



MECHANICS OF SMART STRUCTURES

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



Analysis of the Effect of Geometrical Variations on the Energy Absorption Performance of Honeycomb Structures

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Erfan Taherkhani*

Mechanical Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

Mohamad Reza Parsaeiyan

Mechanical Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

Mahdi Mardani

Mechanical Engineering, National University of Skills, Tehran, Iran

*Correspondence

erfan.taherkhani2128@gmail.com

Postal Code: 3481738917

Phone: 02835227733

Article History

Received: 30 Apr 2026

Accepted: 15 Jun 2026

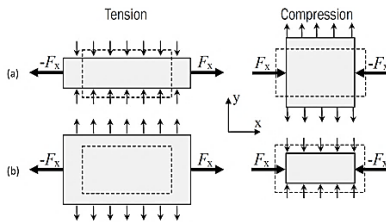
ePublished: 16 Jun 2026

ABSTRACT

Metamaterial structures have attracted significant attention in recent years due to their favorable strength, impact resistance, and high energy-absorption capability. In this study, the structural behavior of an auxetic-inspired honeycomb metamaterial under quasi-static in-plane compression is investigated. First, the mechanical properties of the material were determined through tensile testing of PLA+ specimens fabricated using FDM additive manufacturing. Numerical modeling was then performed in ABAQUS, where a series of geometric modifications were examined under two design strategies: outward modifications and inward modifications. The results indicate that outward modifications lead to reduced energy absorption because they introduce additional stress concentrations and weaken the collapse mechanism. Conversely, inward modifications significantly improve performance by incorporating internal sub-structures that enhance stability and distribute stresses more uniformly. Among all examined cases, the second-order internal mixed honeycomb exhibited the highest improvement in specific energy absorption and demonstrated stable deformation patterns. This configuration is therefore identified as a promising candidate for future industrial applications requiring lightweight and highly efficient energy-absorbing structures.

Keywords: Metamaterial structure, Energy absorption, Honeycomb structure, Finite element simulation, Geometric innovation

ساختار، هندسه‌ی لانه زنبوری به عنوان یک ساختار خاص به‌عنوان نسل جدیدی از متامتریال‌های مبتنی بر تغییرشکل‌های فشاری مطرح شده‌اند. این ساختارهای نوین با جایگزینی المان‌های مستقیم با المان‌های منحنی و بهره‌گیری از توزیع هندسی بهینه‌شده، رفتار مکانیکی متمایزی نسبت به سلول‌های آگزتیک کلاسیک از خود نشان می‌دهند. نتیجه‌ی این اصلاحات، افزایش ظرفیت جذب انرژی، پایداری بالاتر در تغییرشکل و توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در سراسر ساختار است [۱].



شکل ۱-۱ ذات عملکردی ساختارهای آگزتیک [۲]

بر همین اساس، در ادامه به مرور پژوهش‌های پیشین در زمینه ساختارهای لانه‌زنبوری و ساختارهای نوآورانه پرداخته می‌شود. خاقانی و همکاران [۳]، دو ساختار آگزتیک با نام‌های ری‌انترانت و ستاره‌ای را به همراه ساختار متداول لانه‌زنبوری انتخاب کردند تا تأثیر نسبت پواسون منفی بر رفتار مکانیکی آن‌ها بررسی شود. این ساختارها با استفاده از چاپگر سه‌بعدی مبتنی بر روش FDM^۱ ساخته شدند. نتایج نشان داد که نیروی نهایی در ساختارهای ری‌انترانت و ستاره‌ای به ترتیب ۱۲۵ درصد و ۱۶۴ درصد بیشتر از ساختار لانه‌زنبوری است. العماره و همکاران [۴] نیز یک ساختار آگزتیک جدید با عنوان ساختار آگزتیک کایرال بازگشتی معرفی و بررسی کردند. این ساختار، ویژگی‌های توپولوژیکی لانه‌زنبوری بازگشتی شش‌ضلعی و لانه‌زنبوری ضد تتراکایرال را با یکدیگر ترکیب می‌کند. نتایج نشان داد که ساختار پیشنهادی آگزتیک کایرال بازگشتی در مقایسه با لانه‌زنبوری بازگشتی از چگالی کمتری برخوردار است. سایمون و همکاران [۵] تأثیر مجموعه‌ای از روش‌های مختلف گرادیان‌بندی را بر رفتار جذب انرژی و میرایی در ساختارهای لانه‌زنبوری انعطاف‌پذیر ساخته‌شده از TPU^۲ بررسی کردند. نتایج نشان داد که با تغییر روش گرادیان‌بندی چگالی سازه، رفتار میرایی مکانیکی نیز تغییر می‌کند. لیو و همکاران [۶] به بررسی انواع، ویژگی‌ها و کاربردهای فرامواد آگزتیک پرداختند. در این مطالعه ابتدا اصول اساسی رفتار آگزتیک در سطح ساختاری و خواص مکانیکی مرتبط با آن تشریح شد. سپس با مرور کاربردها و ویژگی‌های این ساختارها، مسیرهای توسعه آینده برای فرامواد آگزتیک مطرح شد تا بتوانند نیازهای مهندسی آینده، به‌ویژه در زمینه

تحلیل اثر تغییرات هندسی بر عملکرد جذب انرژی ساختارهای لانه‌زنبوری

نویسندگان

چکیده

ساختارهای فراماده به دلیل استحکام مناسب، مقاومت در برابر ضربه و توان بالای جذب انرژی، طی سال‌های اخیر توجه پژوهشگران را به‌طور گسترده به خود جلب کرده‌اند. در این پژوهش، رفتار سازه‌ای یک ساختار لانه‌زنبوری فراماده با الهام از هندسه آگزتیک تحت بار فشاری شبه‌استاتیکی درون‌صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا خواص مکانیکی ماده پایه از طریق انجام آزمون کشش روی نمونه‌های PLA+ چاپ‌شده به روش FDM تعیین شد. سپس مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت و مجموعه‌ای از اصلاحات هندسی در دو رویکرد برون‌سو و درون‌سو ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که اصلاحات برون‌سو با ایجاد نواحی تمرکز تنش، موجب کاهش قابل‌توجه توان جذب انرژی می‌شوند. در مقابل، اصلاحات درون‌سو با ایجاد زیرساختارهای داخلی و تقویت مسیرهای انتقال بار، عملکرد سازه‌ای را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. در میان مدل‌های بررسی‌شده، ساختار مخلوطی درونی درجه دوم بهترین عملکرد را از نظر جذب انرژی و پایداری تغییرشکل ارائه داد و می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای توسعه کاربردهای صنعتی سبک‌وزن و انرژی‌جاذب باشد.

کلیدواژه‌ها

ساختار فراماده، جذب انرژی، ساختار لانه‌زنبوری، شبیه‌سازی المان محدود، نوآوری هندسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

* نویسنده مسئول: erfana.taherkhani2128@gmail.com

۱ مقدمه

ساختارهای سلولی آگزتیک، به دلیل برخورداری از نسبت پواسون منفی و قابلیت تغییرشکل غیرمتعارف، همان‌گونه که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، طی سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را در زمینه‌ی طراحی سازه‌های سبک و جذب‌کننده‌ی انرژی به خود جلب کرده‌اند. در میان این

^۲ Thermoplastic Polyurethane

^۱ Fused Deposition Modeling

استفاده از فناوری ساخت افزایشی راهکاری مناسب برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های تولید سنتی فراهم می‌کند و در نتیجه انعطاف‌پذیری بیشتر در طراحی، بهره‌وری اقتصادی بالاتر و کاهش هدررفت مواد را به همراه دارد. هابلچک و همکاران [۱۴] به بررسی چندین حالت تعادل در ساختارهای مختلف آگزتیک با استفاده از فرمول‌بندی‌های جبری استاتیک گرافیکی دوبعدی و سه‌بعدی توضیح داده شد. نتایج نشان داد که با تغییر دیاگرام نیرو در استاتیک گرافیکی می‌توان رفتار هندسی مواد آگزتیک را بررسی کرد و رویکردی نوین برای پیش‌بینی تغییرات هندسی ماده تحت شرایط بارگذاری مختلف از طریق کنترل هندسی تعادل نیرو ارائه داد. پارک و همکاران [۱۵] به بررسی تحلیل اجزای محدود خطی و غیرخطی را به همراه آزمایش‌های تجربی بر روی ۱۱ نوع ساختار شبکه‌ای مبتنی بر سلول واحد با ابعاد $20 \times 20 \times 20$ میلی‌متر انجام دادند. نتایج نشان داد که در شرایط چگالی نسبی یکسان، ساختارهای شبکه‌ای مبتنی بر سلول‌های مکعب ساده، هشت‌وجهی، مکعب ناقص و هشت‌وجهی ناقص با آرایش $3 \times 3 \times 3$ بهترین عملکرد را از نظر استحکام فشاری محوری دارند. ساهارین و همکاران [۱۶] به بررسی طراحی، رفتارهای مکانیکی، قابلیت ساخت و کاربردهای ساختارهای شبکه‌ای گرادانی که با استفاده از فناوری ساخت افزایشی فلزی تولید می‌شوند پرداختند. نتایج نشان داد که این روش‌ها آزادی طراحی قابل توجهی برای مهندسان فراهم می‌کنند. لام و همکاران [۱۷] به بررسی رویکردی نوین برای بهبود کارایی خردشدگی و عملکرد جذب انرژی در فراساختارهای اورینگامی با استفاده از سیال غلیظ‌شونده برشی ارائه کردند. نتایج نشان داد که ساختار پیشنهادی می‌تواند نیروی خردشدگی بیشتر و یکنواخت‌تری ایجاد کند، بدون آنکه پیک اولیه بزرگی به وجود آید. همچنین مقاومت در برابر خردشدگی و توانایی جذب انرژی با افزایش سرعت خردشدگی افزایش می‌یابد. افضل و همکاران [۱۸] از مدل فرایند گاوسی تقویت‌شده با یادگیری فعال برای تولید چندین طرح با ویژگی‌های نزدیک به نسبت پواسون صفر استفاده کردند و مرز میان نسبت پواسون مثبت و منفی را مشخص نمودند. یافته‌ها نشان داد که دستیابی به نسبت پواسون نزدیک به صفر می‌تواند از طریق ترکیب‌های مختلفی از پارامترهای هندسی حاصل شود؛ موضوعی که امکان انتخاب پیکربندی مناسب متناسب با نیازهای طراحی را برای کاربران فراهم می‌کند.

با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه ساختارهای لانه‌زنبوری و فرامواد آگزتیک، بیشتر مطالعات پیشین بر بررسی ساختارهای متداول یا تغییر محدود پارامترهایی مانند ضخامت دیواره‌ها و اندازه سلول واحد متمرکز بوده‌اند. در این میان، تأثیر ایجاد اصلاحات هدفمند در هندسه سلول برای بهبود مکانیزم تغییرشکل و افزایش ظرفیت جذب انرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، بسیاری از ساختارهای رایج در بارگذاری

چندمنظوره بودن سازه‌ها، را برآورده کنند. هو و همکاران [۷] ساختار بازگشتی را به‌عنوان ساختار پایه انتخاب کردند تا ساختارهای شبکه‌ای لانه‌زنبوری آگزتیک هیبریدی سه‌بعدی جدیدی توسعه دهند. نتایج نشان داد که بین رفتار مکانیکی این ساختارها تحت بارگذاری کششی و فشاری تفاوت قابل توجهی وجود دارد. به‌طور خاص، کمترین مقدار جذب انرژی در حالت کششی حدود ۸۶ درصد بیشتر از بیشترین مقدار جذب انرژی در حالت فشاری گزارش شد. اسنایدر و همکاران [۸] ویژگی‌های جذب انرژی در ساختارهای شبکه‌ای میکرومعماری شده Octet, Kelvin, SC, Gyroid, FCC و BCC در محدوده‌ای از چگالی‌های نسبی و تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی از طریق آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزای محدود مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ساختار شبکه‌ای SC از نظر سختی و استحکام عملکرد بهتری نسبت به سایر ساختارها دارد. آیدین و همکاران [۹] تأثیر پارامترهای هندسی مختلف، از جمله آرایش هندسی شبکه، اندازه سلول واحد و ضخامت دیواره‌ها را بر پارامترهایی مانند جابجایی، کرنش، تنش فون میزس و مدول یانگ بررسی کردند. نتایج نشان داد که نحوه آرایش هندسی، ابعاد سلول واحد و ضخامت سازه نقش بسیار مهمی در بهینه‌سازی طراحی و بهبود عملکرد فرامواد آگزتیک در کاربردهای مهندسی دارند. سالمون و همکاران [۱۰] روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده برای بهبود عملکرد مکانیکی ساختارهای شبکه‌ای را مورد بررسی قرار دادند و عوامل اصلی مؤثر بر خواص مکانیکی این شبکه‌ها، همچنین مکانیزم‌ها و حالت‌های شکست آن‌ها را تحلیل کردند. علاوه بر این، محدودیت‌های فناوری ساخت افزایشی در تولید ساختارهای شبکه‌ای شناسایی شد و کمبود مطالعات در زمینه ساختارهای شبکه‌ای فلزی تولیدشده با روش اکستروژن مواد نیز مورد بحث قرار گرفت. پن و همکاران [۱۱] یک بررسی جامع درباره ساختارهای شبکه‌ای ارائه کردند، ابتدا تعریف و طبقه‌بندی این ساختارها مطرح شده و آن‌ها به دو دسته کلی یکنواخت و غیریکنواخت تقسیم شدند. همچنین ساختارهای شبکه‌ای غیریکنواخت از دو دیدگاه گرادیان و بهینه‌سازی توپولوژی مورد بررسی قرار گرفتند که شامل روش‌هایی مانند تقسیم‌بندی ورونوی، روش گرادیان اندازه، تطبیق و مقیاس‌بندی اندازه، همگن‌سازی، بهینه‌سازی و ساخت هستند. وان و لی [۱۲] ساختارهای شبکه‌ای مکعبی و لانه‌زنبوری الهام‌گرفته از بامبو با قطر تیرک‌های گرادانی را طراحی و با استفاده از چاپ سه‌بعدی تولید کردند. نتایج نشان داد که ساختار بیونیک الهام‌گرفته از بامبو دارای خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی مشابه ساختار لانه‌زنبوری است، اما در مقایسه با ساختار مکعبی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. جونیور و همکاران [۱۳] بر توسعه و کاربردهای ساختارهای آگزتیک تولیدشده با روش ساخت افزایشی تمرکز کردند و پتانسیل بالای این مواد برای تولید سریع و کم‌هزینه را برجسته ساختند.

چاپ شده بهینه شود. این تنظیمات بسته به نوع فیلامنت و هندسه قطعه انتخاب می‌شوند.

جدول ۱-۱ تنظیمات نرم‌افزار پرینتر سه‌بعدی [۲۱]

Internal Fill Pattern	Rectilinear
external Fill Pattern	Rectilinear
(%) Interior Fill Percentage	100
(%) Outline overlap	45
nozzle diameter (mm)	۰/۴
Nozzle temperature °C	200
Bed temperature °C	60
Layer height	۰/۲ mm
Printing speed	50 mm/s

۳-۱ تعیین خواص مکانیکی

همانطور که در شکل ۱-۱ ج-۱ نشان داده شده است، از روش افست ۰.۲٪ برای تعیین خواص مکانیکی ماده، با رسم خطی موازی با ناحیه الاستیک خطی منحنی تنش- کرنش واقعی استفاده شد. خواص مکانیکی PLA⁺ در جدول ۱ خلاصه شده است [۱۴].

جدول ۲-۱ خواص مکانیکی PLA⁺

Yield stress (MPa)	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio [۱۴]	Density [۱۴] (kg/m ³)
22/74	2406/9	۰/۳	1250

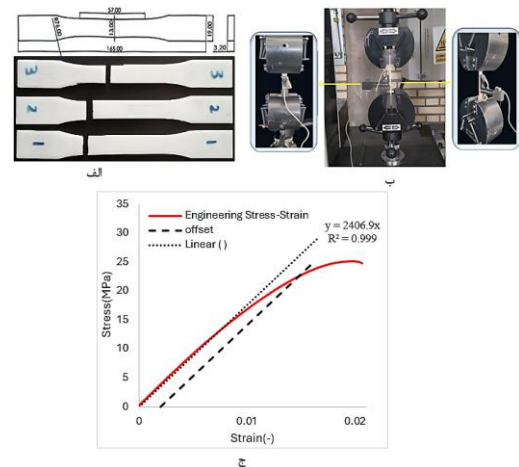
۴-۱ ساختار لانه زنبوری

در این مقاله، ساختار لانه زنبوری (هانی کام) مورد بررسی قرار گرفته است. شماتیکی از سلول واحد مربوط به این ساختار، به همراه ابعاد هندسی در شکل (۳) نشان داده شده است. در این مدل، ابعاد سلول واحد با نمادهای X و Y به ترتیب برای طول ۸۰ میلیمتر و عرض ۱۰ میلیمتر، و h برای ارتفاع ۲۰ میلیمتر مشخص شده‌اند. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، ساختار به صورت سه‌بعدی طراحی شده و سلول‌ها با آرایش دقیق

فشاری با مشکلاتی نظیر پیک اولیه نیروی بالا و ناپایداری در ناحیه پلاتو مواجه هستند که می‌تواند کارایی آن‌ها را در کاربردهای جذب انرژی محدود کند. در این پژوهش، با اعمال تغییرات هندسی در ساختار پایه لانه زنبوری، یک پیکربندی اصلاح شده ارائه شده است و تأثیر این تغییرات بر رفتار فشاری و ظرفیت جذب انرژی ساختار به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند به ارائه طراحی‌های هندسی کارآمدتر برای بهبود عملکرد سازه‌های جاذب انرژی منجر شود.

۱-۱ انتخاب مواد

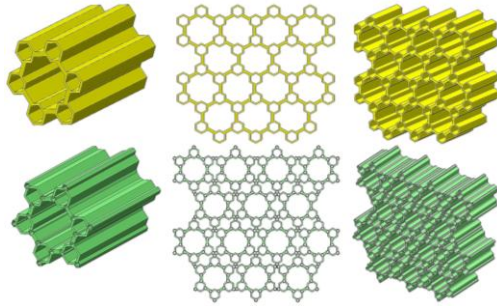
پلی‌لاکتیک اسید PLA یک پلیمر زیست‌پایه و زیست‌تخریب‌پذیر است که از منابع گیاهی مانند نشاسته ذرت و نیلشکر تولید می‌شود. نسخه بهبود یافته آن، PLA⁺، با افزودنی‌های خاصی تقویت شده تا مقاومت مکانیکی و حرارتی بالاتری داشته باشد. دمای ذوب PLA⁺ معمولاً بین ۲۰۵ تا ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد است که آن را برای چاپ سه‌بعدی ایده‌آل می‌کند. این ماده به دلیل خواص ارتقاء یافته، در تولید قطعات مهندسی با نیاز به تحمل فشار و دمای بیشتر کاربرد فراوانی دارد. برای تعیین خواص PLA⁺، آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM-D ۶۳۸ انجام گرفت، هندسه نمونه مطابق شکل ۱-۲ مورد استفاده در این آزمون را نشان می‌دهد [۱۹].



شکل ۱-۲ آزمایش کشش PLA⁺ (الف) سه نمونه استاندارد (ب) نمونه نصب شده در دستگاه Santam، (ج) نمودار تنش-کرنش

۲-۱ تنظیمات پرینتر سه‌بعدی

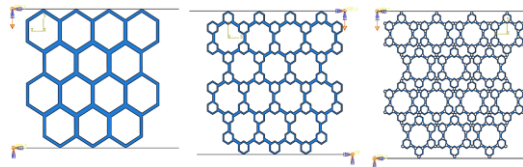
پرینتر سه‌بعدی Yenos از نوع FDM بوده و برای ساخت نمونه‌های پلیمری لایه‌به‌لایه استفاده می‌شود. در این دستگاه، پارامترهایی مانند مطابق جدول ۱-۱ دمای نازل، دمای بستر چاپ، سرعت چاپ، ارتفاع لایه و درصد تراکم (Infill) قابل تنظیم هستند تا کیفیت و دقت قطعه‌ی



شکل ۱-۴ نمایی از ساختارهای لانه‌زنبوری مخلوطی و لانه‌زنبوری مخلوطی درجه دوم

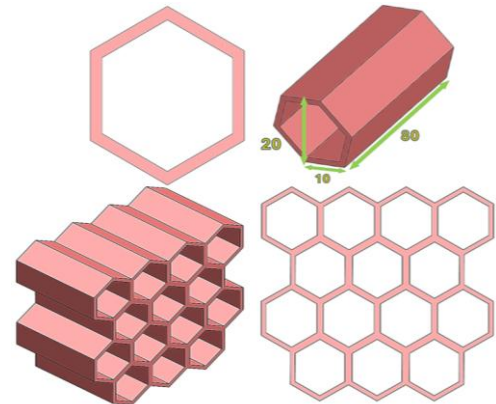
۲ شبیه سازی المان محدود

در این بخش، تجزیه و تحلیل اجزای محدود ساختارهای لانه‌زنبوری، همراه با مقایسه‌ی نتایج حاصل از سه نوع ساختار مختلف، ارائه شده است. مدل‌های هندسی توسعه‌یافته در نرم‌افزار سالیدورکس با فرمت STEP ذخیره شدند و سپس به ماژول‌های قطعه^۳ و مونتاژ^۴ نرم‌افزار آباکوس وارد گردیدند. به منظور شبیه‌سازی آزمایش فشار شبه‌استاتیک، فک‌های بارگذاری بالا و پایین به عنوان سطوح صلب دوبعدی مدل‌سازی شدند. سطح پایینی کاملاً محدود در نظر گرفته شد، در حالی که برای سطح بالایی، جابجایی در راستای محور Y به منظور فشرده‌سازی ساختار شبکه، اختصاص داده شد. از نقاط مرجع^۵ برای تعریف و اعمال شرایط مرزی استفاده گردید. مدل اجزای محدود و شرایط بارگذاری در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است. جابجایی به نقطه‌ی مرجع اعمال شده و نیروی واکنش متناظر با آن استخراج گردید. برای اطمینان از اعمال روان و مداوم جابجایی در طول زمان، از یک تابع دامنه با گام خط مستقیم در ماژول بارگذاری استفاده شد. این رویکرد از انتقال ناگهانی در پروفیل بارگذاری جلوگیری کرده و ماهیت شبه‌استاتیک روش آزمایشی را با دقت بالاتری منعکس می‌کند {۲۲}.



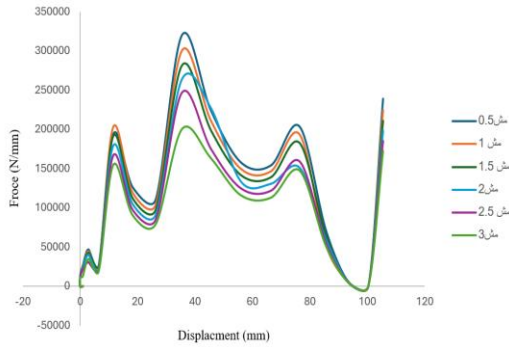
شکل ۱-۲ شبیه سازی المان محدود هر سه ساختار لانه‌زنبوری توسط نرم افزار آباکوس

و منظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و در مجموع، یک ساختار فراماده یکپارچه را تشکیل داده‌اند.



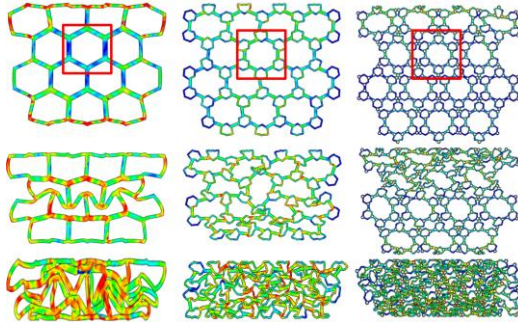
شکل ۱-۳ طراحی و ابعاد ساختار فراماده لانه‌زنبوری

با توجه به مطالعات گسترده انجام‌شده در حوزه ساختارهای لانه‌زنبوری و کاربرد وسیع آن‌ها در پژوهش‌های پیشین، ضرورت انجام بررسی‌های دقیق‌تر و ارائه رویکردهای نوآورانه برای بهبود و توسعه این ساختارها بیش از پیش احساس می‌شود. از این‌رو، در پژوهش حاضر با هدف ارتقای عملکرد مکانیکی و سازه‌ای ساختارهای لانه‌زنبوری، تغییرات هدفمندی در هندسه نوع متداول این ساختارها اعمال شده است. حاصل این تغییرات، معرفی و تحلیل دو نوع ساختار جدید و بهبودیافته است. در این مقاله، رفتار و عملکرد سه نوع ساختار لانه‌زنبوری شامل لانه‌زنبوری ساده، لانه‌زنبوری مخلوطی و لانه‌زنبوری مخلوطی درجه دوم به صورت تحلیلی و نظام‌مند مورد بررسی قرار گرفته است. در ساختارهای لانه‌زنبوری مخلوطی، با ایجاد تغییر در آرایش هندسی اجزا، بهبود در کارایی سازه حاصل شده است؛ در حالی که در نوع درجه دوم، با استفاده از عناصر تقویت‌کننده و افزایش ظرفیت باربری، بهبود بیشتری در رفتار مکانیکی مشاهده می‌شود. هدف اصلی این اصلاحات هندسی، ارتقای رفتار مکانیکی، افزایش پایداری و بهبود عملکرد سازه تحت شرایط مختلف بارگذاری است. مطابق شکل ۱-۴، نمای کلی ساختارهای لانه‌زنبوری مخلوطی و لانه‌زنبوری مخلوطی درجه دوم ارائه شده است که تفاوت‌های هندسی آن‌ها را نسبت به ساختار لانه‌زنبوری ساده به‌وضوح نشان می‌دهد. این تغییرات هندسی منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها، کاهش تمرکز تنش و بهبود پاسخ سازه در برابر بارهای اعمال‌شده شده‌اند. در نهایت، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی مؤثر برای توسعه طرح‌های نوآورانه در زمینه ساختارهای لانه‌زنبوری و گسترش کاربرد آن‌ها در پروژه‌های مهندسی آینده فراهم کند.



شکل ۲-۲ تست همگرایی شبکه بندی

برای مش المان محدود، عنصر چهار وجهی اصلاح شده ۳ بعدی پیوسته (M10D3C) استفاده شد که به طور گسترده در شبیه سازی های مهندسی پیچیده استفاده می شود. در شکل ۲-۳ مقایسه بین تغییر شکل به دست آمده از شبیه سازی هر سه ساختار لانه زنبوری ارائه شده است.



شکل ۲-۳ رفتار ساختار های مختلف لانه زنبوری تحت شبیه سازی شبه استاتیک

به عنوان معیاری کلیدی برای ارزیابی پایداری و دقت شبیه سازی شبه استاتیک، مقایسه انرژی های جنبشی و داخلی مورد استفاده قرار گرفته است. همان گونه که در شکل ۲-۴ مشاهده می شود، انرژی جنبشی در طول فرایند بارگذاری روندی پایدار و یکنواخت دارد و به طور قابل توجهی کمتر از انرژی داخلی باقی می ماند؛ به طوری که نوسان قابل ملاحظه ای در آن مشاهده نمی شود. این موضوع نشان می دهد که پارامتر مقیاس جرم^۸ به درستی انتخاب شده و ثبات عددی شبیه سازی در طول فرایند تحلیل حفظ شده است. در شکل ۲-۴ الف، منحنی نیرو-جابجایی حاصل از شبیه سازی اجزای محدود برای ساختار لانه زنبوری ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، سازه تحت بارگذاری فشاری دچار فروپاشی لایه به لایه^۹ می شود. در این حالت، لایه پایینی پس از رسیدن به آستانه تسلیم موضعی^{۱۰} از کار افتاده و سپس لایه بعدی شروع به تحمل بار می کند. این فروپاشی متوالی موجب ایجاد مجموعه ای از قله ها

۱-۲ تعیین شرایط فرایند آسیب

خواص مکانیکی PLA+ با استفاده از هر دو ناحیه الاستیک و پلاستیک تعریف شد. مدل آسیب شکل پذیر^۶ برای شبیه سازی فرایند آسیب همانطور که در جدول ۳ ارائه شده است، اتخاذ شد.

جدول ۱-۲ مقادیر آسیب برای مدل سازی ساختار درون سو

	Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
۱	۰.۰۲۴	-۵	۰.۰۰۱
۲	۰.۰۲۴	۵	۰.۰۰۱

با توجه به تغییر شکل های بزرگ و رفتار مواد پیچیده، حل کننده explicit در آباکوس برای مدل سازی انتخاب شد. نوع تماس^۷ با استفاده از روش تماس عمومی با ضریب اصطکاک ۰.۳ [۱۹] تعریف شد.

۲-۲ همگرایی شبکه

به منظور اطمینان از استقلال نتایج عددی از اندازه المان ها، مطالعه همگرایی مش برای ساختار لانه زنبوری انجام شد. در این تحلیل، از مش مربعی مطابق شکل ۲-۲ با اندازه های مختلف المان ایجاد شد و پاسخ سازه تحت بارگذاری شرایط مرزی یکسان مورد بررسی قرار گرفت. در هر مرحله از ریزتر شدن مش، پارامترهای کلیدی از جمله بیشینه نیروی فشاری، رفتار منحنی نیرو-جابجایی و مقدار جذب انرژی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

نتایج نشان داد که با کاهش اندازه المان و افزایش تعداد المان ها، تغییرات در مقادیر پارامترهای مورد بررسی به تدریج کاهش یافته و پاسخ عددی به سمت یک مقدار پایدار همگرا می شود. پس از رسیدن به اندازه مش ۱/۵ تا ۰/۵ تقریباً همگرا شده و اختلاف نتایج مش ۱/۵ در مقایسه با مش ۰/۵ ناچیز بوده و تغییر محسوسی در منحنی نیرو-جابجایی و شاخص های جذب انرژی مشاهده نشد. بنابراین، اندازه مش ۱ به عنوان مش بهینه در نظر گرفته شد، زیرا علاوه بر دقت مناسب در پیش بینی رفتار مکانیکی سازه، هزینه محاسباتی مثل تعداد المان از ۳'۲۱۳'۹۲۰ در مش ۰/۵ به ۴۰۹'۳۶۰ در مش ۱ کاهش پیدا کرد و تحلیل را نیز در سطح قابل قبولی نگه می دارد.

بر این اساس، استفاده از مش مربعی انتخاب شده برای مدل سازی ساختار لانه زنبوری می تواند دقت و پایداری نتایج شبیه سازی را تضمین کند و نشان می دهد که نتایج به دست آمده مستقل از اندازه مش هستند.

Layer-by-Layer Collapse^۸
Local Yielding^{۱۰}

ductile^۶
self-contact^۷
Mass Scaling^۹

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. در نتیجه، معیارهای مختلفی برای تخمین ϵ_d پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر، روش بهره‌وری انرژی برای تعیین شروع فشردگی، با راندمان جذب انرژی که با رابطه (۲) تعریف شده است، استفاده شد [۲۳].

$$\eta(\epsilon) = \frac{\int_{\epsilon}^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon)} \quad (2)$$

در این فرمول، $\eta(\epsilon)$ بازده جذب انرژی، $\sigma(\epsilon)$ نشان دهنده تنش آنی، و ϵ کرنش فشاری است. پس از محاسبه راندمان 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 جرم، که به عنوان جذب انرژی خاص SEA_m نشان داده می‌شود، معمولاً برای ارزیابی و مقایسه عملکرد جذب انرژی مواد مختلف و پیکربندی‌های ساختاری استفاده می‌شود.

$$SEA_m = \frac{EA}{m} \quad (3)$$

میانگین نیروی خردکننده (MCF) به عنوان کل انرژی جذب شده EA تقسیم بر جابجایی خردکننده 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.

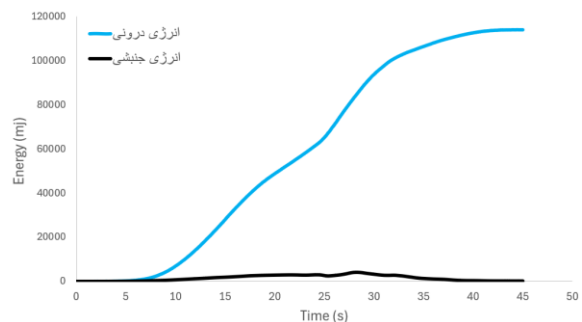
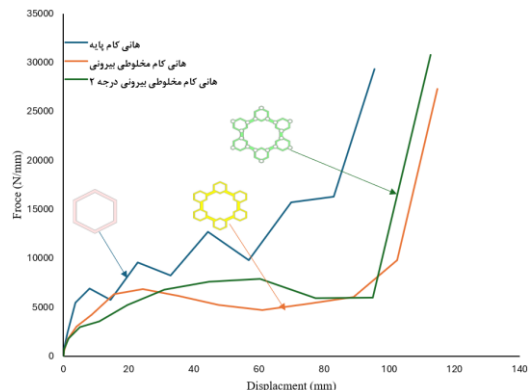
$$MCF = \frac{EA}{d} \quad (4)$$

راندمان نیروی خردکننده (CFE) به عنوان نسبت نیروی خردکننده متوسط (MCF) به نیروی خردکننده پیک تعریف می‌شود و می‌توان آن را بر اساس رابطه (۵) محاسبه کرد. برای یک جذب انرژی ایده آل، حداکثر مقدار CFE 1 است. این پارامتر اندازه‌گیری مستقیمی از اثربخشی جذب در اتلاف یکنواخت نیروها و به حداقل رساندن نوسانات نیرو در طول فرآیند تغییر شکل ارائه می‌دهد.

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \times 100 \quad (5)$$

در معادله بالا، PCF نیروی خردکننده اوج نشان می‌دهد، بالاترین نیروی تجربه شده قبل از شروع خرد شدن در نیرو-جابجایی است مطابق شکل ۵-۲ جذب انرژی ویژه SEA که معیاری حیاتی در ارزیابی عملکرد مواد و سازه‌ها تحت بارگذاری دینامیک و ضربه است، به طور ذاتی با جرم ماده یا سازه رابطه مستقیم دارد؛ به این معنا که با افزایش جرم،

دره‌های متناوب در منحنی نیرو-جابجایی می‌شود، به گونه‌ای که هر قله با فروپاشی یک لایه متناظر است. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل عددی تطابق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند. این رفتار مرحله‌ای فروپاشی که در برخی ساختارهای لانه‌زنبوری نیز مشاهده می‌شود، منجر به ایجاد ناحیه تنش پایدار گسترده و پایدار شده و در نتیجه ظرفیت جذب انرژی ویژه سازه را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.



شکل ۴-۲ الف) نمودار نیرو-جابجایی (ب) نمودار انرژی جنبشی به انرژی درونی

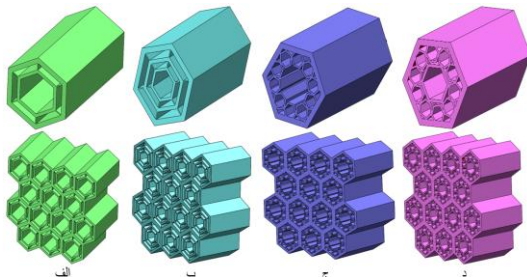
۳-۲ محاسبه جذب انرژی

وظیفه اصلی جاذب‌های انرژی کاهش انتقال نیروهای مخرب به اجزای سازه‌های یا تجهیزات حساس است. به طور کلی، پاسخ تنش-کرنش چنین موادی را می‌توان به سه ناحیه مجزا تقسیم کرد: ناحیه الاستیک خطی، ناحیه پایداری تنش یا بخش تقریباً ثابت نیرو و منطقه متراکم شدن. کل انرژی جذب شده در طول فرآیند خرد کردن یا فشرده‌سازی با ادغام ناحیه زیر منحنی نیرو-جابجایی تا شروع فشردگی کرنش، همانطور که در رابطه (۱) بیان شده است، اندازه‌گیری می‌شود.

$$EA = \int_{x_0}^{x_b} F(x) dx = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

که در آن، EA نشان دهنده انرژی جذب شده است، $f(x)$ ، x و dx به ترتیب نیروی فشاری، جابجایی و طول فشردگی اعمال می‌شوند. نمادهای $\sigma(\epsilon)$ و ϵ نشان دهنده تنش و کرنش فشاری هستند و $d\epsilon$ نشان دهنده کرنشی است که در آن ناحیه متراکم شروع می‌شود. در مواد فلزی، پس از مرحله الاستیک اولیه، یک منطقه فلات معمولاً ظاهر می‌شود که در

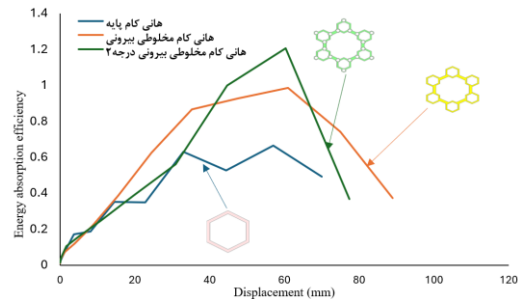
شده است. در این نوآوری، بدون اعمال تغییر در ابعاد و اندازه‌ی کلی ساختارها، آرایش اجزای سازه‌ای به‌گونه‌ای طراحی شده است که ساختارهای لانه‌زنبوری درون یکدیگر قرار گرفته و در نقاط میانی دارای نواحی اشتراک هندسی و سازه‌ای باشند. این نوع پیکربندی، نگرشی نوین در فرآیند توسعه و بهینه‌سازی ساختارهای لانه‌زنبوری خارجی ایجاد کرده و آن‌ها را به ساختارهای لانه‌زنبوری داخلی پیشرفته تبدیل می‌کند. با توجه به این موضوع، علاوه بر افزایش پیچیدگی هندسی، انتظار می‌رود که شاهد بهبود رفتار سازه‌ای، توزیع مناسب‌تر تنش‌ها و افزایش ظرفیت باربری سیستم باشیم. مطابق با شکل ۱-۳، نوآوری ایجادشده در هندسه‌ی ساختارهای مورد مطالعه به‌وضوح نمایش داده شده است که نحوه‌ی قرارگیری ساختارها در درون یکدیگر و اشتراک آن‌ها در نواحی میانی را به‌خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱ ساختارهای نوآوری شده لانه‌زنبوری (الف) ساختار عنکبوتی، (ب) ساختار عنکبوتی درجه دوم، (ج) ساختار مخلوطی داخلی، (د) ساختار مخلوطی داخلی درجه دوم

در ادامه‌ی پژوهش، فرآیند شبیه‌سازی عددی ساختارهای لانه‌زنبوری نوآوری‌شده، که هندسه‌ی آن‌ها در شکل ۱-۳ معرفی گردیده، مورد بررسی قرار گرفته است. رویکرد شبیه‌سازی این ساختارها بر همان چارچوب تحلیلی و شرایط مدل‌سازی استوار است که پیش‌تر برای ساختارهای لانه‌زنبوری ساده و لانه‌زنبوری مخلوطی خارجی در بخش نخست مقاله مورد استفاده قرار گرفت. به‌عبارت دیگر، به‌منظور ایجاد امکان مقایسه‌ی دقیق میان نتایج عددی، تمامی پارامترهای اصلی مدل‌سازی، شرایط مرزی، نوع بارگذاری و روش تحلیل در هر دو دسته از مدل‌ها به‌صورت یکسان تعریف شده‌اند. تفاوت اصلی میان فرآیندهای مدل‌سازی، تنها به افزایش ابعاد هندسی و ارتقا از ساختارهای ساده به ساختارهای نوآوری‌شده مربوط می‌شود که به‌طور طبیعی موجب افزایش تعداد المان‌ها و پیچیدگی هندسی مدل سه‌بعدی گردیده است. با این حال، اصول کلی شبیه‌سازی شامل مراحل ایجاد مدل هندسی، تعریف خواص مصالح، اعمال شرایط مرزی، بارگذاری و تحلیل عددی بر پایه‌ی چارچوبی مشترک اجرا شده‌اند. به‌منظور نمایش هم‌خوانی میان فرآیندهای شبیه‌سازی، در شکل ۲-۳ نمایی از مراحل و نحوه‌ی مدل‌سازی ارائه شده است که تطابق روش

قابلیت کلی جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد، مشابه 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 [۲۴].



شکل ۵-۲ راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه‌های شبیه‌سازی

برای محاسبه جذب انرژی ویژه بر پایه جرم محاسبه خواهد شد طبق طراحی انجام شده است جرم ساختار نوآورانه لانه‌زنبوری ساده ۳۵۰.۳ گرم ساختار لانه‌زنبوری مخلوطی ۴/۳۶۹ گرم ساختار لانه‌زنبوری مخلوطی درجه ۲ ۵۳۵/۱ گرم است.

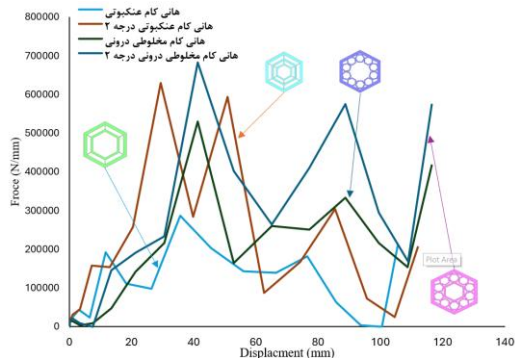
جدول ۲-۲ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده

لانه‌زنبوری	جرم (g)	$E A_p$ (KJ)	SEA_p (KJ/m ²)	MCF (N)	CFE	PCF (N)
لانه‌زنبوری ساده	۳۵۰/۳	۰/۹۵	۲/۷	۰/۰۱۶	۰/۰۰۰۱۳	۱۲۷۱۶/۲
لانه‌زنبوری مخلوطی	۳۶۹/۴	۰/۶۳	۱/۸	۰/۰۱۲	۰/۰۰۰۱۵	۶۸۴۲/۰/۸
لانه‌زنبوری مخلوطی درجه دوم	۵۳۵/۱	۰/۶۵	۱/۲	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۱۴	۷۹۲۱/۶/۲

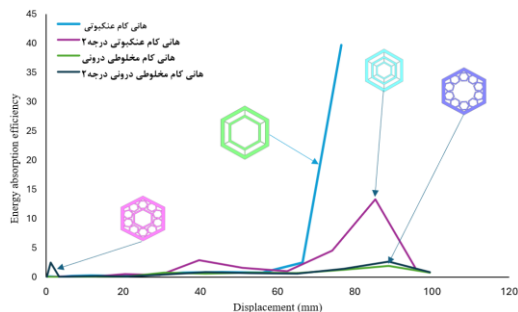
۳ نوآوری هندسی

در ادامه‌ی این مقاله، نوآوری اصلی پژوهش با تمرکز بر ایجاد تغییرات بنیادین در هندسه‌ی ساختارهای مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، ضمن حفظ ماهیت اصلی ساختار لانه‌زنبوری، هندسه‌ی آن‌ها به چهار نوع عنکبوتی درجه اول، عنکبوتی درجه دوم، مخلوطی داخلی و مخلوطی داخلی درجه دوم توسعه یافته است. این رویکرد، با هدف افزایش دامنه‌ی کاربرد ساختارهای لانه‌زنبوری و هم‌سو با توجه ویژه‌ی پژوهش‌های اخیر به ساختارهای لانه‌زنبوری پیشرفته، ارائه

در راستای دستیابی به تحلیل دقیق‌تر پاسخ مکانیکی این ساختارها، نمودارهای نیرو-جابجایی و راندمان-جابجایی برای نمونه‌های مورد مطالعه استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نمودار نیرو-جابجایی نشان‌دهنده رفتار مقاومتی ساختار در برابر بارگذاری اعمال شده بوده و اطلاعات کلیدی در مورد سختی مؤثر سازه، ظرفیت تحمل بار و الگوی تغییر شکل ساختار را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، نمودار راندمان-جابجایی ابزار مناسبی برای بررسی کارایی و عملکرد سازه‌ای ساختار در طول فرآیند تغییر شکل محسوب می‌شود و می‌تواند به‌عنوان شاخص کمی جهت ارزیابی کارکرد کلی ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری مورد استفاده قرار گیرد. مطابق با شکل ۳-۴ و شکل ۳-۵، نمودارهای نیرو-جابجایی و راندمان-جابجایی مربوط به ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری ارائه شده‌اند که از طریق آن‌ها می‌توان رفتار مکانیکی، نحوه جذب انرژی و عملکرد سازه‌ای این ساختارها را در شرایط مختلف بارگذاری تحلیل و مقایسه نمود.



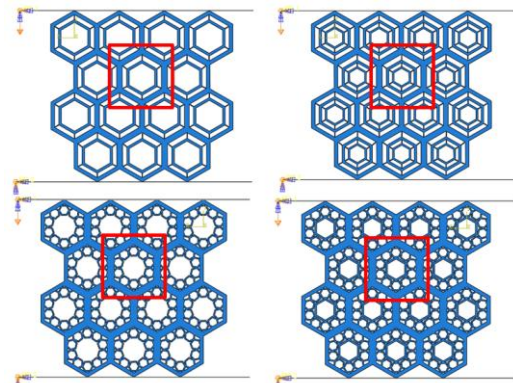
شکل ۳-۴ نمودار نیرو-جابجایی ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری



شکل ۳-۵ راندمان جذب انرژی در مقابل منحنی جابجایی برای نمونه‌های شبیه‌سازی شده ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری

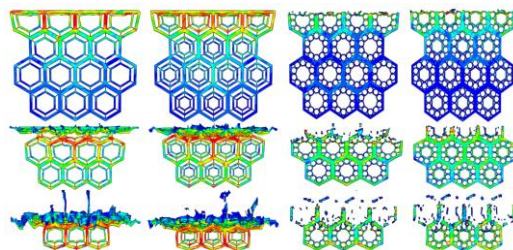
برای محاسبه جذب انرژی ویژه بر پایه جرم محاسبه خواهد شد طبق طراحی انجام شده است جرم ساختار نوآورانه لانه زنبوری عنکبوتی ۲۲۵.۹۳ گرم ساختار لانه زنبوری عنکبوتی درجه ۲ ۶۴۹/۵۲ گرم ساختار لانه زنبوری مخلوطی درونی ۶۷۳/۵۷ گرم ساختار لانه زنبوری مخلوطی درونی درجه ۲ ۷۶۶/۵۷ گرم است.

شبیه‌سازی را به‌وضوح نشان می‌دهد. این یکسان‌سازی در رویکرد تحلیل، امکان ارزیابی دقیق‌تر تأثیر تغییرات هندسی را فراهم می‌سازد.



شکل ۳-۲ شبیه‌سازی المان محدود هر چهار ساختار نوآورانه لانه زنبوری توسط نرم افزار آباکوس

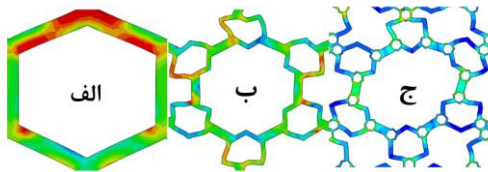
در ادامه و بر پایه شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده، نتایج تحلیل استاتیکی ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری با بهره‌گیری از مدل‌سازی نرم‌افزاری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. این تحلیل‌ها با هدف بررسی جامع رفتار مکانیکی ساختارها، الگوی توزیع تنش‌ها و نحوه تغییر شکل ناشی از بارگذاری صورت گرفته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل استاتیکی، امکان ارزیابی دقیق عملکرد سازه‌ای ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری و مقایسه آن‌ها با نمونه‌های لانه زنبوری ساده و مخلوطی خارجی مورد مطالعه در بخش‌های پیشین مقاله را فراهم می‌سازد. افزون بر این، تحلیل‌های انجام‌شده دیدگاه ارزشمندی را در خصوص تأثیر تغییرات هندسی و توسعه ساختار از حالت‌های ساده و خارجی به ساختارهای نوآورانه داخلی بر پاسخ سازه‌ای سیستم ارائه می‌دهند. این نتایج نشان‌دهنده نقش مستقیم پیچیدگی هندسی در بهبود رفتار مکانیکی و توزیع تنش‌ها در ساختارهای پیشرفته لانه زنبوری هستند. در شکل ۳-۳، نمایی از نتایج تحلیل استاتیکی و خروجی‌های نرم‌افزاری مربوط به ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری ارائه شده است که در آن نحوه توزیع تنش‌ها و الگوی تغییر شکل سازه‌ای به‌وضوح قابل مشاهده است.



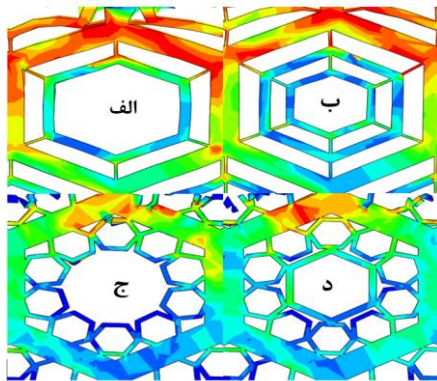
شکل ۳-۳ رفتار چهار ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری تحت شبیه‌سازی شبه استاتیکی

بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده، امکان استخراج و بررسی پارامترهای رفتاری ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری فراهم گردیده است.

نیروی لهیدگی است، معیاری برای ارزیابی میزان نزدیکی رفتار ساختار به یک جاذب انرژی ایده‌آل به شمار می‌رود. این شاخص نشان می‌دهد که ساختار تا چه میزان قادر است در طول فرآیند لهیدگی، رفتار پایدار و نزدیک به حالت ایده‌آل از خود نشان دهد. بر اساس این تعاریف، عملکرد ساختارهای دارای اصلاحات برون‌سو و درون‌سو به‌ترتیب در نمودارهای شکل ۵-۲ و شکل ۴-۳ ارائه شده است. به‌منظور انجام مقایسه‌ای دقیق، سلول واقع در ردیف دوم و مرکز ساختار در تمامی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳ با مستطیل قرمز مشخص شده است. تمامی تصاویر تحت شرایط جابه‌جایی یکسان، زمان شبیه‌سازی یکسان و بر اساس معیار تنش فون‌مایز استخراج شده‌اند. در ساختارهای لانه‌زنبوری، به‌طور کلی تمرکز تنش در سمت اعمال نیرو مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۴ کانتور تنش فون‌مایز در سلول ساختارهای (الف) لانه‌زنبوری ساده (ب) لانه‌زنبوری مخلوطی (ج) لانه‌زنبوری مخلوطی درجه دوم



شکل ۲-۴ کانتور تنش فون‌مایز در سلول ساختارهای (الف) لانه‌زنبوری عنبکوتی (ب) لانه‌زنبوری عنبکوتی درجه ۲ (ج) لانه‌زنبوری مخلوطی درونی (د) لانه‌زنبوری مخلوطی درونی درجه ۲

در ساختارهای دارای اصلاحات برون‌سو، مشاهده شد که علاوه بر تمرکز تنش در بخش فوقانی سلول، در نواحی اتصال بازوها نیز تمرکز تنش شدیدی ایجاد می‌شود. در ساختار لانه‌زنبوری مخلوطی، این تمرکز تنش منجر به تخریب و شکست موضعی قابل توجهی شده است که در نهایت موجب کاهش ظرفیت جذب انرژی گردید. همین روند در ساختار لانه‌زنبوری مخلوطی درجه دوم نیز تکرار شد، با این تفاوت که کوچک‌تر شدن هندسه داخلی باعث کاهش استقامت سازه و افزایش شدت شکست شد. در نتیجه، برخلاف فرض اولیه که تخریب تدریجی اجزای بیرونی می‌توانست موجب انتقال مرحله‌ای بار و افزایش جذب انرژی شود، افزایش

جدول ۱-۳ مقادیر مختلف مقایسه جاذب انرژی بدست آمده ساختارهای نوآورانه لانه‌زنبوری

نمونه	جرم (g)	EA _q (KJ)	SEA _q (KJ/m ²)	MCF (N)	CFE	PCF (N)
لانه‌زنبوری عنبکوتی	۵۵۲۹۳	۲۱۱۵۶	۳۸۱۹	۰٫۳۸	۰٫۰۰۰۰۹۸	۲۸۶۴٫۷
لانه‌زنبوری عنبکوتی درجه ۲	۶۴۹۵۲	۴۵۲۷	۶۹۱۷	۰٫۵۳	۰٫۰۰۰۰۸۴	۶۲۰۲۰
لانه‌زنبوری مخلوطی درونی	۶۷۳۵۷	۳۸۵۲	۵۷۱۱	۰٫۴۳	۰٫۰۰۰۰۸۱	۵۲۰۴۱۵
لانه‌زنبوری مخلوطی درونی درجه ۲	۷۶۶۵۷	۵۶۳۸	۷۳۱۵	۰٫۶۳	۰٫۰۰۰۰۹۳	۶۸۳۰۲۲

۴ نتیجه گیری

به‌منظور دستیابی به یک جمع‌بندی نظام‌مند و مبتنی بر تحلیل درباره عملکرد ساختارهای لانه‌زنبوری و پیکربندی‌های توسعه‌یافته از آن، ابتدا باید اشاره کرد که ساختار لانه‌زنبوری یکی از پایدارترین و کارآمدترین هندسه‌ها در طراحی سازه‌های جاذب انرژی و فرامواد مکانیکی محسوب می‌شود. این ساختار به دلیل نسبت استحکام به وزن مناسب، قابلیت توزیع تنش و رفتار پایدار در ناحیه پس‌کمانش، همواره به‌عنوان یک ساختار پایه در پژوهش‌های مرتبط با جذب انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش تلاش شد تا با حفظ ویژگی‌های بنیادین ساختار پایه، از طریق اعمال اصلاحات هندسی هدفمند، ظرفیت جذب انرژی ویژه ارتقا یابد. راهبردهای مورد استفاده در این مطالعه در دو دسته اصلی شامل اصلاحات برون‌سو و اصلاحات درون‌سو طبقه‌بندی شدند. در ارزیابی عملکرد ساختارها، سه پارامتر اصلی شامل میانگین نیروی لهیدگی (MCF)، بیشینه نیروی لهیدگی (PCF) و بازده لهیدگی (CFE) مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس تعریف، پارامتر MCF بیانگر میزان انرژی جذب‌شده در واحد تغییر طول است؛ بنابراین مقدار آن وابستگی مستقیمی به جذب انرژی ویژه ساختار دارد و در عمل نرخ جذب انرژی را توصیف می‌کند. بدیهی است که مقادیر بالاتر این پارامتر نشان‌دهنده عملکرد بهتر و بازده بالاتر ساختار در فرآیند جذب انرژی است. در ادامه، پارامتر PCF به‌عنوان بیشینه نیروی قابل تحمل توسط ساختار تعریف می‌شود؛ به این معنا که سازه در بهترین وضعیت باربری خود و در شرایطی که بیشترین تعداد اجزای ساختار در تحمل بار مشارکت دارند، چه میزان نیرو را می‌تواند تحمل کند. پس از رسیدن به این نقطه، با آغاز ناپایداری و شکست موضعی، نیروی تحمل‌شده کاهش می‌یابد. این پارامتر یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها در اصلاح و بهینه‌سازی هندسی ساختارها محسوب می‌شود، زیرا در ساختارهایی با ابعاد و جرم تقریباً مشابه، مهم‌ترین عامل مؤثر بر جذب انرژی، کاهش تمرکز تنش و افزایش مشارکت اجزای مختلف سلول در فرآیند تغییرشکل است. بر همین اساس، PCF معیار اصلی مقایسه میان ساختارهای دارای اصلاحات برون‌سو و درون‌سو در این پژوهش بوده است. همچنین پارامتر CFE که نسبت نیروی میانگین لهیدگی به بیشینه

۵ تقدیر و تشکر

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

منابع

- [1] M. J. Khoshgoftar and A. Barkhordari, 2023 "A review on properties, types and applications of auxetic structures," *Mechanics of Advanced and Smart Materials*, vol. 2, no. 4, pp. 413-431
- [2] N. Khan and A. Riccio, 2024 "A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 149, p. 101021
- [3] Khaghani, M., et al., "Auxetic structures in civil engineering applications: Experimental (by 3D printing) and numerical investigation of mechanical behavior," *Results in Materials*, vol. 17, p. 100332, 2023.
- [4] Alomarah, A., et al., "An investigation of in-plane tensile properties of re-entrant chiral auxetic structure," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, no. 5, pp. 2341–2352, 2018.
- [5] Simon, P., et al., "Compressive behaviour of honeycombs with graded densities 3D printed thermoplastic polyurethane," *Materials & Design*, vol. 160, pp. 1159–1170, 2018.
- [6] Liu, Y., et al., "Auxetic meta-materials and their engineering applications: a review," *Engineering Research Express*, vol. 5, no. 3, p. 032001, 2023.
- [7] He, W., et al., "Compressive and tensile behaviours of 3D hybrid auxetic-honeycomb lattice structures," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 61, no. 1, pp. 63–72, 2012.
- [8] Schneider, J., et al., "Comparative performance evaluation of microarchitected lattices processed via SLS, MJ, and DLP 3D printing methods: Experimental investigation and modelling," *Engineering Research Express*, vol. 5, no. 4, p. 045012, 2023.
- [9] Aydin, A., et al., "Analyzing the Mechanical Properties of an Auxetic Structure Under Compression," *Journal of*

تعداد زوایای تیز و نواحی تمرکز تنش تأثیر منفی بر عملکرد سازه داشت. به‌طوری‌که ساختارهای لانه‌زنبوری مخلوطی و مخلوطی درجه دوم به‌ترتیب حدود ۳۳ و ۵۵ درصد کاهش جذب انرژی ویژه نسبت به نمونه پایه نشان دادند. در مقابل، اصلاحات درون‌سو نتایج بسیار مطلوب‌تری ارائه کردند. در ساختار لانه‌زنبوری عنکبوتی، افزودن بازوهای داخلی موجب توزیع و تقسیم بهتر نیرو در سطح سلول شد که افزایش قابل توجه جذب انرژی را به همراه داشت. در ساختار لانه‌زنبوری عنکبوتی درجه دوم نیز افزایش تعداد لایه‌های داخلی و تماس بازوها در حین تغییرشکل، منجر به ایجاد یک هسته داخلی مقاوم و افزایش بیشتر ظرفیت جذب انرژی شد. همچنین در ساختار لانه‌زنبوری مخلوطی درونی، به دلیل توزیع مناسب‌تر نیرو، میزان تمرکز تنش نسبت به سایر ساختارها به‌طور محسوسی کاهش یافت. بررسی رفتار این ساختار نشان داد که اضلاع داخلی آن، با وجود تشکیل یک هندسه شبه‌دایره‌ای، مشارکت محدودی در تحمل تنش دارند. بر همین اساس، با ترکیب ویژگی‌های ساختار لانه‌زنبوری مخلوطی درونی و ساختار عنکبوتی، هندسه جدیدی تحت عنوان «لانه‌زنبوری مخلوطی درونی درجه دوم» توسعه یافت. این ساختار ضمن حفظ مزایای هر دو پیکربندی، ضعف ساختار مخلوطی درونی را نیز برطرف کرد و عملکرد بسیار مطلوبی در جذب انرژی نشان داد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن بود که ساختار لانه‌زنبوری عنکبوتی حدود ۱۴٫۴ برابر، ساختار عنکبوتی درجه دوم حدود ۲۵٫۸ برابر، ساختار مخلوطی درونی حدود ۲۱٫۱ برابر و ساختار مخلوطی درونی درجه دوم حدود ۲۷٫۲ برابر افزایش جذب انرژی ویژه نسبت به مدل پایه دارند. همچنین با در نظر گرفتن ساختار عنکبوتی به‌عنوان مبنای مقایسه، مشخص شد که ساختار مخلوطی درونی درجه دوم حدود ۸۹ درصد عملکرد بهتری نسبت به ساختار مبنا ارائه می‌دهد. دو مکانیزم اصلی را می‌توان عامل این بهبود چشمگیر دانست. نخست، وجود زیرساختارهای داخلی کوچک‌تر که توزیع بار را در سطح گسترده‌تری ممکن ساخته و از ایجاد تمرکز تنش جلوگیری می‌کنند. دوم، تقویت شبکه‌ای این زیرساختارها در قالب هندسه عنکبوتی که موجب افزایش سختی موضعی، پایداری پس‌کمانش و مقاومت پیش از شکست می‌شود. در واقع، هم‌افزایی میان توزیع یکنواخت تنش و تقویت تدریجی ساختار، منجر به بهبود غیرخطی و قابل توجه ظرفیت جذب انرژی شده است. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ساختار لانه‌زنبوری مخلوطی درونی درجه دوم مناسب‌ترین گزینه در میان ساختارهای بررسی‌شده است و می‌تواند به‌عنوان یک پیکربندی امیدوارکننده در طراحی سازه‌های جاذب انرژی مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، ادامه پژوهش‌ها در زمینه بهینه‌سازی ابعاد زیرساختارهای داخلی، تعداد اجزا در هر سلول، زوایای اتصال و سایر نسبت‌های هندسی می‌تواند به توسعه ساختارهایی با عملکرد بالاتر در کاربردهای صنعتی منجر شود.

Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 20+

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

[24] C. W. Isaac and C. Ezekwem, 2021 "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. 113

Materials and Electronic Devices, vol. 9, no. 2, pp. 115–124, 2024.

[10] Obadimu, A., et al., "Compressive Behaviour of Additively Manufactured Lattice Structures: A Review," *Journal of Materials and Electronic Devices*, vol. 6, no. 3, pp. 145–158, 2021.

[11] Pan, L., et al., "Design and Optimization of Lattice Structures: A Review," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 6, pp. 2154–2168, 2020.

[12] Wen, Q., et al., "Compressive Properties of Functionally Graded Bionic Bamboo Lattice Structures Fabricated by FDM," *Materials*, vol. 14, no. 12, pp. 3215–3226, 2021.

[13] Junio, R. F. P., et al., "Development and Applications of 3D Printing-Processed Auxetic Structures for High-Velocity Impact Protection: A Review," *Materials*, vol. 16, no. 8, p. 2987, 2023.

[14] Hablicsek, M., et al., "Structural form-finding of Auxetic Materials using Graphic Statics," *International Conference on Spatial Structures*, pp. 215–222, 2021.

[15] Park, K.-M., et al., "Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements," *Materials*, vol. 14, no. 15, pp. 4210–4223, 2021.

[16] Seharing, A., et al., "A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11, no. 6, pp. 1–14, 2019.

[17] Lam, T., et al., "Dynamic crushing and energy absorption of bio-inspired shear thickening fluid-filled origami metastructure," *Engineering Structures*, vol. 281, p. 115658, 2023.

[18] Afdhal, M., et al., "Discovering chiral auxetic structures with near-zero Poisson's ratio using an active learning strategy," *Materials & Design*, vol. 239, p. 112733, 2024.

[19] PLA composites: From production to properties/ Marius Murariu *, Philippe Dubois/ ۰۱۶۹-۴۰۹X/© ۲۰۱۶ Elsevier B.V. All rights reserved

[20] Mechanical Properties of Biodegradable Composites from Poly Lactic Acid (PLA) and Microcrystalline Cellulose (MCC) Aji P. Mathew,^۱ Kristiina Oksman,^۱ Mohini Sain/
Received ۲۲ March ۲۰۰۴; accepted ۲۷ October ۲۰۰۴

[21] Thermal Insulation and Mechanical Properties of Polylactic Acid (PLA) at Different

[22] M. Najafi, H. Ahmadi, and G. Liaghat, 2020 "Experimental and Numerical Investigation of Energy