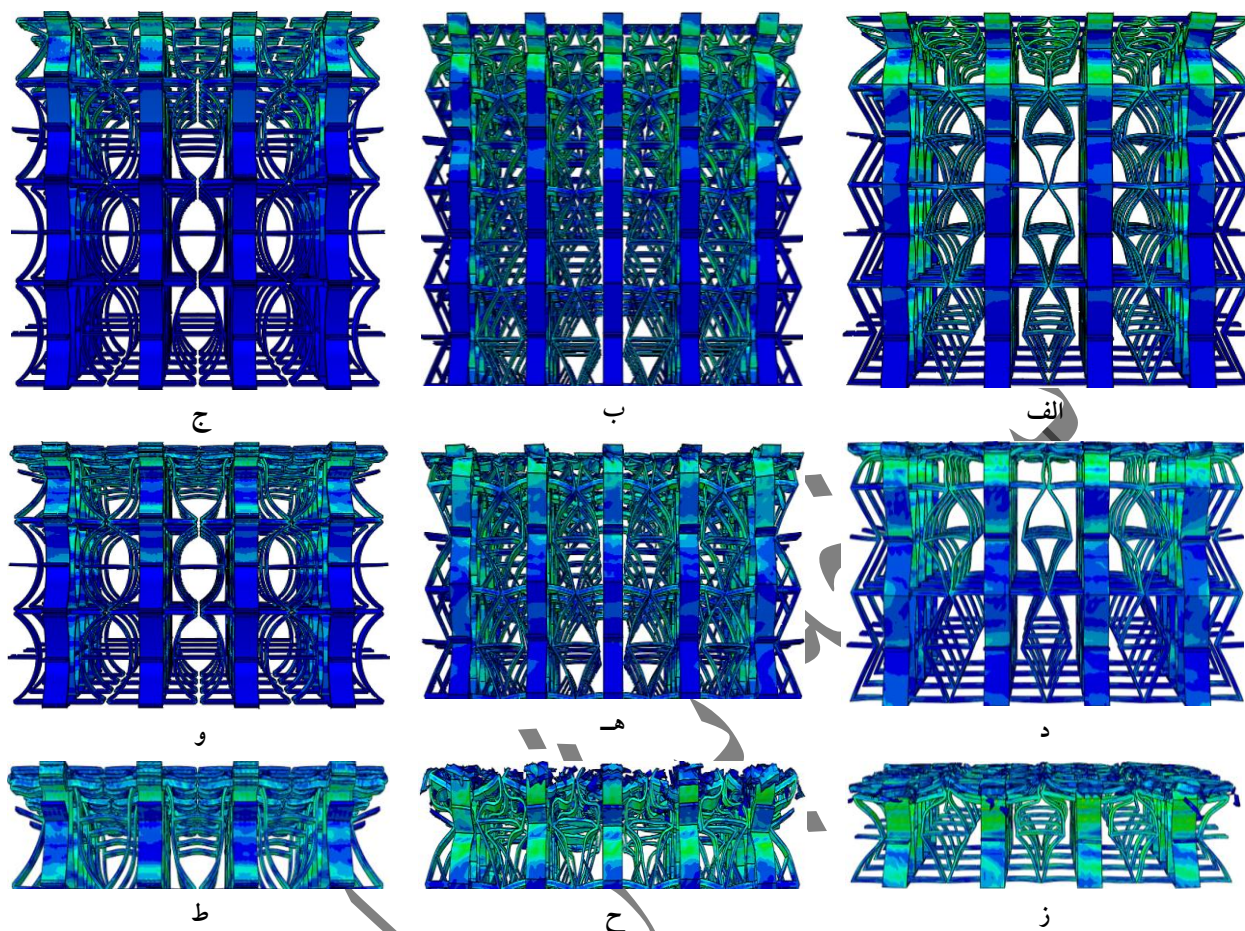
شکل ۱۵- شبیه سازی FE هر سه ساختار سه بعدی درون سو توسط نرم افزار آباکوس (الف) ساختار درون سوی هلالی، (ب) ساختار درون سوی تقویت شده، (ج) ساختار درون سوی پایه.

می شود. در واقع، ضخامت کم جداره ها سبب می شود که ساختار به جای تحمل یکنواخت بار، به صورت مرحله ای دچار افت موضعی سختی شود و پس از هر ناپایداری، مسیر جدیدی برای انتقال بار شکل گیرد. همین سازوکار، عامل اصلی رفتار نوسانی و افت و خیزهای محسوس در نمودارهای نیرو-جابجایی است؛ زیرا هر بار با تشکیل یک ناحیه کمانش کرده یا یک تاخوردگی موضعی جدید، مقاومت سازه به طور لحظه ای کاهش یافته و سپس با درگیر شدن نواحی دیگر، مجدداً افزایش نسبی پیدا می کند. در مرحله نهایی که در زیرشکل های (ز)، (ح) و (ط) دیده می شود، گسترش این ناپایداری های موضعی به فروریزش پیشرونده، درهم رفتگی سلول ها، تاخوردگی متوالی دیوارها و در نهایت تراکم شدید ساختار منجر می شود؛ بنابراین، می توان بیان کرد که ماهیت جدارنازک ساختارها و ضخامت محدود دیوارها، نقش اساسی در بروز کمانش های متعدد، ناپایداری موضعی گسترده و پاسخ نوسانی نمودارهای مکانیکی ایفا می کند. همچنین مقایسه سه پیکربندی نشان می دهد که تغییر در هندسه داخلی و نوع تقویت، می تواند محل آغاز کمانش، نحوه گسترش تاخوردگی ها و میزان پایداری کلی ساختار را به طور مستقیم تحت تأثیر قرار دهد.

بر اساس شبیه سازی های انجام شده، پارامترهای کلیدی رفتاری ساختارهای سه بعدی استخراج و مورد ارزیابی قرار

اساس منع معتبر (۱۳) که صحت سنجی بر پایه مقایسه با مدل تجربی انجام شده است.

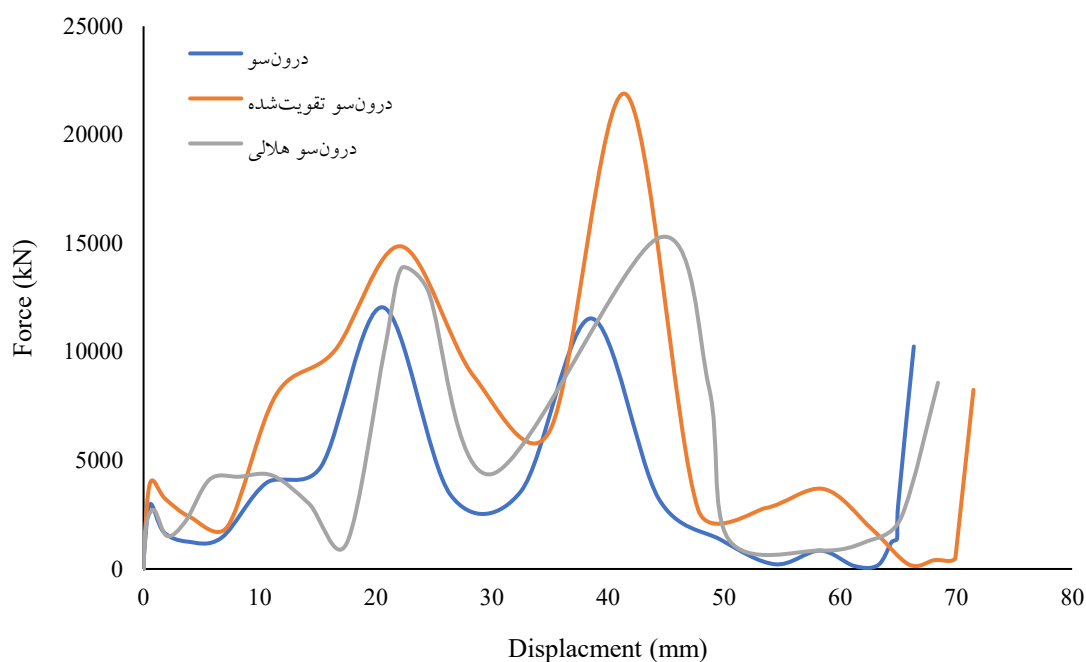
در این بخش، رفتار فشاری ساختارهای سه بعدی بر پایه نتایج شبیه سازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفت تا نحوه تغییر شکل، آغاز ناپایداری و روند فروریزش آن ها تحت بارگذاری شبه الاستیک به دقت بررسی شود. شکل (۱۶)، توالی تغییر شکل سه پیکربندی مختلف را در مراحل مختلف بارگذاری نشان می دهد؛ به گونه ای که ستون ها از راست به چپ، به ترتیب مربوط به ساختارهای درون سو، درون سو تقویت شده و درون سو هلالی بوده و ردیف ها از بالا به پایین، مرحله آغاز بارگذاری، مرحله میانی و مرحله نهایی تخریب یا تراکم شدید را نمایش می دهند. در ردیف نخست، شامل زیرشکل های (الف)، (ب) و (ج)، ساختارها هنوز بخش عمده ای از هندسه اولیه خود را حفظ کرده اند و تغییر شکل ها محدود و عمدتاً الاستیک یا در مراحل اولیه پاسخ هستند. با این حال، به دلیل جدارنازک بودن اعضا و پایین بودن نسبت ضخامت به ابعاد مؤثر، این ساختارها از همان مراحل ابتدایی مستعد بروز ناپایداری های موضعی هستند. با افزایش جابه جایی و ورود به مرحله میانی بارگذاری، مطابق زیرشکل های (د)، (ه) و (و)، کمانش موضعی در دیوارها و اعضای نازک به تدریج آغاز شده و به صورت خم شدگی، شکم دادگی و تاخوردگی موضعی در نواحی بحرانی ظاهر



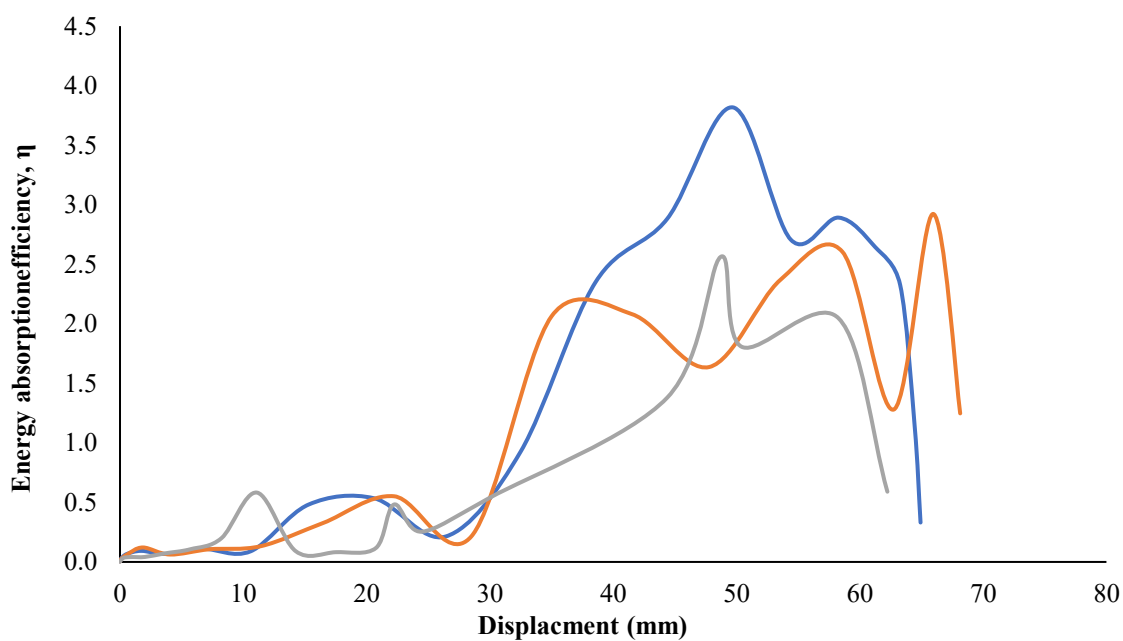
شکل ۱۶- روند تغییر شکل و توزیع تنش فونمایز در ساختارهای سه بعدی درون سو تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیک؛ (الف تا ج) پیکربندی اولیه و توزیع تنش معادل در ساختارهای پایه، هلالی و تقویت شده؛ (د تا و) مراحل میانی تغییر شکل، کماتش و خمیدگی اعضای داخلی؛ (ز تا ط) فروریزش نهایی، تماس دیواره ها و تراکم ساختارها.

انتهای جابه جایی (بیش از ۶۵ میلی متر) بیانگر شروع پدیده تراکم و برخورد دیواره های داخلی ساختار است. در تکمیل این تحلیل، شکل (۱۸) راندمان جذب انرژی را نمایش می دهد. همان طور که ملاحظه می شود، راندمان جذب انرژی در تمامی مدل ها با افزایش جابه جایی روندی صعودی داشته و قله های راندمان دقیقاً با مراحل پایداری و فروریزش سلولی در نمودار نیرو منطبق هستند. این امر نشان می دهد که ساختارهای طراحی شده، به ویژه مدل تقویت شده، پایداری مناسبی در نرخ جذب انرژی در طول فرآیند تغییر شکل از خود نشان می دهند. این تحلیل ها امکان مقایسه دقیق عملکرد سازه ای مدل های مختلف را فراهم آورده و تایید می کند که تغییرات هندسی و افزودن تقویت کننده ها، منجر به بهبود

گرفتند. در این راستا، نمودارهای نیرو-جابه جایی (شکل ۱۷) و راندمان-جابه جایی (شکل ۱۸)، به عنوان شاخص های اصلی برای تحلیل پاسخ مکانیکی و کارایی سازه ارائه شده اند. مطابق با شکل (۱۷)، منحنی های نیرو-جابه جایی برای سه ساختار درون سو، درون سو تقویت شده و درون سو هلالی، رفتاری نوسانی و مرحله ای را نشان می دهند. مشاهده می شود که ساختار درون سو تقویت شده (منحنی نارنجی)، دارای بیشترین مقدار نیروی بیشینه در ۲۲ کیلو نیوتن است که نشان دهنده سختی و مقاومت بالاتر این هندسه نسبت به سایر مدل ها است. نوسانات نیرو در هر سه مدل ناشی از کماتش های موضعی متوالی و فروریزش ردیف به ردیف سلول ها در فضای سه بعدی است. همچنین، صعود نهایی نیرو در



شکل ۱۷- نمودار نیرو-جابجایی ساختارهای سه بعدی.



شکل ۱۸- راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده سه بعدی.

۳- نتایج و بحث

قابل توجه ظرفیت باربری و پایداری فرایند جذب انرژی در

ساختارهای سه بعدی شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۱۶) و جدول (۶)، نمونه

درون سو تقویت شده، مشابه مدل‌های دوبعدی مورد بررسی،

جدول ۶- مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی به دست آمده ساختار سه بعدی

سهبعدی	جرم (g)	جذب انرژی (kJ)	جذب انرژی ویژه (kJ/m ³)	نیروی متوسط خردشدگی (N)	راندمان نیروی خردشدگی (-)	بیشترین نیروی خردشدگی (N)
درون سو پایه	۳۵/۷۴	۴۱/۸	۲/۴	۰/۵۹	۰/۰۴۹	۱۲۰۵۰/۱
درون سو هلالی	۳۹/۳۸	۵۶/۲	۳/۴	۱/۰۴	۰/۰۴۸	۲۱۸۱۸
درون سو تقویت شده	۳۵/۱۹	۷۶/۲	۴	۰/۹۳	۰/۰۶۱	۱۵۲۴۶/۹

شکل (۱۵)، ناشی از تفاوت در نحوه انتقال نیرو، مسیرهای باربری محدودتر و کارایی کمتر در توزیع تنش ها، در مقایسه با ساختار شبکه تقویت شده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی ساختارهای درون سو در دو حالت دوبعدی و سه بعدی بررسی شد و اثر دو راهبرد اصلاح هندسی شامل جایگزینی گوشه های تیز با قوس های هلالی و افزودن اعضای تقویتی داخلی بر پاسخ سازه ای، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این اصلاحات، بدون تغییر اساسی در ماهیت کلی رفتار سازه، می توانند نقش مؤثری در بهبود عملکرد جذب انرژی ایفا کنند. رفتار این ساختارها به شدت تحت تأثیر ماهیت جدارنازک آنها بوده و سازوکار جذب انرژی عمدتاً از طریق کمانش موضعی، تاخوردگی و فروپاشی تدریجی سلول ها شکل می گیرد. در این میان، اصلاحات هندسی شامل حذف گوشه های تیز و افزودن اعضای تقویتی، بدون تغییر اساسی در الگوی کلی پاسخ، موجب بهبود قابل توجه ظرفیت جذب انرژی شدند؛ به طوری که بیشترین عملکرد مربوط به مدل تقویت شده، به ویژه در ساختارهای سه بعدی، بود.

- در ساختارهای دوبعدی، مقدار جذب انرژی ویژه در مدل هلالی و مدل تقویت شده، به ترتیب حدود ۲۲ و ۴۴ درصد نسبت به مدل پایه افزایش یافت.
- در ساختارهای سه بعدی، این بهبود برای مدل هلالی و مدل تقویت شده، به ترتیب حدود ۴۱ و ۶۶ درصد به دست آمد.

بهترین عملکرد را از نظر جذب انرژی در میان تمامی نمونه ها از خود نشان داده است. این نمونه در مقایسه با نمونه پایه و نمونه هلالی، به ترتیب حدود ۸۲ درصد و ۳۵ درصد افزایش در ظرفیت جذب انرژی را تجربه کرده است که بیانگر تأثیر قابل توجه الگوی تقویت بر بهبود رفتار سازه ای نمونه می باشد. مستندات مکانیکی این بهبود رفتار را می توان به وضوح در کانتورهای تنش و الگوهای خرابی ارائه شده در شکل (۱۵) جستجو کرد. همان گونه که در تصاویر این شکل مشاهده می شود، در نمونه های پایه و هلالی، تنش ها به شدت در نواحی لولاهای پلاستیک اولیه متمرکز شده و منجر به فروپاشی موضعی زود هنگام می شوند. در مقابل، در نمونه درون سو تقویت شده ستون میانی شکل (۱۶-ب)، (۱۶-ه) و (۱۶-ج)، توزیع تنش در حجم بزرگتری از ساختار و در امتداد صفحات تقویتی داخلی صورت گرفته است. این توزیع یکنواخت تر بار و درگیر شدن اعضای تقویت کننده داخلی، مانع از تمرکز تنش شدید موضعی شده و سازوکار تغییر شکل پلاستیک را از حالت فروپاشی ناگهانی ردیفی به یک تغییر شکل پیش رونده، پایدار و گسترده در کل ساختار تبدیل کرده است. این سازوکار فیزیکی به نوبه خود امکان تحمل نیروهای بالاتر در طول فرآیند له شدگی را فراهم آورده و نقش مؤثری در افزایش چشمگیر ظرفیت جذب انرژی ایفا کرده است. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که نمونه هلالی نیز نسبت به نمونه پایه عملکرد بهتری داشته و توانسته است حدود ۳۴ درصد افزایش جذب انرژی را نسبت به نمونه پایه ثبت کند. هر چند این میزان بهبود قابل توجه است، اما در مقایسه با نمونه درون سو تقویت شده، عملکرد ضعیف تری داشته که طبق کانتورهای تنش

همکاری و پشتیبانی فنی ارزشمندشان در انجام این پژوهش اعلام می‌دارند.

تضاد منافع

مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافع با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

سهم نویسندگان

عرفان طاهرخانی: جمع‌آوری داده‌ها، اعتبارسنجی نتایج، مدیریت منابع، راهنمایی پروژه. **محمد رضا پارساییان:** جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله. **اشکان مسیبی:** جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نوشتن مقاله. **مهدی مردانی:** طراحی و ایده‌پردازی مطالعه. **روح‌الله پناهی لیاولی:** طراحی و ایده‌پردازی مطالعه.

• نتایج نشان داد که اصلاحات هندسی اعمال‌شده، اگرچه الگوی کلی پاسخ مکانیکی سازه را تغییر ندادند، اما موجب افزایش معنادار ظرفیت جذب انرژی شدند.

• در میان ساختارهای بررسی‌شده، مدل تقویت‌شده بهترین عملکرد را از نظر جذب انرژی ویژه نشان داد.

• مقایسه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، بیانگر آن بود که اثر اصلاحات هندسی در حالت سه‌بعدی چشمگیرتر بوده و توزیع مناسب‌تر تنش و تأخیر در شکست موضعی را به همراه دارد.

• بر این اساس، ترکیب هم‌زمان حذف گوشه‌های تیز و تقویت موضعی سازه می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب برای بهینه‌سازی بیشتر این نوع ساختارها در پژوهش‌های آینده مطرح شود.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از شرکت نظم‌آوران به‌خاطر

واژه‌نامه

1. auxetic cellular structures
2. negative Poisson's ratio
3. re-entrant structures
4. energy absorption
5. mechanical behavior
6. finite element (FE)
7. polylactic acid (PLA)
8. fillet
9. part
10. fracture strain

11. stress triaxiality
12. hydrostatic stress
13. Von Mises stress
14. strain rate
15. thermoplastic polyurethane (TPU)
16. mean crushing force (MCF)
17. crush force efficiency (CFE)
18. peak crushing force (PCF)
19. specific energy absorption (SEA)
20. fold

مراجع

1. Schneider J, Kumar S. Comparative performance evaluation of microarchitected lattices processed via SLS, MJ, and DLP 3D printing methods: Experimental investigation and modelling. *J Mater Res Technol.* 2023;26:7182-98. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.061>
2. Yang L, Harrysson O, West H, Cormier D. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *Int J Solids Struct.* 2015;69-70:475-90. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.05.005>
3. Khaghani O, Mostofinejad D, Abtahi SM. Auxetic structures in civil engineering applications:

Experimental (by 3D printing) and numerical investigation of mechanical behavior. *Results Mater.* 2024;21:100528.

<https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100528>

4. Roberjot P, Herder JL. A unified design method for 2D auxetic metamaterials based on a minimal auxetic structure. *Int J Solids Struct.* 2024;295:112777. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.112777>
5. Montgomery-Liljeroth E, Schievano S, Burriesci G. Elastic properties of 2D auxetic honeycomb structures: A review. *Appl Mater Today* 2023;30:101722. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101722>

6. Alomarah A, Ruan D, Masood S, Sbarski I, Faisal B. An investigation of in-plane tensile properties of re-entrant chiral auxetic structure. *Int J Adv Manuf Technol.* 2018;96:2013-29. <http://hdl.handle.net/1959.3/442356>
7. Shirzad M, Bodaghi M, Oh D, Yi M, Nam SY. Design and optimization of bioinspired auxetic structure for biomedical applications. *Eur J Mech A Solids* 2024;103:105139. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105139>
8. Carakapurwa FE, Santosa SP. Design optimization of auxetic structure for crashworthy pouch battery protection using machine learning method. *Energies* 2022;15:8404. <https://doi.org/10.3390/en15228404>
9. Mauko A, Fíla T, Falta J, Koudelka P, Rada V, Neuhäuserová M, et al. Dynamic deformation behaviour of chiral auxetic lattices at low and high strain rates. *Metals* 2021;11:52. <https://doi.org/10.3390/met11010052>
10. Liu Y, Zhao C, Xu C, Ren J, Zhong J. Auxetic metamaterials and their engineering applications: A review. *Eng Res Express* 2023;5:042003. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad0eb1>
11. Etemadi E, Zamani AM, Scarpa F, Zeeshan M, Hosseinabadi M, Hu H. Modified re-entrant auxetic metamaterials with energy absorption enhancement. *Mater Today Commun.* 2024;108079. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108079>
12. Zawistowski M, Poteralski A. Parametric optimization of selected auxetic structures. *Multiscale Multidiscip Model Exp Des.* 2024;4253. <https://doi.org/10.1007/s41939-024-00452-0>
13. Hu Q, Lu G, Tse KM. Compressive and tensile behaviours of 3D hybrid auxetic-honeycomb lattice structures. *Int J Mech Sci.* 2024;263:108767. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108767>
14. Mathew AP, Oksman K, Sain M. Mechanical properties of biodegradable composites from poly lactic acid (PLA) and microcrystalline cellulose (MCC). *J Appl Polym Sci.* 2005;97:2014-25. <https://doi.org/10.1002/app.21779>
15. Jiang Y, Liu Z, Matsuhisa N, Qi D, Leow WR, Yang H, et al. Auxetic mechanical metamaterials to enhance sensitivity of stretchable strain sensors. *Adv Mater.* 2018;30:1706589. <https://doi.org/10.1002/adma.201706589>
16. Seharang A, Azman AH, Abdullah S. A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts. *Adv Mech Eng.* 2020;12(6):1-21. <https://doi.org/10.1177/1687814020916951>
17. Bhat C, Prajapati MJ, Kumar A, Jeng JY. Additive manufacturing-enabled advanced design and process strategies for multi-functional lattice structures. *Materials.* 2024;17(14):3398. <https://doi.org/10.3390/ma17143398>