



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

Article History

Received: 30 Apr 2026

Accepted: 15 Jun 2026

ePublished: 16 Jun 2026

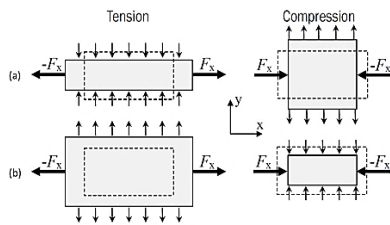
ABSTRACT

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

۱ مقدمه

ساختارهای سلولی آگزتیک، به دلیل برخورداری از نسبت پواسون منفی و قابلیت تغییر شکل غیرمتعارف، همان گونه که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، طی سال های اخیر توجه گسترده ای را در زمینه طراحی سازه های سبک و جذب کننده انرژی از خود جلب کرده اند. در میان این ساختار، هندسه ی لانه زنبوری به عنوان یک ساختار خاص به عنوان نسل جدیدی از متامتریال های مبتنی بر تغییر شکل های فشاری مطرح شده اند. این ساختارهای نوین با جایگزینی المان های مستقیم با المان های منحنی و بهره گیری از توزیع هندسی بهینه شده، رفتار مکانیکی متمایزی نسبت به سلول های آگزتیک کلاسیک از خود نشان می دهند. نتیجه ی این اصلاحات، افزایش ظرفیت جذب انرژی، پایداری بالاتر در تغییر شکل و توزیع یکنواخت تر تنش ها در سراسر ساختار است [۱].



شکل ۱-۱ ذات عملکردی ساختار های آگزتیک [۲]

بر همین اساس، در ادامه به مرور پژوهش های پیشین در زمینه ساختارهای لانه زنبوری و ساختارهای نوآورانه پرداخته می شود. خاقانی و همکاران [۳]، دو ساختار آگزتیک با نام های ری انترانت و ستاره ای را به همراه ساختار متداول لانه زنبوری انتخاب کردند تا تأثیر نسبت پواسون منفی بر رفتار مکانیکی آن ها بررسی شود. این ساختارها با استفاده از چاپگر سه بعدی مبتنی بر روش FDM^۱ ساخته شدند. نتایج نشان داد که نیروی نهایی در ساختارهای ری انترانت و ستاره ای به ترتیب ۱۲۵ درصد و ۱۶۴ درصد بیشتر از ساختار لانه زنبوری است. العماره و همکاران [۴] نیز یک ساختار آگزتیک جدید با عنوان ساختار آگزتیک کایرال بازگشتی معرفی و بررسی کردند. این ساختار، ویژگی های توپولوژیکی لانه زنبوری بازگشتی شش ضلعی و لانه زنبوری ضد تتراکایرال را با یکدیگر ترکیب می کند. نتایج نشان داد که ساختار پیشنهادی آگزتیک کایرال بازگشتی در مقایسه با لانه زنبوری بازگشتی از چگالی کمتری برخوردار است. سایمون و همکاران [۵] تأثیر مجموعه ای از روش های مختلف گرادیان بندی را بر رفتار جذب انرژی و میرایی در ساختارهای لانه زنبوری انعطاف پذیر ساخته شده از TPU^۲ بررسی کردند. نتایج نشان داد که با

تحلیل اثر تغییرات هندسی بر عملکرد

جذب انرژی ساختارهای لانه زنبوری

عرفان طاهرخانی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

محمد رضا پارساییان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

مهدی مردانی

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

ساختارهای فراماده به دلیل استحکام مناسب، مقاومت در برابر ضربه و توان بالای جذب انرژی، طی سال های اخیر توجه پژوهشگران را به طور گسترده به خود جلب کرده اند. در این پژوهش، رفتار سازه ای یک ساختار لانه زنبوری فراماده با الهام از هندسه آگزتیک تحت بار فشاری شبه استاتیکی درون صفحه ای مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا خواص مکانیکی ماده پایه از طریق انجام آزمون کشش روی نمونه های PLA+ چاپ شده به روش FDM تعیین شد. سپس مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس انجام گرفت و مجموعه ای از اصلاحات هندسی در دو رویکرد برون سو و درون سو ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که اصلاحات برون سو با ایجاد نواحی تمرکز تنش، موجب کاهش قابل توجه توان جذب انرژی می شوند. در مقابل، اصلاحات درون سو با ایجاد زیرساختارهای داخلی و تقویت مسیرهای انتقال بار، عملکرد سازه ای را به طور چشمگیری بهبود می بخشند. در میان مدل های بررسی شده، ساختار مخلوطی درونی درجه دوم بهترین عملکرد را از نظر جذب انرژی و پایداری تغییر شکل ارائه داد و می تواند گزینه ای مناسب برای توسعه کاربردهای صنعتی سبک وزن و انرژی جاذب باشد.

کلید واژه ها

ساختار فراماده، جذب انرژی، ساختار لانه زنبوری، شبیه سازی المان محدود، نوآوری هندسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

* نویسنده مسئول: erfana.taherkhani2128@gmail.com

^۲ Thermoplastic Polyurethane

^۱ Fused Deposition Modeling

استفاده از چاپ سه بعدی تولید کردند. نتایج نشان داد که ساختار بیونیک الهام گرفته از بامبو دارای خواص مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی مشابه ساختار لانه زنبوری است، اما در مقایسه با ساختار مکعبی عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. جونیور و همکاران [۱۳] بر توسعه و کاربردهای ساختارهای آگزتیک تولید شده با روش ساخت افزایشی تمرکز کردند و پتانسیل بالای این مواد برای تولید سریع و کم هزینه را برجسته ساختند. استفاده از فناوری ساخت افزایشی راهکاری مناسب برای غلبه بر محدودیت های روش های تولید سنتی فراهم می کند و در نتیجه انعطاف پذیری بیشتر در طراحی، بهره وری 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 فرمول بندی های جبری استاتیک گرافیکی دوبعدی و سه بعدی توضیح داده شد. نتایج نشان داد که با تغییر دیگرام نیرو در استاتیک گرافیکی می توان رفتار هندسی مواد آگزتیک را بررسی کرد و رویکردی نوین برای پیش بینی 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 آزمایش های تجربی بر روی ۱۱ نوع ساختار شبکه ای مبتنی بر سلول واحد با ابعاد $20 \times 20 \times 20$ میلی متر انجام دادند. نتایج نشان داد که در شرایط چگالی نسبی یکسان، ساختارهای شبکه ای مبتنی بر سلول های مکعب ساده، هشت وجهی، مکعب ناقص و هشت وجهی 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 شبکه ای گرادانی که با استفاده از فناوری ساخت افزایشی فلزی تولید می شوند پرداختند. نتایج نشان داد که این روش ها آزادی طراحی قابل توجهی برای مهندسان فراهم می کنند. لام و همکاران [۱۷] به بررسی رویکردی نوین برای بهبود کارایی خردشدگی و عملکرد جذب انرژی در فراساختارهای اورینگامی با استفاده از سیال غلیظ شونده برشی ارائه کردند. نتایج نشان داد که ساختار پیشنهادی می تواند نیروی خردشدگی بیشتر و یکنواخت تری ایجاد کند، بدون آنکه پیک اولیه بزرگی به وجود آید. همچنین مقاومت در برابر خردشدگی و توانایی جذب انرژی با افزایش سرعت خردشدگی افزایش می یابد. افضل و همکاران [۱۸] از مدل فرایند گاوسی تقویت شده با یادگیری فعال برای تولید چندین طرح با ویژگی های نزدیک به نسبت پواسون صفر استفاده کردند و مرز میان نسبت پواسون مثبت و منفی را مشخص نمودند. یافته ها نشان داد که دستیابی به نسبت پواسون نزدیک به صفر می تواند از طریق ترکیب های مختلفی از پارامترهای هندسی حاصل شود؛ موضوعی که امکان انتخاب پیکربندی مناسب متناسب با نیازهای طراحی را برای کاربران فراهم می کند.

تغییر روش گرادیان بندی چگالی سازه، رفتار میرایی مکانیکی نیز تغییر می کند. لیو و همکاران [۶] به بررسی انواع، ویژگی ها 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 ویژگی های این ساختارها، مسیرهای توسعه آینده برای فرامواد آگزتیک مطرح شد تا بتوانند نیازهای مهندسی آینده، به ویژه در زمینه چندمنظوره بودن سازه ها، را برآورده کنند. هو و همکاران [۷] ساختار بازگشتی را به عنوان ساختار پایه انتخاب کردند تا ساختارهای شبکه ای لانه زنبوری آگزتیک هیبریدی سه بعدی جدیدی توسعه دهند. نتایج نشان داد که بین رفتار مکانیکی این ساختارها تحت بارگذاری کششی و فشاری تفاوت قابل توجهی وجود دارد. به طور 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] ویژگی های جذب انرژی در ساختارهای شبکه ای میکرومعماری شده Octet, Kelvin, SC, Gyroid, FCC و BCC در محدوده ای از چگالی های نسبی و تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیکی از طریق آزمایش های تجربی و شبیه سازی های اجزای محدود مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که ساختار شبکه ای 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 دیواره ها 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 بهینه سازی طراحی و بهبود عملکرد فرامواد آگزتیک در کاربردهای مهندسی دارند. سالمون و همکاران [۱۰] روش های بهینه سازی مورد استفاده برای بهبود عملکرد مکانیکی ساختارهای شبکه ای را مورد بررسی قرار دادند و عوامل اصلی مؤثر بر خواص مکانیکی این شبکه ها، همچنین مکانیزم ها و حالت های شکست آن ها را تحلیل کردند. علاوه بر این، محدودیت های فناوری ساخت افزایشی در تولید ساختارهای شبکه ای شناسایی شد و کمبود مطالعات در زمینه ساختارهای شبکه ای فلزی تولید شده با روش اکستروژن مواد نیز مورد بحث قرار گرفت. پن و همکاران [۱۱] یک بررسی جامع درباره ساختارهای شبکه ای ارائه کردند، ابتدا تعریف و طبقه بندی این ساختارها مطرح شده و آن ها به دو دسته کلی یکنواخت و غیریکنواخت تقسیم شدند. همچنین ساختارهای شبکه ای غیریکنواخت از دو دیدگاه گرادیان و بهینه سازی توپولوژی مورد بررسی قرار گرفتند که شامل روش هایی مانند تقسیم بندی ورونوی، روش گرادیان اندازه، تطبیق و مقیاس بندی اندازه، همگن سازی، بهینه سازی و ساخت هستند. وان و لی [۱۲] ساختارهای شبکه ای مکعبی و لانه زنبوری الهام گرفته از بامبو با قطر تیرک های گرادیان را طراحی و با

۲-۱ تنظیمات پرینتر سه بعدی

پرینتر سه بعدی Yenos از نوع FDM بوده و برای ساخت نمونه‌های پلیمری لایه به لایه 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 قطعه چاپ شده بهینه شود. این تنظیمات بسته به نوع فیلامنت و هندسه قطعه انتخاب می‌شوند.

جدول ۱-۱ تنظیمات نرم افزار پرینتر سه بعدی [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 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

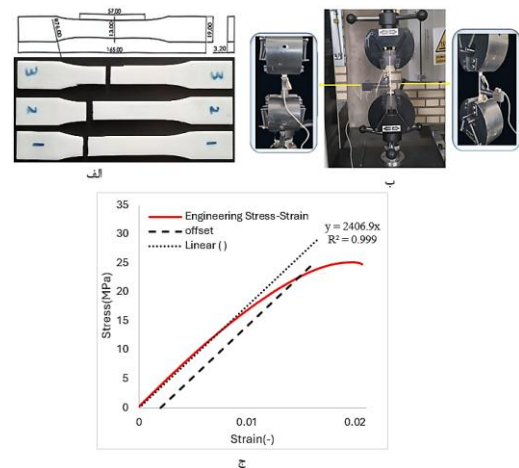
۴-۱ ساختار لانه زنبوری

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. همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود، ساختار به صورت سه بعدی طراحی شده و سلول‌ها با آرایش دقیق

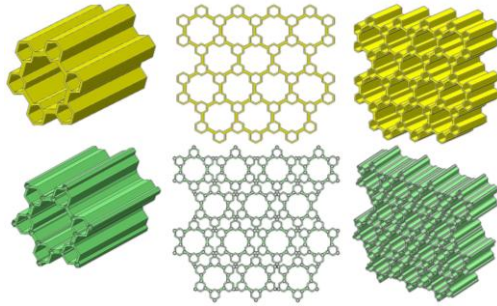
با وجود پژوهش‌های متعدد در زمینه ساختارهای لانه زنبوری و فرامواد آگزتیک، بیشتر مطالعات پیشین بر بررسی ساختارهای متداول یا تغییر محدود پارامترهایی مانند ضخامت دیواره‌ها و اندازه سلول واحد متمرکز بوده‌اند. در این میان، تأثیر ایجاد اصلاحات هدفمند در هندسه سلول برای بهبود مکانیزم تغییر شکل و افزایش ظرفیت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

پلی لاکتیک اسید PLA یک پلیمر زیست پایه و زیست تخریب پذیر 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 سانتی گراد است که آن را برای چاپ سه بعدی ایده آل 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].



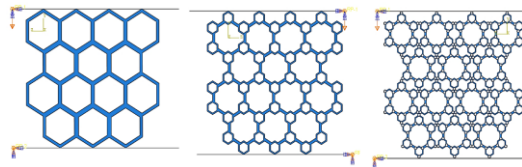
شکل ۱-۲ آزمایش کشش PLA+ (الف) سه نمونه استاندارد (ب) نمونه نصب شده در دستگاه Santam، (ج) نمودار تنش-کرنش



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

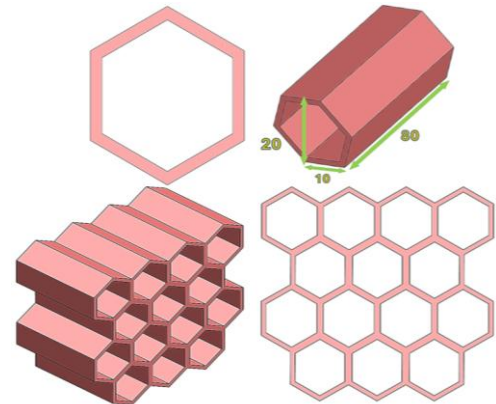
۲ شبیه سازی المان محدود

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}.



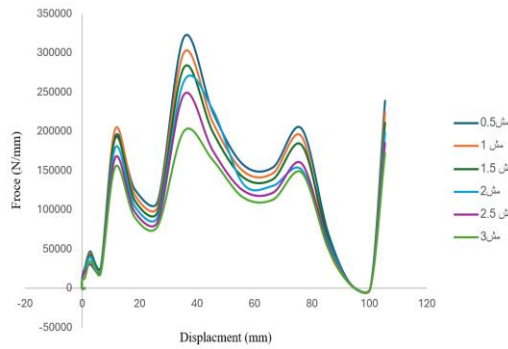
شکل ۱-۲ شبیه سازی المان محدود هر سه ساختار لانه‌زنبوری توسط نرم افزار آباکوس

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



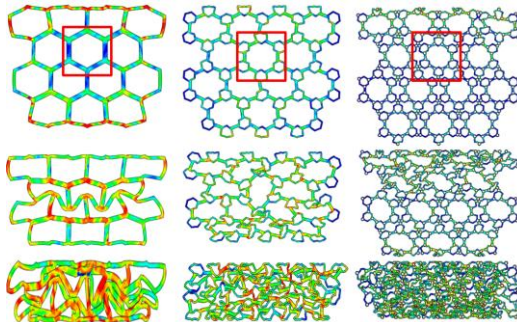
شکل ۱-۳ طراحی و ابعاد ساختار فراماده لانه‌زنبوری

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 به وضوح 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 ب 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
۲	۰.۰۲۴	۵

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 ریزش 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.

آن فروپاشی پیشرونده تحت یک بار تقریباً ثابت رخ می دهد. پس از آن، ناحیه تراکم ایجاد می شود، جایی که فشرده سازی مداوم منجر به افزایش سریع تنش به دلیل فشردگی مواد می شود. شناسایی شروع تراکم در مواد غیرفلزی، مانند پلیمرها یا شبکه های سلولی، چالش برانگیز است، زیرا منحنی های نیرو-جابجایی اغلب قله های متعددی را در ناحیه فلات نشان می دهند، که ممکن است کاملاً مسطح نباشند. در نتیجه، معیارهای مختلفی برای تخمین ϵ_d پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر، روش بهره وری انرژی برای تعیین شروع فشردگی، با راندمان جذب انرژی که با رابطه (۲) تعریف شده است، استفاده شد [۲۳].

$$\eta(\epsilon) = \frac{\int_{\epsilon_0}^{\epsilon} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon)} \quad (2)$$

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 می شود. کرنش مربوط به حداکثر بازده جذب انرژی به عنوان کرنش چگالی، ϵ_d در نظر گرفته می شود. انرژی جذب شده در واحد جرم، که به عنوان جذب انرژی خاص SEA_m نشان داده می شود، معمولاً برای ارزیابی و مقایسه عملکرد جذب انرژی مواد مختلف و پیکربندی های ساختاری استفاده می شود.

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

میانگین نیروی خرد کننده (MCF) 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.

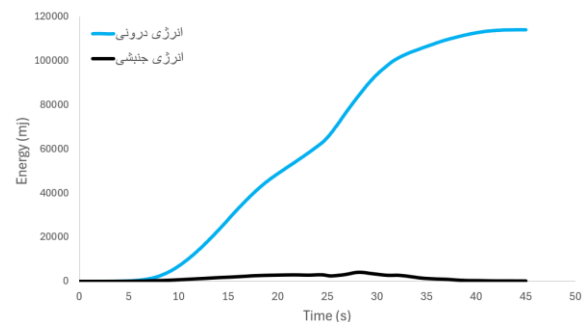
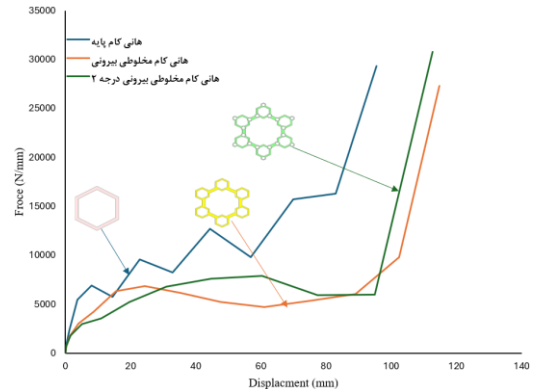
$$MCF = \frac{EA}{d} \quad (4)$$

راندمان نیروی خرد کننده (CFE) به عنوان نسبت نیروی خرد کننده متوسط (MCF) به نیروی خرد کننده پیک تعریف می شود و می توان آن را بر اساس رابطه (۵) محاسبه کرد. برای یک جاذب انرژی ایده آل، حداکثر مقدار CFE 1 است. این پارامتر اندازه گیری مستقیمی از اثربخشی جاذب در اتلاف یکنواخت نیروها و به حداقل رساندن نوسانات نیرو در طول فرآیند تغییر شکل ارائه می دهد.

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

در معادله بالا، PCF نیروی خرد کننده اوج نشان می دهد، 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 سازه ها تحت بارگذاری دینامیک و ضربه است، به طور ذاتی با جرم ماده یا سازه رابطه مستقیم دارد؛ به این معنا که با افزایش جرم،

و دره های متناوب در منحنی نیرو-جابجایی می شود، به گونه ای که هر قله با فروپاشی یک لایه متناظر است. نتایج به دست آمده از تحلیل عددی تطابق بسیار خوبی با داده های آزمایشگاهی نشان می دهند. این رفتار مرحله ای فروپاشی که در برخی ساختارهای لانه زنبوری نیز مشاهده می شود، منجر به ایجاد ناحیه تنش پایدار گسترده و پایدار شده و در نتیجه ظرفیت جذب انرژی ویژه سازه را به طور قابل توجهی افزایش می دهد.



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

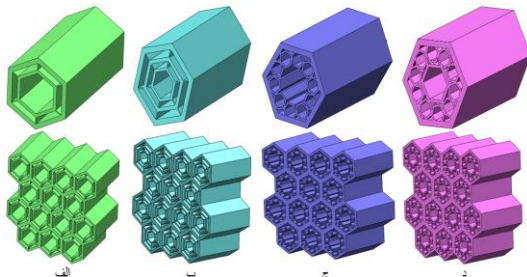
۳-۲ محاسبه جذب انرژی

وظیفه اصلی جاذب های انرژی کاهش انتقال نیروهای مخرب به اجزای سازه ای یا تجهیزات حساس است. به طور کلی، پاسخ تنش-کرنش چنین موادی را می توان به سه ناحیه مجزا تقسیم کرد: ناحیه الاستیک خطی، ناحیه پایداری تنش یا بخش تقریباً ثابت نیرو و منطقه متراکم شدن. کل انرژی جذب شده در طول فرآیند خرد کردن یا فشرده سازی با ادغام ناحیه زیر منحنی نیرو-جابجایی تا شروع فشردگی کرنش، همانطور که در رابطه (۱) بیان شده است، اندازه گیری می شود.

$$EA = \int_0^L F(x) dx = \int_0^{\epsilon_d} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

که در آن، EA نشان دهنده انرژی جذب شده است، $f(x)$ و dx به ترتیب نیروی فشاری، جابجایی و طول فشردگی اعمال می شوند. 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 می شود. در مواد فلزی، پس از مرحله الاستیک اولیه، یک منطقه فلات معمولاً ظاهر می شود که در

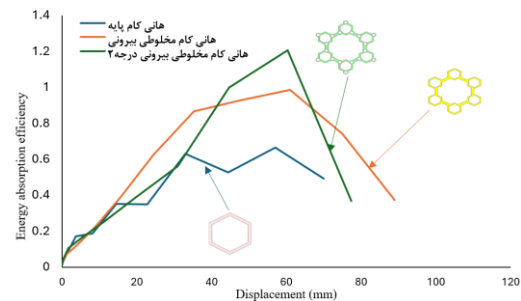
شده است. در این نوآوری، بدون اعمال تغییر در ابعاد و اندازه‌ی کلی ساختارها، آرایش اجزای سازه‌ای به‌گونه‌ای طراحی شده است که ساختارهای لانه‌زنبوری درون یکدیگر قرار گرفته و در نقاط میانی دارای نواحی اشتراک هندسی و سازه‌ای باشند. این نوع پیکربندی، نگرشی نوین در فرآیند توسعه و بهینه‌سازی ساختارهای لانه‌زنبوری 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 ۱-۳ 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 ۲-۵ 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.

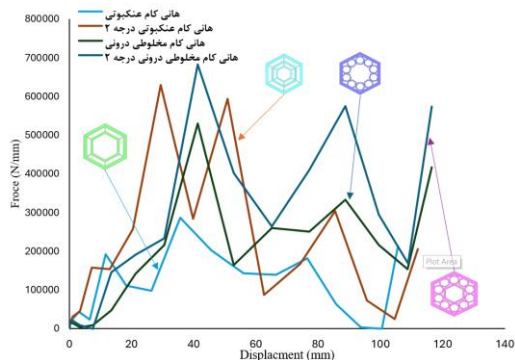
جدول ۲-۲ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده

لانه‌زنبوری	جرم (g)	EA _h (KJ)	SEA _h (KJ/m ³)	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	۶۸۴۲/۸
لانه‌زنبوری مخلوطی درجه دوم	۵۳۵/۱	۰/۶۵	۱/۲	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۱۴	۷۹۲۱/۶۲

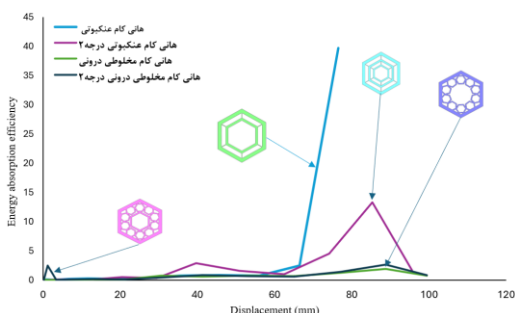
۳ نوآوری هندسی

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 به عنوان شاخصی کمی جهت ارزیابی کارکرد کلی ساختارهای نوآورانه‌ی لانه‌زنبوری مورد استفاده قرار گیرد. مطابق با شکل ۳-۴ و شکل ۳-۵، نمودارهای نیرو-جابجایی و راندمان-جابجایی مربوط به ساختارهای نوآورانه‌ی لانه‌زنبوری ارائه شده‌اند که از طریق آن‌ها می‌توان رفتار مکانیکی، نحوه‌ی جذب انرژی و عملکرد سازه‌ای این ساختارها را در شرایط مختلف بارگذاری تحلیل و مقایسه نمود.



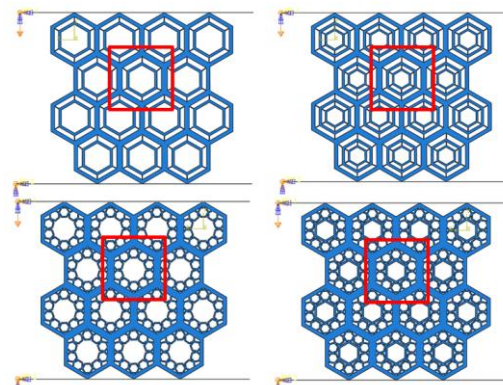
شکل ۳-۴ نمودار نیرو-جابجایی ساختارهای نوآورانه لانه‌زنبوری



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

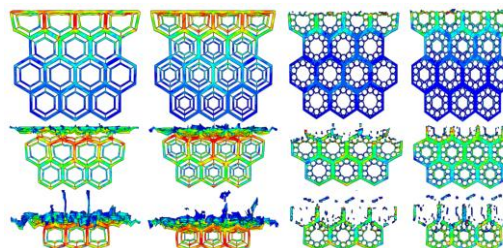
برای محاسبه جذب انرژی ویژه بر پایه جرم محاسبه خواهد شد طبق طراحی انجام شده است جرم ساختار نوآورانه لانه‌زنبوری عنکبوتی ۲۵.۹۳ گرم ساختار لانه‌زنبوری عنکبوتی درجه ۲ ۶۴۹/۵۲ گرم ساختار لانه‌زنبوری مخروطی درونی ۶۷۳/۵۷ گرم ساختار لانه‌زنبوری مخروطی درونی درجه ۲ ۷۶۶/۵۷ گرم است.

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 لانه‌زنبوری توسط نرم افزار آباکوس

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



شکل ۳-۳ رفتار چهار ساختارهای نوآورانه لانه‌زنبوری تحت شبیه‌سازی شبه استاتیکی

بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده، امکان استخراج و بررسی پارامترهای رفتاری ساختارهای نوآورانه‌ی لانه‌زنبوری فراهم گردیده است.

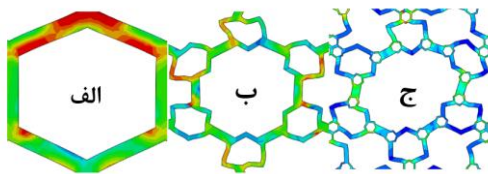
جدول ۳-۱ مقادیر مختلف مقایسه جذب انرژی بدست آمده ساختارهای نوآورانه لانه زنبوری

نمونه	جرم (g)	EA _q (KJ)	SEA _q (KJ/m ²)	MCF (N)	CFE	PCF (N)
لانه زنبوری عنبکوتی	۵۵۲/۹۳	۲۱/۵۶	۳۸/۹	۰/۳۸	۰/۰۰۰۰۹۸	۲۸۶۴/۷
لانه زنبوری عنبکوتی درجه ۲	۶۴۹/۵۲	۴۵/۲۷	۶۹/۷	۰/۵۳	۰/۰۰۰۰۸۴	۶۳۰۲/۳۰
لانه زنبوری مخلوطی درونی	۶۷۳/۵۷	۳۸/۵۲	۵۷/۱	۰/۴۳	۰/۰۰۰۰۸۱	۵۳۰۴/۱۵
لانه زنبوری مخلوطی درونی درجه ۲	۷۶۶/۵۷	۵۶/۳۸	۷۳/۵	۰/۶۳	۰/۰۰۰۰۹۳	۶۸۳۰/۲۲

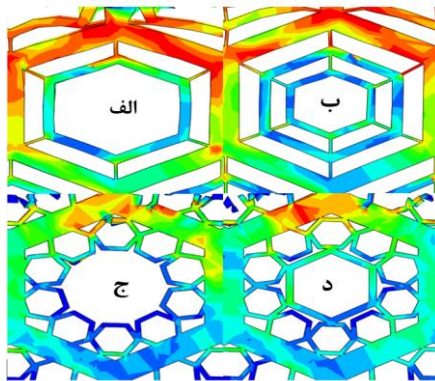
۴ نتیجه گیری

به منظور دستیابی به یک جمع بندی نظام مند و مبتنی بر تحلیل درباره عملکرد ساختارهای لانه زنبوری و پیکربندی های توسعه یافته از آن، ابتدا باید اشاره کرد که ساختار لانه زنبوری یکی از پایدارترین و کارآمدترین هندسه ها در طراحی سازه های جاذب انرژی و فرامواد مکانیکی محسوب می شود. این ساختار به دلیل نسبت استحکام به وزن مناسب، قابلیت توزیع تنش و رفتار پایدار در ناحیه پس کمانش، همواره به عنوان یک ساختار پایه در پژوهش های مرتبط با جذب انرژی مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش تلاش شد تا با حفظ ویژگی های 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 برون سو و اصلاحات درون سو طبقه بندی 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 جذب شده در واحد تغییر طول است؛ بنابراین مقدار آن وابستگی مستقیمی به جذب انرژی ویژه ساختار دارد و در عمل نرخ جذب انرژی را توصیف می کند. بدیهی است که مقادیر بالاتر این پارامتر نشان دهنده عملکرد بهتر و بازده بالاتر ساختار در فرآیند جذب انرژی است. در ادامه، پارامتر PCF به عنوان بیشینه نیروی قابل تحمل توسط ساختار تعریف می شود؛ 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 می تواند تحمل کند. پس از رسیدن به این نقطه، با آغاز ناپایداری و شکست موضعی، نیروی تحمل شده کاهش می یابد. این پارامتر یکی از مهم ترین شاخص ها در اصلاح و بهینه سازی هندسی ساختارها محسوب می شود، زیرا در ساختارهایی با ابعاد و جرم تقریباً مشابه، مهم ترین عامل مؤثر بر جذب انرژی، کاهش تمرکز تنش و افزایش مشارکت اجزای مختلف سلول در فرآیند تغییر شکل است. بر همین اساس، PCF معیار اصلی مقایسه میان ساختارهای دارای اصلاحات برون سو و درون سو در این پژوهش بوده است. همچنین پارامتر CFE که نسبت نیروی میانگین لهیدگی به بیشینه

نیروی لهیدگی است، معیاری برای ارزیابی میزان نزدیکی رفتار ساختار به یک جاذب انرژی ایده آل به شمار می رود. این شاخص نشان می دهد که ساختار تا چه میزان قادر است در طول فرآیند لهیدگی، رفتار پایدار و نزدیک به حالت ایده آل از خود نشان دهد. بر اساس این تعاریف، عملکرد شکل ۵-۲ و شکل ۴-۳ ارائه شده است. به منظور انجام مقایسه ای دقیق، سلول واقع در ردیف دوم و مرکز ساختار در تمامی نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۳-۲ و شکل ۳-۳ با مستطیل قرمز مشخص شده است. تمامی تصاویر تحت شرایط جابه جایی یکسان، زمان شبیه سازی یکسان و بر اساس معیار تنش فون مایز استخراج شده اند. در ساختارهای لانه زنبوری، به طور کلی تمرکز تنش در سمت اعمال نیرو مشاهده می شود.



شکل ۴-۱ کانتور تنش فون مایز در سلول ساختارهای (الف) لانه زنبوری ساده (ب) لانه زنبوری مخلوطی (ج) لانه زنبوری مخلوطی درجه دوم



شکل ۴-۲ کانتور تنش فون مایز در سلول ساختارهای (الف) لانه زنبوری عنبکوتی (ب) لانه زنبوری عنبکوتی درجه ۲ (ج) لانه زنبوری مخلوطی درونی (د) لانه زنبوری مخلوطی درونی درجه ۲

در ساختارهای دارای اصلاحات برون سو، مشاهده شد که علاوه بر تمرکز تنش در بخش فوقانی سلول، در نواحی اتصال بازوها نیز تمرکز تنش شدیدی ایجاد می شود. در ساختار لانه زنبوری 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 لانه زنبوری مخلوطی درجه دوم نیز تکرار شد، با این تفاوت که کوچک تر شدن هندسه داخلی باعث کاهش استقامت سازه و افزایش شدت شکست شد. در نتیجه، برخلاف فرض اولیه که تخریب تدریجی اجزای بیرونی می توانست موجب انتقال مرحله ای بار و افزایش جذب انرژی شود، افزایش

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," *Mechanic 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 ۱۴۰۴ برابر، ساختار عنکبوتی درجه دوم حدود ۲۵۰۸ برابر، ساختار مخلوطی درونی حدود ۲۱۰۱ برابر و ساختار مخلوطی درونی درجه دوم حدود ۲۷۰۲ 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 شبکه‌های 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

