



Journal of Aerospace Defense

Volume 5 Issue ...
Season Year
P.P 1-25



Research Paper;



Experimental Analysis of the Energy Absorption Properties of Foam-Filled Sunflower-Inspired Honeycomb Structures Combined with Re-Entrant Geometry under Out-of-Plane Quasi-Static Loading

Reza Sarkhosh¹, Mohammad Kazemi Nasrabadi², Mahdi zandieh³

1- Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Associated Professor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- MSC Student in Aerospace, Graduate Center, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Ira

Article Information

Abstract

Accepted:

2026/06/18

Received:

2026/04/17

Keywords:

Honeycomb structure, energy absorber, 3D printer, sunflower, re-entrant structure, Quasi-Static Loading

Corresponding Author:

Reza Sarkhosh

Email:

R.sarkhosh@ssau.ac.ir

Abstract

Introduction: Bio-inspired cellular structures and auxetic geometries have attracted considerable attention due to their superior energy absorption capabilities and deformation characteristics. However, the combined effects of sunflower-inspired radial arrangement, re-entrant geometry, and foam filling on the mechanical response and energy absorption performance of cellular structures remain largely unexplored.

Methods: This study experimentally investigates the quasi-static compressive behavior of conventional honeycomb, sunflower-inspired, and hybrid sunflower re-entrant lattice structures in both hollow and polyurethane foam-filled configurations. The specimens were fabricated using three-dimensional (3D) printing technology with polylactic acid (PLA) material and tested under quasi-static compression.

Findings: The results demonstrated that cellular geometry significantly influences the buckling mechanism, deformation stability, and energy absorption capacity. The hybrid sunflower re-entrant structure exhibited a more uniform stress distribution and a more progressive collapse mode than the conventional honeycomb structure due to its auxetic behavior and radial-spiral arrangement. Furthermore, polyurethane foam increased the initial stiffness, delayed the onset of buckling, and improved the progressive crushing behavior. The proposed structure achieved a 112% increase in energy absorption, a 6% improvement in specific energy absorption, and a 3% enhancement in crushing force efficiency compared with the conventional honeycomb structure.

Conclusion:

The synergistic combination of sunflower-inspired geometry, re-entrant auxetic configuration, and polyurethane foam filling considerably enhances the energy absorption performance and deformation stability of cellular structures, indicating significant potential for applications in aerospace, automotive, and sandwich panel systems.

Reza Sarkhosh, Mohammad Kazemi Nasrabadi, Mahdi zandieh. (2026). Experimental Analysis of the Energy Absorption Properties of Foam-Filled Sunflower-Inspired Honeycomb Structures Combined with Re-Entrant Geometry under Out-of-Plane Quasi-Static Loading. Aerospace Defense, Vol 1 (Issue5), Page 1.-25



فصلنامه علمی دفاع هوافضایی

دوره ۵، شماره ۱
بهار ۱۴۰۵
صفحات ۱-۲۵



مقاله پژوهشی؛

تحلیل تجربی خواص جذب انرژی ساختار لانه زنبوری پر شده با فوم الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت تحت بارگذاری شبه استاتیکی خارج از صفحه

صفحه

رضا سرخوش^۱، محمد کاظمی نصرآبادی^۲، مهدی زندیه^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحصیلات تکمیلی، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

مقدمه: ساختارهای سلولی زیست الهام گرفته و هندسه‌های آگزتیک به دلیل قابلیت بالای جذب انرژی و ویژگی‌های مطلوب تغییر شکل، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. با وجود مطالعات متعدد درباره ساختارهای آگزتیک، زیست الهام و پر شده با فوم، تأثیر همزمان آرایش شعاعی الهام گرفته از گل آفتابگردان، هندسه ری اینترانت و پرشدگی فومی بر رفتار مکانیکی و عملکرد جذب انرژی این ساختارها تاکنون به طور جامع بررسی نشده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۱/۲۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۳/۲۸

کلیدواژه‌ها:

روش: در این پژوهش، رفتار مکانیکی ساختارهای مشبک زیست الهام گرفته تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیکی به صورت تجربی بررسی شدند. هندسه‌های مورد مطالعه شامل ساختار لانه زنبوری متداول، ساختار الهام گرفته از گل آفتابگردان و ساختار هیبریدی گل آفتابگردان-ری اینترنت بودند. نمونه‌ها با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی و از جنس پلی لاکتیک اسید (PLA) ساخته شدند و در دو حالت توخالی و پر شده با فوم پلی اورتان مورد آزمون قرار گرفتند.

ساختار لانه زنبوری،

جاذب انرژی،

پرینتر سه بعدی،

گل آفتابگردان،

ساختار ری اینترنت

بارگذاری شبه

استاتیکی

یافته‌ها: نتایج نشان داد که هندسه سلولی نقش مهمی در مکانیزم کمانش، پایداری تغییر شکل و ظرفیت جذب انرژی دارد. ساختار ترکیبی گل آفتابگردان-ری اینترنت به دلیل رفتار آگزتیک و آرایش شعاعی-ماریچی خود، نسبت به ساختار لانه زنبوری متداول، توزیع تنش یکنواخت‌تر و فروریزش تدریجی تری را ایجاد کرد. همچنین، افزودن فوم پلی اورتان موجب افزایش سفتی اولیه، تأخیر در شروع کمانش و بهبود رفتار فروریزش تدریجی شد. نتایج تجربی نشان داد که ساختار پیشنهادی در مقایسه با لانه زنبوری متداول، افزایش ۱۱۲ درصدی جذب انرژی، بهبود ۶ درصدی جذب انرژی ویژه و افزایش ۳ درصدی بازده نیروی لهدگی را فراهم می‌کند.

نویسنده مسئول:

رضا سرخوش

نتیجه گیری: تلفیق هندسه الهام گرفته از گل آفتابگردان، پیکربندی آگزتیک و پرشدگی با فوم پلی اورتان، موجب بهبود چشمگیر عملکرد جذب انرژی و پایداری تغییر شکل سازه‌های سلولی می‌شود. این ساختار می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در جاذب‌های انرژی صنایع هوافضا، خودروسازی و پنل‌های ساندویچی مورد استفاده قرار گیرد.

ایمیل:

R.sarkhosh@ssau.ac.ir

استناد: رضا سرخوش، محمد کاظمی نصرآبادی، مهدی زندیه. (۱۴۰۵). تحلیل تجربی خواص جذب انرژی ساختار لانه زنبوری پر شده با فوم الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت تحت بارگذاری شبه استاتیکی خارج از صفحه. مجله دفاع هوافضایی، دوره ۵ (شماره ۱)، صفحه ۱-۲۵.

۱- مقدمه

الهام و الگو گرفتن از طبیعت، همواره ایده‌ای ارزشمند برای طراحی سازه‌های متخلخل و مشبک با وزن کم و استحکام بالا بوده است؛ این ساختارها علاوه بر کاهش وزن، ظرفیت بالایی در جذب انرژی ارائه می‌دهند [۱-۳]. نگوک سان‌ها و همکاران [۴] بر اهمیت کاربرد این سازه‌های سبک در مهندسی تأکید کرده و نشان دادند که نمونه‌های الهام‌گرفته از طبیعت، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به ساختارهای سنتی دارند. امروزه در حوزه‌های مهندسی خودرو، هوافضا و صنایع دریایی، ارزیابی رفتار فروریزش سازه‌ها نقشی کلیدی در ارتقای ایمنی دارد؛ جایی که هدف اصلی طراحی، جذب بیشترین انرژی جنبشی با کمترین نیروی فروریزش و نوسانات نیرو جهت محافظت از سرنشینان است [۵، ۶]. جونز [۷] ضمن نگارش کتابی در زمینه ضربه در سازه‌های مهندسی، به تفصیل مبانی عملکردی ضربه گیرهای مکانیکی را بیان نمود. سلوکی و همکاران [۸] امروزه تولید هندسه‌های پیچیده به کمک فناوری ساخت افزایشی (چاپ سه بعدی) با موادی مانند پلی‌لاکتیک اسید به دلیل زیست تخریب پذیری و وابستگی خواص مکانیکی آن به پارامترهای فرآیند چاپ (مانند چگالی و جهت پرشدگی) کاربرد گسترده‌ای یافته است.

مطالعات متعددی به بررسی رفتار جذب انرژی در سازه‌های سلولی و کامپوزیتی پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اصلاح هندسه ساختار، استفاده از پرکننده‌های فومی و توسعه مواد کامپوزیتی پیشرفته می‌تواند به طور مؤثری ظرفیت جذب انرژی، مقاومت در برابر ضربه و پایداری تغییرشکل سازه‌ها را بهبود بخشد. همچنین، بررسی عملکرد سازه‌ها تحت بارهای بالستیکی و انفجاری بیانگر آن است که طراحی بهینه و به‌کارگیری تقویت‌کننده‌های مناسب نقش مهمی در ارتقای عملکرد جذب انرژی و افزایش قابلیت تحمل بارهای شدید و دینامیکی ایفا می‌کند [۹-۱۴]. پژوهشگران متعددی به ارزیابی عددی و تجربی این ساختارها پرداخته‌اند؛ مظاهری و همکاران [۱۵] یک فراسازه چند سلولی اوربگامی نوین را تحت فشار محوری بررسی کردند و نشان دادند که تغییر در تعداد لایه‌ها و نسبت اضلاع، جذب انرژی را تا ۹۷ درصد نسبت به سازه‌های غیراوربگامی افزایش می‌دهد. ملاطفی و همکاران [۱۶] دریافتند که پرکردن هسته‌های لانه‌زنبوری آلومینیومی با فوم پلی‌اورتان تحت بارگذاری فشاری، مقاومت سازه را به شکل چشمگیری ارتقا می‌دهد. گله‌داری و همکاران [۱۷] با توسعه یک رابطه تحلیلی برای تنش‌های درون صفحه‌ای مبتنی بر مدل سخت شونده‌ی توانی، اثبات کردند که مدرج (گرادیانی) بودن ساختار لانه‌زنبوری تحت بار درون صفحه‌ای، شدت نیروی ضربه انتقال‌یافته را کاهش داده و احتمال آسیب را کمینه می‌کند. همچنین علی‌صادقی و فضیلتی [۱۸] با تعریف تابع هدف کمینه سازی جرم و حجم تحت محدودیت‌های بیشینه نیروی مجاز، ساختارهای لانه‌زنبوری آلومینیومی را به عنوان گزینه‌ای کارآمد برای جذب انرژی و کاهش شوک بهینه سازی کردند. در ارزیابی خواص خمشی نیز گبریهیوات و همکاران [۱۹] رفتار تیرهای تقویت شده با طرح‌های مختلف را بررسی کردند و نشان دادند طرح لانه‌زنبوری به

دلیل بیشترین ممان اینرسی، بهترین پاسخ نیرو-جابجایی را دارد، در حالی که طرح مربعی ضعیف ترین عملکرد و طرح لوزی بیشترین خیز پیش از گسیختگی را ثبت کردند.

بخش مهمی از تحقیقات به ساختارهای آگزتیک با ضریب پواسون منفی اختصاص دارد. سروستانی و همکاران [۲۰] تحت آزمایش شبه‌استاتیک نشان دادند که پنل‌های ساندویچی با هسته آگزتیک ظرفیت جذب انرژی بالاتری نسبت به هسته‌های مستطیلی و شش وجهی دارند. اینگرو و همکاران [۲۱] نیز اثبات کردند که ساختار آگزتیک ترکیبی و تقویت شده، استحکام فشاری درون صفحه‌ای را ۳۰۰ درصد نسبت به لانه‌زنبوری معمولی و ۶۵ درصد نسبت به آگزتیک ساده افزایش می‌دهد. شفیع‌پور و بروغنی [۲۲] با ارزیابی عددی سازه‌های لانه‌زنبوری با سختی منفی تحت بار شبه‌استاتیکی دریافتند که اعمال ضخامت متغیر (هدفمند) به دلیل ایجاد موده‌های کم‌انرژی پیچیده‌تر، عملکرد جذب انرژی را ۵۷ درصد نسبت به ضخامت یکنواخت بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، لیاقت و همکاران [۲۳] با مقایسه تجربی سه هندسه آگزتیک (ری اینترنت، سرنیزه‌ای و آنتی تتراکایرال) با لانه‌زنبوری معمولی تحت بار فشاری شبه‌استاتیک، برتری سازه‌های آگزتیک را تأیید کردند؛ به طوری که جذب انرژی سازه سرنیزه‌ای ۱۶۱ درصد بیشتر از نمونه معمولی بود. رانگ یو و همکاران [۲۴] نیز نشان دادند که ترکیب سلول‌های واحد ری اینترنت آلومینیومی با فوم پلی‌اورتان تحت فشار صفحه‌ای، به دلیل تحمل تنش بالاتر، قابلیت جذب انرژی ویژه بالاتری نسبت به لانه‌زنبوری معمولی ایجاد می‌کند. شفیع‌خانی و همکاران [۲۵] اثبات کردند ساختارهای آگزتیک ری اینترنت حداقل ۵۷.۷۵ درصد انرژی بیشتری نسبت به لانه‌زنبوری‌های معمولی جذب می‌کنند و این توانایی به ویژگی‌های هندسی سلول واحد و جنس ماده وابسته است. در همین راستا، مونیس و همکاران [۲۶] با بررسی نمونه‌های چاپ سه بعدی از جنس پلی‌لاکتیک اسید و ^۱ABS نشان دادند تغییرات هندسی سلول‌ها تا ۲۰ درصد و تغییر جنس ماده تا ۱۱ درصد بر مقدار ضریب پواسون منفی ساختارهای ری اینترنت اثرگذار است. در کاربردهای کامپوزیتی و سازه‌ای نیز، آقازاده [۲۷] نشان داد کامپوزیت‌های پلی‌اورتانی تقویت شده با پارچه‌های آگزتیک، در آزمون ضربه سرعت پایین ۸ تا ۹ برابر انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های غیرآگزتیک جذب می‌کنند. شکرالهی و همکاران [۲۸] در آزمون خمش چهار نقطه‌ای ساندویچ پنل‌های پلی‌لاکتیک اسید با رویه چوب بالسا گزارش کردند که هسته‌های آگزتیک عملکردی برتر نسبت به طرح‌های سرنیزه‌ای و لانه‌زنبوری دارند و افزایش ابعاد سلولی بدون افزایش وزن، استحکام را بهبود می‌بخشد. در سال‌های اخیر، تمرکز ویژه‌ای بر روی الگوهای پیشرفته تر صورت گرفته است؛ سرخوش [۲۹] با معرفی یک هندسه لانه‌زنبوری جدید که دیواره‌های داخلی آن با الگوی مارپیچی شش ضلعی تقویت شده بود، نشان داد این سازه در هر دو حالت خالی و پرشده با فوم تحت بارگذاری درون صفحه‌ای، جذب انرژی و جذب انرژی ویژه بالاتری نسبت به طرح سنتی دارد. وی در پژوهشی دیگر [۳۰]، یک ساختار لانه‌زنبوری گرادپانی نوآورانه را که الگوی تکرار سلول‌های آن از گل آفتابگردان الهام گرفته شده بود، تحت

بارگذاری فشاری خارج از صفحه مورد آزمایش قرار داد، نتایج تجربی بهبود ۴ و ۶ درصدی را در جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهدیگی نسبت به ساختار سنتی تایید کرد. سرخوش [۳۱] همچنین ساختار لانه‌زنبوری دیگری را معرفی نمود که دیواره‌های داخلی آن با فنر شش ضلعی تقویت شده بود؛ این سازه تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی خارج از صفحه، در حالت خالی با ۱۴ درصد افزایش جذب انرژی و ۲۴ درصد افزایش راندمان نیروی لهدیگی، و در حالت پر شده با فوم با ۲۱ درصد افزایش جذب انرژی و ۲۶ درصد افزایش راندمان نیروی لهدیگی، عملکرد بهبودیافته‌ای را به ثبت رساند. سرخوش و همکاران [۳۲] یک ساختار لانه‌زنبوری آگزتیک الهام‌گرفته از الگوی گل آفتابگردان با ترکیب هندسه ری اینترنت و پرکننده فوم پلی‌اورتان طراحی و بررسی نمودند. نتایج آزمایش‌های شبه‌استاتیکی داخل صفحه نشان داد که این ساختار نسبت به لانه‌زنبوری متداول افزایش چشمگیری در جذب انرژی و جذب انرژی ویژه دارد. با وجود تحقیقات متعدد درباره ساختارهای لانه‌زنبوری و سازه‌های آگزتیک، تاکنون ترکیب هندسه‌های الهام‌گرفته از طبیعت (مانند الگوی گل آفتابگردان) با ساختارهای آگزتیک مبتنی بر هندسه ری اینترنت و ارزیابی اثر پرشدگی فوم بر رفتار فشاری و ظرفیت جذب انرژی آن‌ها به طور جامع بررسی نشده است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، ارائه‌ی یک ساختار لانه‌زنبوری پر شده با فوم الهام‌گرفته از گل آفتابگردان است که با ساختار ری اینترنت ترکیب شده است. ساختار ری اینترنت به دلیل هندسه‌ی ویژه‌ی خود دارای ضریب پواسون منفی بوده و این ویژگی موجب بروز رفتار آگزتیک در سازه می‌شود. چنین سازه‌هایی به دلیل ماهیت هندسی خود، از مقاومت برشی بالا، مقاومت مطلوب در برابر فرورفتگی و ظرفیت جذب انرژی قابل توجه برخوردارند. به همین دلیل، استفاده از ساختارهای آگزتیک در صنایع هوافضا، خودروسازی و تجهیزات محافظتی به طور فزاینده‌ای در حال گسترش است. در این تحقیق، عملکرد مکانیکی و جذب انرژی ساختار ترکیبی پیشنهادی به صورت تجربی با دو ساختار دیگر شامل لانه‌زنبوری متداول و لانه‌زنبوری پر شده با فوم الهام‌گرفته از گل آفتابگردان مقایسه شده است. برای تحلیل تجربی و ارزیابی مؤلفه‌های ضربه‌پذیری و تغییر شکل، از آزمایش‌های فشار شبه‌استاتیکی استفاده شد. همچنین، در این پژوهش اثر پرکردن ساختار مشبک با فوم پلی‌اورتان سخت بر ظرفیت جذب انرژی و استحکام فشاری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ساختارهای مورد نظر با استفاده از فناوری چاپ سه بعدی و از جنس پلی‌لاکتیک اسید با ابعاد $72 \times 72 \times 72$ میلی‌متر طراحی و ساخته شدند. سپس فوم دو جزئی پلی‌اورتان به فضای خالی میان سلول‌ها تزریق گردید تا ساختارهای پر شده تشکیل شوند. در ادامه، نمونه‌ها تحت آزمون فشاری شبه‌استاتیکی قرار گرفتند و نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش استخراج شد. در نهایت، پارامترهای مرتبط با ضربه‌پذیری شامل جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهدیگی مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفتند. شایان ذکر است که هدف این پژوهش صرفاً ترکیب سه مفهوم مستقل شامل ساختارهای الهام‌گرفته از گل آفتابگردان، هندسه آگزتیک ری اینترنت و پرشدگی فومی نیست، بلکه بررسی اثر متقابل این عوامل بر رفتار مکانیکی و عملکرد جذب انرژی ساختار می‌باشد. در ساختار پیشنهادی، آرایش شعاعی و گرادپانی سلول‌ها موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش و کنترل مسیرهای فروریزش می‌شود، در حالی که هندسه ری اینترنت با ایجاد رفتار آگزتیک،

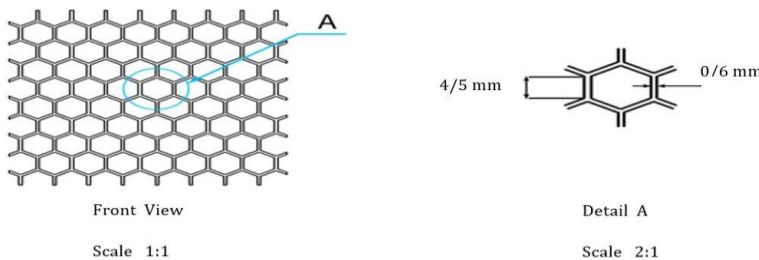
امکان انقباض جانبی همزمان با اعمال بار فشاری را فراهم می‌کند. از سوی دیگر، فوم پلی اورتان با ایجاد تکیه‌گاه داخلی برای دیواره‌های سلولی، از بروز کمناش موضعی زود هنگام جلوگیری کرده و پایداری فرو ریزش را افزایش می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود عملکرد نهایی ساختار تنها حاصل جمع اثرات مستقل این سه عامل نباشد، بلکه ناشی از یک اثر هم افزایی میان هندسه زیست الهام گرفته، رفتار آگزتیک و تقویت فومی باشد. ارزیابی تجربی این اثر هم افزایی و میزان تأثیر آن بر جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهیدگی، یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر است و وجه تمایز آن با مطالعات پیشین محسوب می‌شود. اگرچه مطالعات قبلی به طور جداگانه به ساختارهای آگزتیک ری اینترنت، ساختارهای الهام گرفته از گل آفتابگردان و یا ساختارهای پر شده با فوم پرداخته‌اند، تاکنون اثر همزمان و متقابل این سه عامل بر مکانیزم فرو ریزش، توزیع تنش و جذب انرژی به صورت تجربی بررسی نشده است. نوآوری اصلی پژوهش حاضر صرفاً در ترکیب این مفاهیم نیست، بلکه در بررسی اثر هم افزایی میان گرادیان شعاعی الهام گرفته از گل آفتابگردان، رفتار آگزتیک ناشی از هندسه ری اینترنت و تقویت داخلی ناشی از فوم پلی اورتان نهفته است.

۲- مطالعه تجربی

۲-۱- هندسه ساختار و طراحی نمونه‌ها

در مرحله‌ی نخست، سه نوع ساختار شامل لانه‌زنبوری سنتی، لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان و لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت طراحی گردیدند. هدف از این طراحی، مقایسه‌ی تجربی رفتار مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی این سه ساختار تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی است. به منظور انجام آزمون فشار شبه‌استاتیکی مطابق با استاندارد ASTM D1621 [۳۳]، تمامی نمونه‌ها به صورت مکعبی با ابعاد $72 \times 72 \times 72$ میلی‌متر طراحی شدند. ضخامت دیواره‌ها در تمامی ساختارها $0/6$ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا شرایط هندسی یکسانی برای مقایسه‌ی دقیق فراهم گردد.

ساختار لانه‌زنبوری با مشخصات هندسی ارائه شده در شکل ۱ طراحی شد و به عنوان نمونه‌ی مرجع در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مراحل بعد، ساختارهای الهام گرفته از گل آفتابگردان و ساختار ترکیبی نیز بر اساس الگوهای هندسی مربوطه مدل سازی شدند.

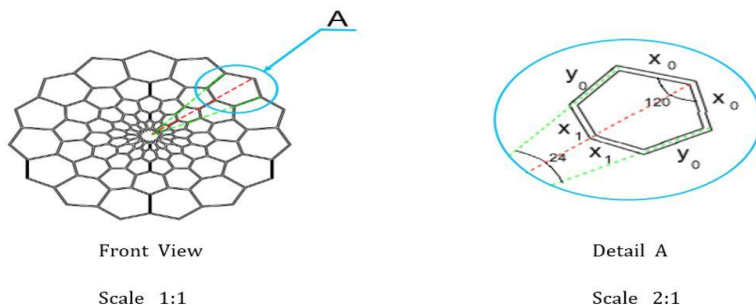


شکل ۱: هندسه لانه‌زنبوری سنتی

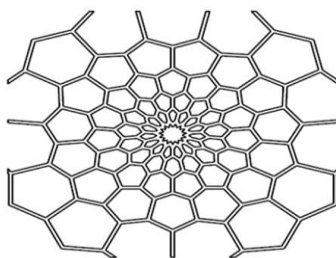
هندسه‌ی ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان مطابق شکل ۲ طراحی شد. در این ساختار، سلول‌های شش ضلعی به صورت تدریجی به سمت مرکز کشیده می‌شوند و با کاهش اندازه‌ی سلول‌ها، الگوی شعاعی مشابه آرایش طبیعی دانه‌های گل آفتابگردان ایجاد می‌گردد. در این هندسه اضلاع با نمایه Y در امتداد خطوطی قرار دارند که از مرکز ساختار منشأ می‌گیرند. نقاط اتصال بین خطوط متقارن X و خطوط متقارن Y بر روی خطوط شعاعی عبوری از مرکز واقع شده‌اند. خطوط هم نام نسبت به خط چین قرمز مشخص شده در شکل دارای تقارن هندسی هستند. ابعاد سلول مرتبه صفر سازه، به صورت $X_0=8/7\text{mm}$ ، $Y_0=8/7\text{mm}$ ، $\alpha=24^\circ$ و $\beta=120^\circ$ تعریف می‌شود. سلول‌های واحد شش ضلعی با تکرار در راستای محیطی، مرتبه‌ی صفر ساختار را تشکیل می‌دهند. در ساختار گرادسانی، با کاهش شعاع از محیط به سمت مرکز، مرتبه‌ی سلول‌ها افزایش یافته و ابعاد آن‌ها مطابق با روابط ۱ و ۲ به صورت تدریجی کاهش می‌یابد تا در نهایت کوچک‌ترین سلول‌ها در مرکز ساختار شکل گیرند [۳۰]. هندسه برش خورده مربعی لانه زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$X_n = X_{n-1} \times 0.7 (n \geq 1) \quad (1)$$

$$Y_n = Y_{n-1} \times 0.7 (n \geq 1) \quad (2)$$



شکل ۲: هندسه لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان

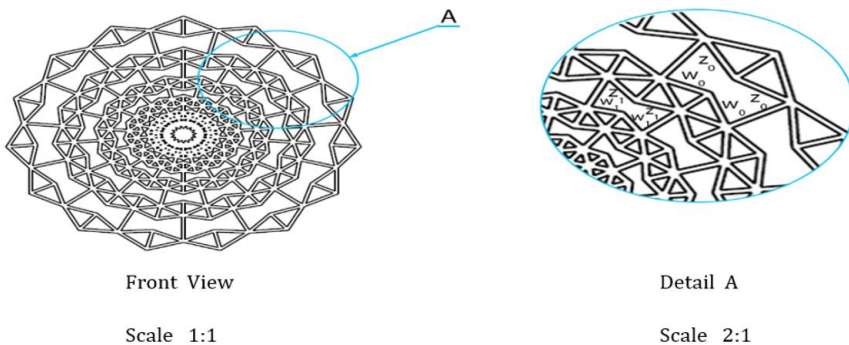


شکل ۳: هندسه برش خورده مربعی لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان

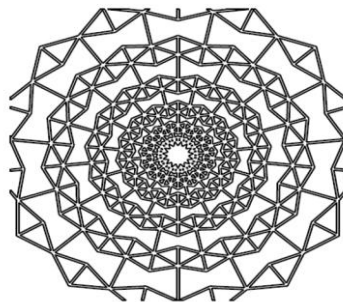
هندسه‌ی ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت مطابق شکل ۴ طراحی شد. که سلول‌های ری اینترنت با کشیده شدن به سمت مرکز که با کوچک تر شدن اندازه سلول همراه است شکل می‌گیرد. نقاط اتصال بین دو ضلع متقارن بالا ساختار ری اینترنت با نماد Z و دو ضلع متقارن پایین ساختار با نماد W بر روی خطوط شعاعی منشأ گرفته از مرکز قرار دارند. خطوط هم نام نسبت به هم در شکل دارای تقارن هندسی هستند. ابعاد سلول مرتبه صفر سازه، به صورت $Z_0=7/8\text{mm}$, $W_0=6/2\text{mm}$ تعریف می‌شود. سلول‌های واحد ری اینترنت با تکرار در راستای محیطی، مرتبه‌ی صفر ساختار را تشکیل می‌دهند. در ساختار گرادیانی، با کاهش شعاع از محیط به سمت مرکز، مرتبه‌ی سلول‌ها افزایش یافته و ابعاد آن‌ها مطابق با روابط ۳ و ۴ به صورت تدریجی کاهش می‌یابد تا در نهایت کوچک‌ترین سلول‌ها در مرکز ساختار شکل بگیرند. همچنین در شکل ۵ هندسه برش خورده مربعی لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت نشان داده شده است.

$$Z_n = 7.8 - 0.01665(n)^4 + 0.0999(n)^3 + 0.11685(n)^2 - 2.6(n) \quad (3)$$

$$W_n = 6.2 + 0.0333(n)^3 + 0.401(n)^2 - 2.3675(n) \quad (4)$$



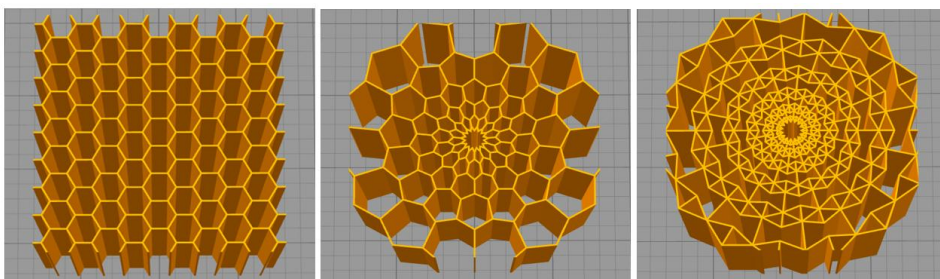
شکل ۴: هندسه لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت



شکل ۵: هندسه برش خورده مربعی لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

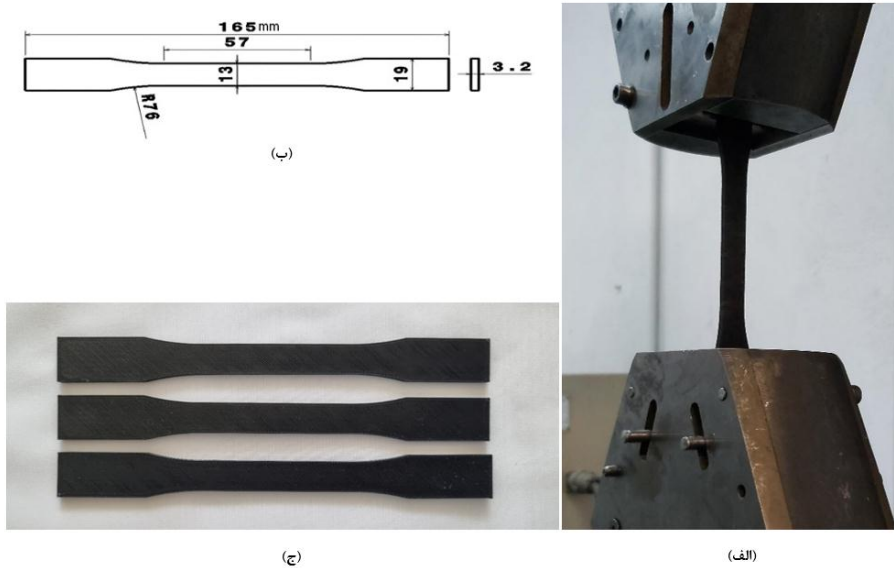
مدل‌های مورد بررسی با استفاده از ابعاد تعیین شده در نرم افزار CATIA طراحی شدند سپس فایل‌های حاصل به منظور آماده سازی برای چاپ سه بعدی، به فرمت STL تبدیل گردیدند. نمونه‌ها به روش ساخت افزایشی و با استفاده از فناوری FDM که یکی از روش‌های پیشرفته در تولید قطعات پلیمری محسوب می‌شود ساخته شدند. در این فرآیند ماده‌ی پلی‌لاکتیک اسید که یک ترموپلاستیک زیست تخریب‌پذیر است، از طریق حرارت دهی در نازل ذوب شده و به صورت لایه‌به‌لایه در مسیر از پیش تعیین شده رسوب داده می‌شود تا قطعه نهایی شکل گیرد. در این مطالعه، از چاپگر سه بعدی مدل CREALITY K1 MAX برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. به منظور جلوگیری از نیاز به ساخت تکیه‌گاه، قطعات به صورت افقی چاپ شدند. مدل‌های سه بعدی با استفاده از نرم افزار تخصصی 3D Simplify پردازش (شکل ۶) و با اعمال تنظیمات یکسان برای تمامی نمونه‌ها (جدول ۱) فایل‌های استریولیتوگرافی نهایی آماده‌ی چاپ گردیدند. نمایی از مدل‌های آماده سازی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. در مجموع ۱۸ نمونه مکعبی با استفاده از فیلامنت PLA+ برند ESUN (۱/۷۵mm) ساخته شد. برای تعیین خواص مکانیکی ماده‌ی PLA+ مطابق با استاندارد ASTM D638 [۳۴]، نمونه‌های آزمون کشش طبق شکل ۷ مدل سازی و با همان تنظیمات چاپ نمونه‌های اصلی تولید شدند. سپس این نمونه‌ها تحت آزمون کشش قرار گرفتند و نتایج حاصل در شکل ۸ و جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۶: مدل سه بعدی نمونه‌ها در نرم افزار 3D Simplify

جدول ۱: مولفه‌های پرینتر سه بعدی

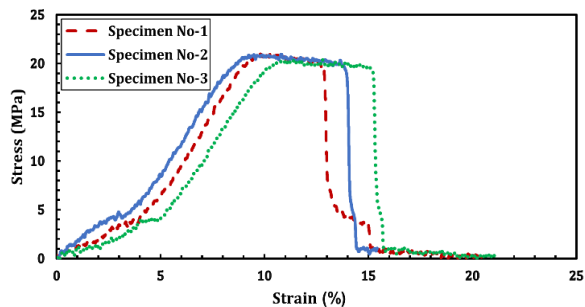
مقدار	مولفه‌های ساخت
۰/۳۰	ارتفاع لایه (mm)
۲۱۰	دمای نازل (C°)
۵۰	دمای صفحه چاپ (C°)
۳۳/۴۰	سرعت پرینت (mm/s)
۰/۴۰	قطر نازل (mm)
۱/۷۵	قطر فیلامنت (mm)



شکل ۷: الف) نحوه قرار گیری نمونه در دستگاه کشش، ب) هندسه نمونه‌های آزمایش کشش، ج) نمونه‌های PLA+ شکل ۷: الف)

جدول ۲: خواص مکانیکی مواد PLA+

مدول یانگ (GPa)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	چگالی (kg/m ³)	جنس مواد
Mean: ۲/۱۸	Mean: ۲۰/۷۲	Mean: ۱۹/۴۰	Mean: ۱/۲۰	PLA+
SD: ۰/۰۷	SD: ۰/۴۷	SD: ۰/۴۲	SD: ۰/۰۱	



شکل ۸: نمودار تنش-کرنش نمونه‌های PLA+

۳-۲- ساخت و تزریق فوم

به منظور بهبود عملکرد جذب انرژی ساختارها، از فوم پلی‌اورتان دو جزئی به عنوان ماده‌ی پرکننده استفاده شد. این فوم به دلیل چگالی پایین و خاصیت انبساط بالا، قادر است فضای خالی سلول‌های

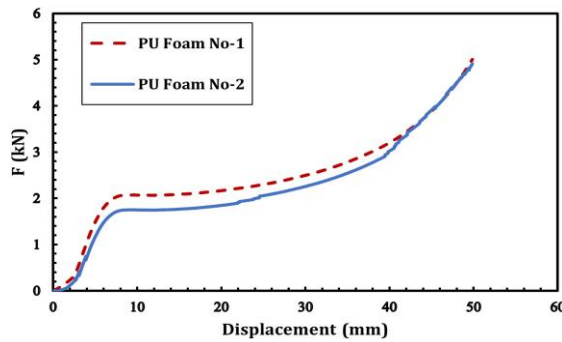
ساختارها را به طور کامل پر کرده و موجب افزایش استحکام فشاری و ظرفیت جذب انرژی در آزمون‌های فشاری شبه‌استاتیک گردد. پس از ساخت نمونه‌ها توسط چاپگر سه بعدی، دو جزء فوم شامل Polyol R and F 410 و ISO PM 200 با نسبت حجمی برابر یک به یک با یکدیگر مخلوط شدند. بلافاصله پس از اختلاط، مخلوط به داخل ظرف حاوی ساختار مشبک اضافه شد. پس از چند ثانیه دو ماده طی واکنش شیمیایی گرماده منبسط شده و سلول‌های خالی ساختار را به طور کامل پر نمود. پس از تکمیل فرآیند انبساط و سخت شدن فوم، بخش‌های اضافی از سطح نمونه حذف شدند تا ساختار نهایی آماده‌ی آزمون گردد. در پژوهش حاضر، فوم به دیواره‌های سلولی چسبانده نشده است، بلکه به صورت مستقیم در داخل ساختار لانه‌زنبوری قرار داده شده و توسط محدودیت هندسی سازه در جای خود نگه داشته شده است. بنابراین هیچ لایه چسبی در فصل مشترک فوم و دیواره‌ها استفاده نشده است. در حین بارگذاری فشاری، برهم‌کنش بین فوم و دیواره‌های اطراف عمدتاً از طریق تماس و اصطکاک صورت می‌گیرد که به تأخیر در کماتش موضعی دیواره‌ها و بهبود ظرفیت جذب انرژی سازه کمک می‌کند. علاوه بر نمونه‌های پرشده، دو نمونه‌ی فوم مکعبی خالص مطابق شکل ۹ با چگالی ۶۳/۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ابعاد ۷۲×۷۲×۷۲ میلی‌متر نیز به صورت جداگانه ساخته شدند تا خواص مکانیکی فوم به طور مستقل مورد ارزیابی قرار گیرد. این نمونه‌ها تحت آزمون فشاری شبه‌استاتیک با نرخ سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این آزمون در جدول ۳ و شکل ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۳: خواص مکانیکی فوم پلی اورتان

جنس مواد	چگالی (kg/m ³)	جذب انرژی (J)	جذب انرژی ویژه (kJ/kg)
فوم پلی اورتان	Mean: ۶۳/۴۰ SD: ۱/۲۷	Mean: ۹۷/۳۷ SD: ۲/۹۲	Mean: ۴/۳۰ SD: ۰/۱۳



شکل ۹: نمونه‌های ساخته شده مکعبی از فوم پلی اورتان



شکل ۱۰: نمودار نیرو-جابجایی فوم پلی اورتان

پس از ساخت نمونه‌ها و تزریق فوم، نمونه‌های آماده شده که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، جهت سهولت در نامگذاری، کدگذاری و جهت خواص ضربه‌پذیری، وزن شدند که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

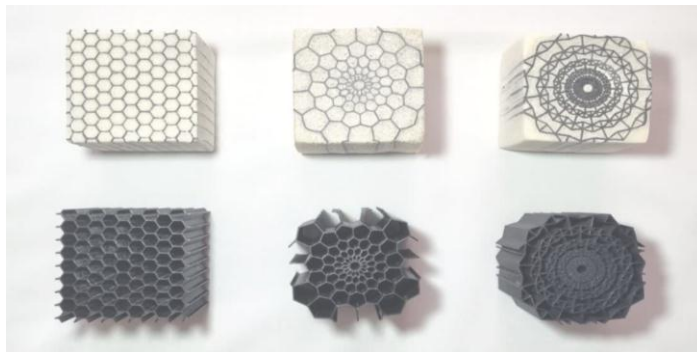
جدول ۴: کدگذاری نمونه‌ها

کد ساختار	معرفی ساختارها	توضیحات	وزن (g)
HHE	Hexagon Honeycomb EMPTY	لانه‌زنبوری سنتی بدون فوم	۷۵
HHF	Hexagon Honeycomb Foam Filled	لانه‌زنبوری سنتی پرشده با فوم	۹۳
SHE	Sunflower Honeycomb Empty	لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان بدون فوم	۶۲
SHF	Sunflower Honeycomb Foam Filled	لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان پر شده با فوم	۹۲
RSHE	Re-entrant Sunflower Honeycomb Empty	لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان با ترکیب ساختار ری اینترنت بدون فوم	۱۵۰
RSHF	Re-entrant Sunflower Honeycomb Foam Filled	لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان با ترکیب ساختار ری اینترنت پر شده با فوم	۱۷۱

۳- آزمایش فشار شبه‌استاتیکی

به منظور بررسی رفتار مکانیکی ساختارهای مشبک، آزمایش‌های فشرده سازی شبه‌استاتیکی بر روی شش نوع ساختار تحت بارگذاری خارج از صفحه انجام گرفت. از هر نوع ساختار، سه نمونه تهیه و توسط دستگاه آزمون WDW-300E با ظرفیت بار ۳۰۰ کیلو نیوتن در شرایط دمای محیط مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمون، مطابق با شکل ۱۲، نمونه‌ها بر روی فک ثابت دستگاه قرار داده شدند و صفحه‌ی متحرک با سرعت ثابت ۵ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرد تا فرآیند بارگذاری به صورت کنترل شده و تدریجی انجام شود. بارگذاری تا زمانی ادامه یافت که نمونه‌ها به تراکم کامل رسیده و تغییر شکل نهایی حاصل گردد. در طول فرآیند بارگذاری، دستگاه به طور هم زمان داده‌های نیرو و جابه‌جایی را ثبت کرده و خروجی به صورت منحنی نیرو-جابجایی در رایانه‌ی متصل به دستگاه ذخیره شد. این منحنی‌ها امکان تحلیل دقیق رفتار غیر خطی سازه‌ها را در

مراحل مختلف بارگذاری فراهم می‌سازند از جمله ناحیه‌ی الاستیک اولیه، مرحله‌ی شروع کمانش سلول‌ها و ناحیه‌ی تراکم نهایی. بدین ترتیب، علاوه بر تعیین مقاومت و سختی اولیه‌ی سازه‌ها، توانایی جذب انرژی و مکانیزم‌های شکست نیز مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند.



شکل ۱۱: نمونه‌های آماده شده برای آزمایش فشار شبه استاتیکی خارج از صفحه



شکل ۱۲: دستگاه آزمون فشار WDW-300E و نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه

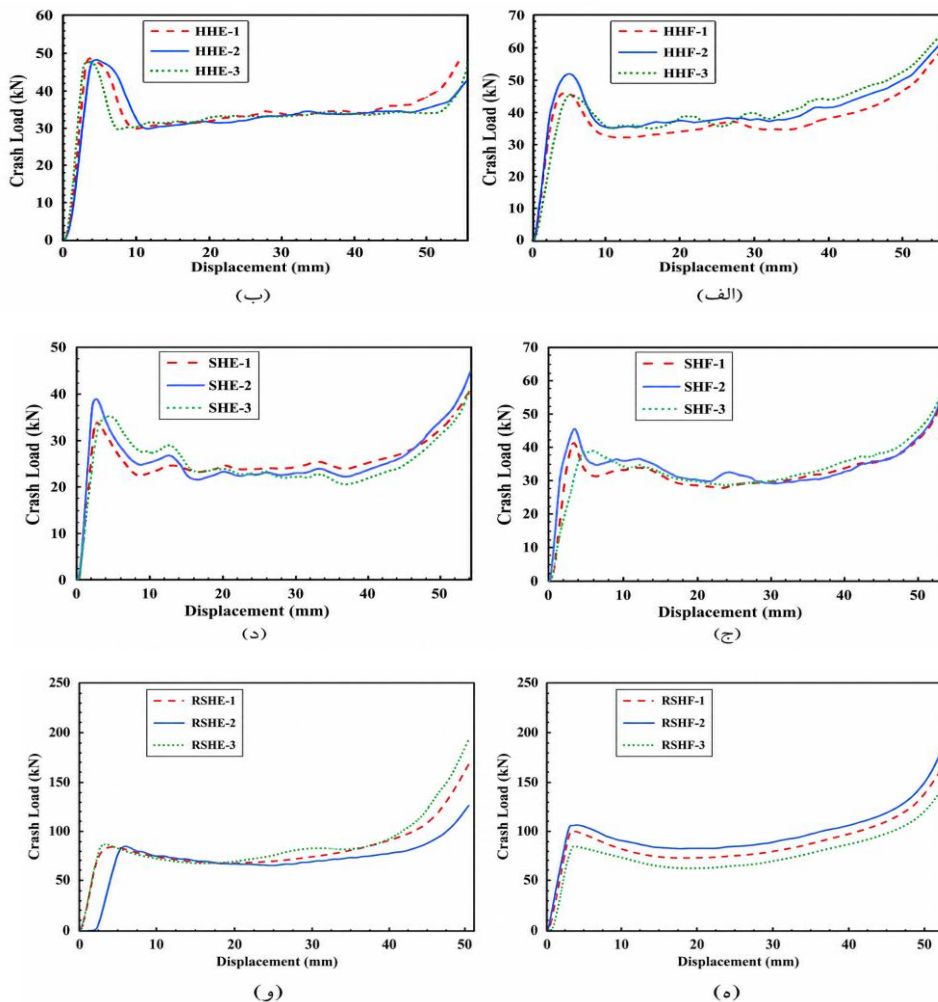
۳-۱- نتایج و بحث‌ها

منحنی نیرو جابه‌جایی استخراج شده از آزمون فشار شبه‌استاتیکی ساختارهای مشبک را می‌توان به دو ناحیه تقسیم بندی کرد. ابتدا با اعمال فشار به ساختار مشبک، ساختار دچار تغییر شکل بازگشت پذیر موسوم به تغییر شکل الاستیک می‌شود سپس با اعمال جابه‌جایی بیشتر سازه وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک شده و خرد شدن سازه شروع می‌شود و تا فروریزی کامل ادامه می‌یابد، سطح زیر این نمودار برابر با کار انجام شده روی ساختار می‌باشد که از جنس انرژی است، به عبارت دیگر سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی تا قبل از تراکم نهایی سازه، انرژی جذب شده توسط ساختار مشبک نامیده می‌شود. که طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شود [۷].

$$EA = \int_0^D f(x) d(x) \quad (5)$$

۳-۲- پاسخ فشرده سازی خارج از صفحه

پس از انجام آزمایش فشرده سازی، نمودار نیرو-جابجایی برای هر ۱۸ نمونه در شکل ۱۳ ارائه شد و در ادامه این نمودارها به عنوان مرجعی برای محاسبه خواص لهیدگی و جذب انرژی، مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱۳: منحنی نیرو-جابجایی ساختارهای الف) HHE، ب) HHF، ج) SHE، د) SHF، ه) RSHE، و) RSHF

۳-۳- ارزیابی ضربه پذیری

در کاربردهای مختلف صنعتی مانند صنعت هوایی، وزن ساختار مشبک دارای اهمیت بالایی می‌باشد. برای عملکرد ساختار مشبک لانه زنبوری، مولفه جذب انرژی ویژه بر اساس منحنی نیرو-جابجایی، مطابق رابطه ۶ تعریف می‌شود که در آن عامل وزن بی بعد شده و می‌توان به عنوان معیار مناسب برای ارزیابی جذب انرژی ساختار در واحد جرم در نظر گرفت [۳۰].

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (6)$$

در فرمول بالا EA میزان جذب انرژی و m وزن ساختار لانه زنبوری می باشد. همچنین بازده نیروی لهیدگی CFE مولفه مهمی برای مقایسه و ارزیابی مقاومت در برابر خرد شدگی در ساختار مشبک جذب انرژی می باشد که طبق رابطه ۷ تعریف می شود [۳۰].

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (7)$$

در فرمول بالا CFE بازده نیروی لهیدگی با MCF میانگین نیروی لهیدگی رابطه مستقیم و با PCF اولین نیروی بیشینه رابطه عکس دارد. برای محاسبه MCF از نمودار نیرو-جابجایی، از رابطه ۸ استفاده می شود [۷].

$$MCF = \frac{1}{D} \int_D^0 f(x) d(x) = \frac{EA}{D} \quad (8)$$

نمونه‌ها تا حدود ۸۰ درصد ارتفاع اولیه خود تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. با توجه به نمودار نمودار نیرو-جابجایی، سازه‌ها به طور میانگین تا فشردگی ۴۸ میلی‌متر توانایی جذب انرژی دارند و پس از این مقدار نمودار با شیب زیاد به سمت بی نهایت میل می کند که از این مقدار در محاسبات به عنوان طول فشردگی استفاده می شود. بنابراین با استفاده از داده‌های وزن ساختارها، فرمول‌های محاسباتی ۵ الی ۸ و نمودار نیرو-جابجایی، جدول ۴ جهت سهولت در ارزیابی مولفه‌های ضربه‌پذیری مانند جذب انرژی و جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهیدگی ارائه شده است.

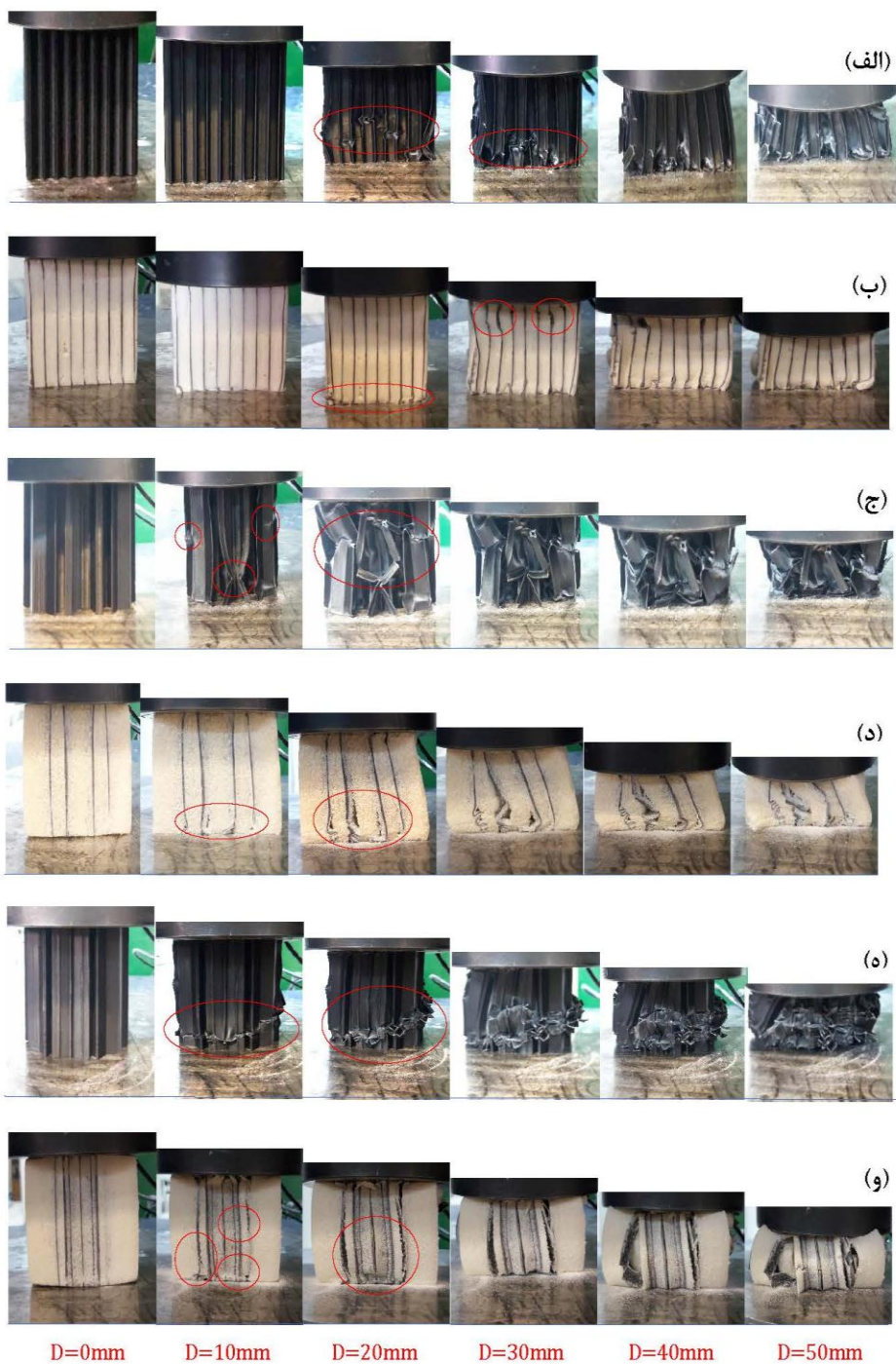
جدول ۴: مولفه‌های ضربه‌پذیری

SEA (kJ/kg)	EA (J)	PCF (kN)	MCF (kJ)	CFE (%)	کد ساختار
Mean: ۱۹/۳۰ SD: ۰/۷۸	Mean: ۱۴۴۷/۸۸ SD: ۴۳/۴۴	Mean: ۴۶/۶۷ SD: ۱/۴۲	Mean: ۳۰/۱۶ SD: ۰/۹۰	Mean: ۶۴ SD: ۱/۲۸	HHE
Mean: ۱۷/۹۵ SD: ۰/۷۲	Mean: ۱۶۷۰/۱۹ SD: ۵۰/۱۱	Mean: ۴۲/۹۷ SD: ۱/۲۹	Mean: ۳۴/۷۵ SD: ۱/۰۴	Mean: ۷۱ SD: ۱/۴۲	HHF
Mean: ۱۸/۲۳ SD: ۰/۷۳	Mean: ۱۱۴۸/۹۶ SD: ۳۴/۴۷	Mean: ۳۴/۷۷ SD: ۱/۰۵	Mean: ۲۳/۶۴ SD: ۰/۷۲	Mean: ۶۳ SD: ۱/۲۶	SHE
Mean: ۱۵/۶۳ SD: ۰/۶۳	Mean: ۱۴۳۸/۴۶ SD: ۴۳/۱۵	Mean: ۴۱/۰۸ SD: ۱/۲۳	Mean: ۲۹/۶۲ SD: ۰/۸۷	Mean: ۷۲ SD: ۱/۴۵	SHF
Mean: ۲۰/۴۲ SD: ۰/۸۲	Mean: ۳۰۶۹/۹۴ SD: ۹۲/۱۰	Mean: ۸۱/۰۹ SD: ۲/۴۳	Mean: ۶۳/۱۹ SD: ۱/۹۲	Mean: ۶۶ SD: ۱/۳۳	RSHE
Mean: ۲۲/۵۹ SD: ۰/۹۰	Mean: ۳۸۶۱/۸۱ SD: ۱۱۴/۸۵	Mean: ۹۶/۶۷ SD: ۲/۹۷	Mean: ۷۹/۴۷ SD: ۲/۳۸	Mean: ۷۹ SD: ۱/۵۸	RSHF

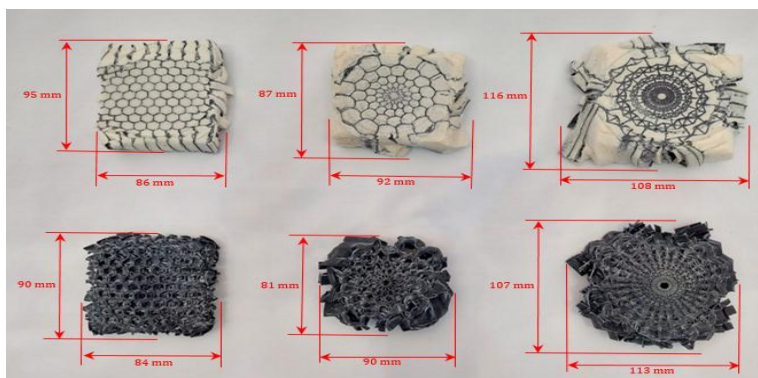
نحوه فروریزی و تغییر شکل سازه تحت بارگذاری فشاری به منظور بررسی جذب انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد. شکل ۱۴ رفتار هر شش ساختار را هنگام آزمون فشار شبه‌استاتیکی در جابه‌جایی‌های $D=0$ mm تا $D=50$ mm و شکل ۱۵ نمونه‌ها را پس از آزمایش فشار خارج از صفحه نشان می‌دهد. هنگامی که سازه لانه‌زنبوری تحت بارگذاری فشاری قرار می‌گیرد، ابتدا سازه دچار تغییر شکل الاستیک شده و هنگامی که جابه‌جایی بیش از حد بحرانی شود، سازه به دلیل ورود به ناحیه تغییر شکل پلاستیک شروع به فروریزی و خرد شدن می‌کند و نیرویی که سازه تحمل می‌کند دچار افت قابل ملاحظه‌ای می‌شود، با اعمال جابه‌جایی بیشتر با توجه به مقاومت سازه در برابر خرد شدن نمودار نیرو-جابه‌جایی روند صعودی نزولی خود را تکرار می‌کند تا هنگامی که سازه به تراکم نهایی خود برسد در این حالت با اعمال فشار بیشتر سازه صلب شده و نیرو با شیب زیاد به سمت بی‌نهایت میل می‌کند در این حالت سازه توانایی جذب انرژی نخواهد داشت. مطابق (شکل ۱۴-الف) در ساختار HHE، دچار کمانش تدریجی سلول‌ها شده و تمرکز تغییر شکل عمدتاً در ناحیه میانی و پایین سلول‌ها مشاهده می‌شود، تغییر شکل‌ها ماهیت کمانشی و موضعی داشته و چین خوردگی‌ها به صورت تدریجی شکل می‌گیرند. این رفتار ساختار HHE، در تحقیق الکساندر [۳۵] تایید می‌شود. الکساندر در مطالعه‌ای نشان داد، خردشدگی لانه‌زنبوری تحت بارگذاری به صورت چین خوردگی منظم دیواره‌ها اتفاق می‌افتد. در ساختار HHF (شکل ۱۴-ب) حضور فوم باعث تاخیر در شروع کمانش، توزیع یکنواخت‌تر تنش و کاهش شدت تغییر شکل‌های موضعی نسبت به حالت بدون فوم می‌باشد. فوم همچنین از تمرکز تغییر شکل در یک ناحیه جلوگیری کرده و الگوی کمانش سلول‌ها را پایدارتر می‌کند. ساختار SHE (شکل ۱۴-ج) مبتنی بر توزیع شعاعی-گرادیانی سلول‌ها است، تحت اعمال بار فشاری ابتدا با کمانشی که در دیواره‌های عمودی اتفاق می‌افتد مقاومت خود را در برابر بار اعمال شده انجام می‌دهد. تحت فشار رفتار متفاوتی نسبت به ساختار لانه‌زنبوری دارد. تغییر شکل‌ها عمدتاً به صورت فروریزش تدریجی و چین خوردگی‌های لایه‌های ماریچی دیده می‌شود. در این ساختار به دلیل هندسه، روند کمانش پخش‌تر شده است. در ساختار SHF (شکل ۱۴-د) کمانش سازه به صورت محدود از پایین شروع می‌شود و حضور فوم در ساختار، باعث کاهش ناحیه تغییر شکل در کل سازه می‌شود که با تداوم اعمال فشار، فروریزی سازه از پایین ادامه می‌یابد. در ساختار RSHE (شکل ۱۴-ه) رفتار آگزتیک از خود بروز می‌دهد، بدین معنا که تحت بار فشاری به جای پهن شدن و برآمدن به سمت بیرون، در جهت عرضی منقبض شده و به سمت داخل جمع می‌شود و همچنین نشان می‌دهد شکست به شدت در لایه‌های خاصی متمرکز شده است و دیواره‌های عمودی دچار خمش شده و ساختار سعی دارد انرژی را از طریق تغییر زاویه ساختار جذب کند. این ساختار پتانسیل بالایی در جذب انرژی دارد. در ساختار RSHF (شکل ۱۴-و) فوم از کمانش دیواره‌ها جلوگیری می‌کند و ساختار یکپارچگی خود را بهتر حفظ کرده و فوم با ایجاد فشار جانبی بر دیواره‌ها ظرفیت تحمل بار را افزایش داده است. فوم پرکننده با ایجاد قید موضعی در دیواره‌های سلولی، می‌تواند میزان انقباض یا انبساط جانبی را کاهش داده و در نتیجه شدت رفتار آگزتیک را تا حدی محدود کند. این ترکیب پایدارترین و برترین جذب انرژی را در مقایسه با سایر ساختارها ارائه می‌دهد.

ساختارها با هسته پر شده با فوم مقاومت فشاری بیشتری در برابر خرد شدن نسبت به نمونه‌های بدون فوم دارند که علت آن را می‌توان وجود فوم پلی‌اورتان در بین فضای خالی دیواره‌های ساختار بیان نمود که در هنگام آزمون فشار با اعمال جابه‌جایی فوم با ساختار متخلخل روی هم فشرده می‌شود و با اشغال فضای بین دیواره‌ها نقش تقویت کننده‌ای برای دیواره‌ها ایفا می‌کند. مطابق شکل ۱۴ ساختارهای SHF HHE و RSHE در جابه‌جایی یکسان نسبت به ساختارهای HHE و SHE و RSHE تغییر شکل محدودتر و کمتری را تجربه می‌کنند که نشان از افزایش استحکام دارد.

حضور فوم در هسته ساختار مشبک علاوه بر افزایش استحکام و جذب انرژی منجر به افزایش وزن ساختار هم می‌شود که به دلیل کمبود فضا برای انبساط کامل فوم در حین واکنش فوم سازی وزن و چگالی فوم نسبت به حالت آزاد افزایش می‌یابد. همان طور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، وجود فوم پلی‌اورتان درون ساختار مشبک هنگام اعمال بار فشاری باعث می‌شود دیواره‌های عمودی به سمت بیرون خم شوند و حجم کلی ساختار فشرده افزایش یابد. دلیل این پدیده آن است که فوم متخلخل در حین فشردگی خرد شده و فضای داخل سلول‌ها را اشغال می‌کند، بنابراین از فروپاشی دیواره‌ها به سمت داخل جلوگیری می‌کند. این مکانیسم موجب افزایش مقاومت در برابر خرد شدن و بهبود قابلیت جذب انرژی ساختار می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که حضور فوم پلی‌اورتان به طور قابل توجهی بر مکانیزم تغییرشکل تحت بارگذاری فشاری تأثیر می‌گذارد. در ساختارهای توخالی، تغییرشکل عمدتاً تحت تأثیر کماتش پیشرونده دیواره سلول‌ها، ایجاد چین‌خوردگی‌های موضعی و ناپایداری جانبی رخ می‌دهد. در مقابل، ساختارهای پر شده با فوم به دلیل برهم‌کنش میان هسته فومی و دیواره‌های سلولی، الگوی فروریزش پایدارتر و یکنواخت‌تری از خود نشان می‌دهند. فوم با فراهم کردن تکیه‌گاه داخلی برای سلول‌های لانه‌زنبوری، وقوع کماتش موضعی را به تأخیر انداخته و تغییرشکل بیش از حد دیواره‌ها را محدود می‌کند. در نتیجه، فرآیند لهیدگی به صورت تدریجی‌تر و یکنواخت‌تر انجام شده و توزیع بار در سراسر ساختار بهبود می‌یابد. علاوه بر این، فوم بخشی از انرژی تغییرشکل را از طریق فشرده‌شدن خود جذب می‌کند و هم‌زمان موجب افزایش پایداری شبکه سلولی می‌شود. این اثر هم‌افزایی باعث کاهش تمرکز تنش، جلوگیری از فروریزش زود هنگام و به تعویق افتادن مرحله تراکم نهایی (densification) می‌گردد. در نتیجه، نمونه‌های پر شده با فوم در مقایسه با نمونه‌های توخالی، نیروی خردشدگی میانگین، ظرفیت جذب انرژی و بازده نیروی خردشدگی بالاتری را از خود نشان می‌دهند.



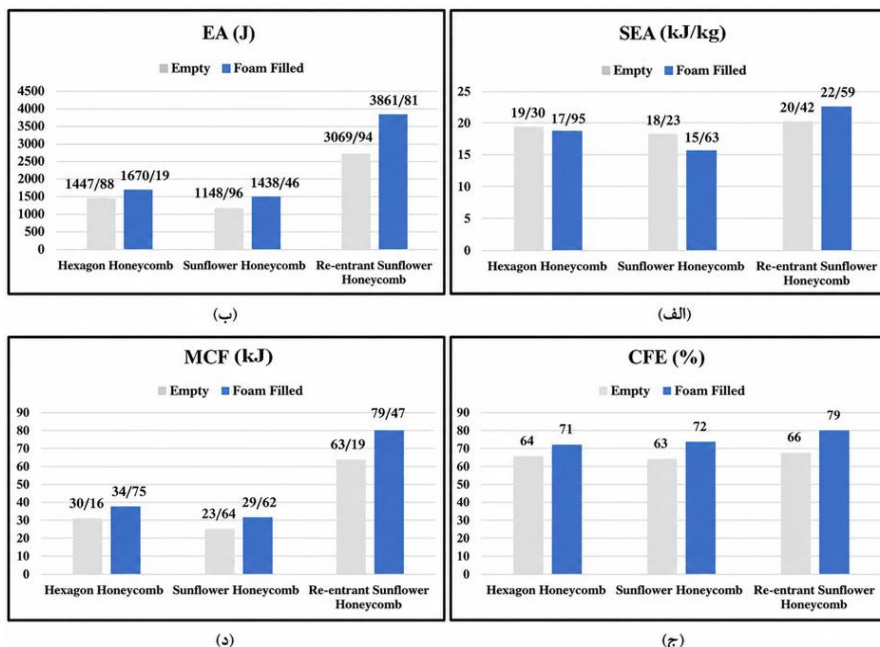
شکل ۱۴: نحوه تغییر شکل ساختارهای الف) HHE، ب) HHH، ج) SHE، د) SHF، ه) RSHE، و) RSHF



شکل ۱۵ نمونه‌ها پس از آزمایش فشار خارج از صفحه

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر ساختار جدید لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان در ترکیب با ساختار ری اینترنت به منظور استفاده در هسته‌ی جذب‌های انرژی معرفی شد و جهت ارزیابی عملکرد، تحت فشار شبه‌استاتیکی قرار گرفت همچنین اثر فوم پلی‌اورتان به عنوان ماده‌ی پرکننده در ساختارهای لانه‌زنبوری بر میزان جذب انرژی تحت بارگذاری فشاری مورد بررسی قرار گرفت. انرژی جذب شده، جذب انرژی ویژه و مولفه‌های ضربه پذیری از نتایج آزمایش استخراج شدند که با استناد به آن‌ها و نحوه‌ی تغییر شکل و فروریزی ساختارها می‌توان نتایج زیر را عنوان نمود:



شکل ۱۶: الف) نمودار میله‌ای مقایسه جذب انرژی ویژه، ب) جذب انرژی، ج) بازده نیروی لهیدگی، د) میانگین نیروی لهیدگی

- در مقایسه‌ی عملکرد جذب انرژی ویژه، ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت (شکل ۱۶- الف) در دو حالت پر از فوم (RSHF) و بدون فوم (RSHE) به ترتیب افزایش ۴۴ و ۱۲ درصدی را نسبت به ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان در حالت‌های پر از فوم (SHF) و بدون فوم (SHE) نشان می‌دهد. همچنین این ساختار در مقایسه با لانه‌زنبوری در حالت پر از فوم (HHF) و بدون فوم (HHE) به ترتیب افزایش ۲۰ درصدی و ۵/۸ درصدی در جذب انرژی ویژه ارائه کرده است.
- در مقایسه‌ی عملکرد جذب انرژی، ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت (شکل ۱۶- ب) در دو حالت پر از فوم (RSHF) و بدون فوم (RSHE) به ترتیب افزایش ۱۶۸ و ۱۶۷ درصدی را نسبت به ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان در حالت‌های پر از فوم (SHF) و بدون فوم (SHE) نشان می‌دهد. همچنین این ساختار در مقایسه با لانه‌زنبوری در حالت پر از فوم (HHF) و بدون فوم (HHE) به ترتیب افزایش ۱۳۱ و ۱۱۲ درصدی در جذب انرژی ارائه کرده است.
- در مقایسه‌ی بازده نیروی لهدیگی، ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت (شکل ۱۶- ج) در دو حالت پر از فوم (RSHF) و بدون فوم (RSHE) به ترتیب افزایش ۹ و ۴ درصدی را نسبت به ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان در حالت‌های پر از فوم (SHF) و بدون فوم (SHE) نشان می‌دهد. همچنین این ساختار در مقایسه با لانه‌زنبوری در حالت پر از فوم (HHF) و بدون فوم (HHE) به ترتیب افزایش ۱۱ و ۱/۷ درصدی در بازده نیروی لهدیگی از خود نشان می‌دهد.
- در مقایسه‌ی میانگین نیروی لهدیگی، ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت (شکل ۱۶- د) در دو حالت پر از فوم (RSHF) و بدون فوم (RSHE) به ترتیب افزایش ۱۶۸ و ۱۶۷ درصدی را نسبت به ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان در حالت‌های پر از فوم (SHF) و بدون فوم (SHE) نشان می‌دهد. همچنین این ساختار در مقایسه با لانه‌زنبوری در حالت پر از فوم (HHF) و بدون فوم (HHE) به ترتیب افزایش ۱۲۸ و ۱۰۹ درصدی در بازده نیروی لهدیگی از خود نشان می‌دهد.
- میانگین نیروی لهدیگی ساختارهای الهام گرفته از گل آفتابگردان در ترکیب با ساختار ری اینترنت در حالت پر شده با فوم (RSHF) نسبت به حالت بدون فوم (RSHE) افزایش ۲۵ درصدی، در ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان در حالت پر شده با فوم (SHF) نسبت به حالت بدون فوم (SHE) افزایش ۲۳ درصدی و در ساختار لانه‌زنبوری در حالت پر شده با فوم (HHF) نسبت به حالت بدون فوم (HHE) افزایش ۱۵ درصدی داشته است.

- نتایج نشان می‌دهد که پر کردن هسته ساختار با فوم پلی‌اورتان تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد جذب انرژی دارد. به‌گونه‌ای که در ساختارهای الهام گرفته از گل آفتابگردان ترکیب شده با ساختار ری اینترنت (RSHF)، میزان جذب انرژی نسبت به ساختار متناظر بدون فوم (RSHE)، ۲۶ درصد افزایش یافته است. همچنین، در لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان (SHF)، افزایش جذب انرژی در مقایسه با ساختار بدون فوم (SHE)، ۲۵ درصد افزایش یافته است. همچنین پر شدن لانه‌زنبوری معمولی با فوم پلی‌اورتان (HHF) موجب افزایش ۱۵ درصد در جذب انرژی نسبت به ساختار بدون فوم (HHE) گردید. این بهبود قابل توجه در جذب انرژی بیانگر افزایش استحکام و کارایی مکانیکی هسته‌ها در اثر استفاده از فوم پلی‌اورتان است.
- یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که طراحی هدفمند گرادیان اندازه سلول‌ها در کنار هندسه آگزتیک و تقویت فومی، مسیر نوینی برای توسعه سازه‌هایی با ظرفیت بالای جذب انرژی ایجاد می‌کند. این مطالعه با بهره‌گیری از الگوهای زیستی، به ویژه ساختار سلولی الهام گرفته از گل آفتابگردان، رویکردی خلاقانه در طراحی مواد ارائه می‌دهد که به طور هم زمان موجب ارتقای پاسخ مکانیکی، بهبود عملکرد انرژی و افزایش پایداری ساختاری می‌شود.
- نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق هوشمندانه ساختار ری اینترنت، فوم با توزیع چگالی و طراحی زیست الهام گرفته از طبیعت نهفته است. ترکیبی که پیش‌تر در سازه‌های لانه‌زنبوری با چنین یکپارچگی گزارش نشده بود. هم افزایی میان هندسه و مواد در این تحقیق، نسل جدیدی از هسته‌های چند منظوره را معرفی می‌کند که می‌تواند مرزهای طراحی سازه‌های جذب کننده انرژی را گسترش دهد. این ساختارهای نوآورانه گزینه‌ای امیدبخش برای کاربرد در صنایع پیشرفته، به ویژه در سیستم‌های محافظت در برابر ضربه، سازه‌های ساندویچی و سازه‌های جذب انرژی در حوزه‌های هوافضا و خودروسازی به شمار می‌روند. این پژوهش افق‌های تازه‌ای برای توسعه مواد و سازه‌های هوشمند و الهام گرفته از طبیعت گشوده و راه را برای تحقیقات آتی در زمینه هندسه‌های پیچیده، هموار می‌سازد.

۵- تعارض منافع

نویسنده(گان) اعلام می‌دارند که در مورد انتشار این مقاله تضاد منافع وجود ندارد. علاوه بر این، موضوعات اخلاقی شامل سرقت ادبی، رضایت آگاهانه، سوء رفتار، جعل داده‌ها، انتشار و ارسال مجدد و مکرر توسط نویسندگان رعایت شده است.

۶- دسترسی آزاد

این نشریه دارای دسترسی باز است و اجازه اشتراک (تکثیر و بازآرایی محتوا به هر شکل) و انطباق (بازترکیب، تغییر شکل و بازسازی بر اساس محتوا) را می‌دهد.

۷- منابع

- [1] Vinson J. (2018). *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Technomic Publishing Company.
- [2] Ashby MF, Gibson LJ.(1997). *structure and properties*. 2nd ed. USA. Department of Materials Science and Engineering.
- [3] Sarvestani HY, Akbarzadeh A, Niknam H, Hermenean K.(2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels Energy absorption and structural performance. *Journal of Composite Structures*, 15(200), 886-909. doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.002.
- [4] Ngoc S, Guoxing L.(2020). review of recent research on bio inspired structures and materials for energy absorption. *Journal of Composites Part B: Engineering*, 15(181), 107496. doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107496.
- [5] Ren Y, Xiang J.(2010). A comparative study of the crashworthiness of civil aircraft with different strut configurations. *International Journal of Crashworthiness*, 15(3), 321-330.
- [6] Zou T, Mou H, Feng Z.(2012). Research on effects of oblique struts on crashworthiness of composite fuselage sections. *Journal of Aircraft*, 49(6), 2059-2063. doi.org/10.2514/1.C031867.
- [7] Jones N. (2011) *Structural impact*, 2nd ed., Cambridge University Press & Assessment.
- [8] Solouki A, Aliha M. R. M, Makui, A.(2023). Comparison of flexural strength in rectangular shape 3D-printed PLA samples with different grooves. *Journal of Science and Technology of Composites*, 10(2), 2210-2217. doi.org/10.22068/jstc.2023.2005499.1841 [In Persian]
- [9] Khakbaz M, Sarkhosh R, Javadi M, Zarghami A.(2025). Numerical modeling of electromagnetic loss mechanisms in Multi Layer Graphene/Epoxy and CNT/Epoxy absorbers based on grooved- surface perturbations and multiple scattering within the porous core. *Aerospace Defense*.;4(3):66-88 (In Persian).
- [10] Alireza Moradi Saleh , Mehran Hasani , Hasan Salehi.(2023) Investigation of stability and deformation of earthen walls reinforced

- with geosynthetics under explosion with passive defense approach. *Aerospace Defense*.;1(4),60-67 (In Persian).
- [11] Sarkhosh R.(2025). Enhanced crashworthiness and energy absorption properties of honeycomb structures with a novel sunflower-inspired design. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.;47(7),322.
- [12] Sarkhosh R, Farrokhhabadi A, Zarei H.(2022). Crashworthiness characteristics of composite cylindrical energy absorbers filled with honeycomb and foam under quasi-static load: experimental and analytical study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.;44(8),346.
- [13] Zarei H, Shahnazar P, Meskini M, Sarkhosh R.(2022). Ballistic performance analysis of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite. *Modares Mechanical Engineering*.;22(5),356-5.
- [14] HR Z.(2021). Experimental Investigation of Energy Absorption of Aluminum/Composite Hybrid Tube Produced by Tape Winding Method under Quasi-Static Load. *Modares mechanical engineering*.;21(1).
- [15] Mazaheri M, Khalajzade M, Asgari M.(2024). Development of a novel multi-cellular origami metastructure and investigation into numerical and experimental energy absorption behaviour. *Amirkabir Mechanical Engineering*. ,56(5),717-740. doi.org/10.22060/mej.2024.22928.7694.
- [16] Molatefi H, Mozafari H. (2015). Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method. *Modares Mechanical Engineering*, 14(15), 177-185. [In Persian]
- [17] Galehdari S.A , Kadkhodayan M , Hadidi-Moud S.(2015) Analytical, experimental and numerical study of a graded honeycomb structure under in-plane impact load with low velocity. *International Journal of Crashworthiness*, 20(4), 1-14. doi.org/10.1080/13588265.2015.1018739.
- [18] Alisadeghi M, Fazilati J.(2016). Optimization of honeycomb impact attenuator using genetic algorithm based on response surface method and design of experiment. *Modares Mechanical Engineering*, 15(12), 25-36. [In Persian]
- [19] Silas Z. Gebrehiwot, L. Espinosa Leal, J. N. Eickhoff & L. Rechenberg.(2021). The influence of stiffener geometry on flexural properties of 3D printed polylactic acid (PLA) beams. *Progress in Additive Manufacturing*, 13(6),71–81. doi.org/10.1007/s40964-020-00146-2.

- [20] Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh A.H, Niknam, K.Hermenean H.(2018). 3D printed Architected Polymeric Sandwich Panels Energy Absorption and Structural Performance. *Composite Structures*,200(15),886-909. doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.002.
- [21] Ingrole A, Hao A, Liang R.(2017). Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Materials & Design*. 5(117), 72-83. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.067.
- [22] Shafipour M , Ahmadi-Brooghani S. Y .(2021). Numerical and Experimental Study of Energy Absorption Amount of Functionally Graded Honeycomb with Negative Stiffness Property under Quasi-Static Load. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. ,52(10), 697-700.
- [23] Najafi M, Ahmadi H, Liaghat G.H.(2020). Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading. *Modares Mechanical Engineering*. ,20(2), 415-424. [In Persian]
- [24] Rong Yu, Wei Luo, Hua Yuan, Jingxi Liu, Wentao He, Zixian Yu.(2020). Experimental and numerical research on foam filled re-entrant cellular structure with negative Poisson's ratio. *Thin-Walled Structures*, 153, 106679. doi.org/10.1016/j.tws.2020.106679.
- [25] Safikhani M, Yaghootian A, Mosalmani R.(2023). Energy absorption of the additively manufactured novel re-entrant auxetic structure in comparison with honeycomb structure experimental and numerical analysis, 45(275). doi.org/10.1007/s40430-023-04178-x.
- [26] Didem M, Ekrikaya S , Caliskan U, Sevim C , Apalak M.(2025). Functionally Graded and Geometrically Modified Auxetic Re-Entrant Honeycombs.Experimental and Numerical Analysis Polymeric Materials and Their Application in 3D Printing, 2nd Edition *Polymers*.,17(11), 1547. doi.org/10.3390/polym17111547.
- [27] Aghazadeh Sh, Nosraty H, Mirdehghan SA.(2025). Comparison of energy absorption of composites reinforced with auxetic and non-auxetic weftknitted fabrics. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*,12(3),24-29. doi.org/10.22034/ijme.2025.512820.2067. [In Persian]
- [28] Hosseini SA, Shokrollahi H, Mousavi SA, Sabouri H.(2025) Experimental investigation of bending behavior of sandwich structures with auxetic core made of biodegradable materials. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 12(4), 63-75. doi.org/10.22034/ijme.2025.511051.2055. [In Persian]

- [29] Sarkhosh R.(2025). Enhanced Specific Energy Absorption in Honeycomb Structures With Novel Spiral Reinforcement and Foam Filling. *Journal of Polymer Engineering & Science*, 65(9), 4631-4643. doi.org/10.1002/pen.27294.
- [30] Sarkhosh R.(2024). Experimental study of energy absorption characteristic of sunflower-inspired foam-filled honeycomb structure under out-of-plane loading. *Journal of Science and Technology of Composites*,11(2),2512-20. doi.org/10.22068/JSTC.2024.2040117.1897. [In Persian]
- [31] Sarkhosh R.(2024). Experimental study of energy absorption capacity of spring-reinforced honeycomb Structures filled with polyurethane foam under quasi-static loading. *Journal of Science and Technology of Composites*, 11(3), 2554-2562. doi.org/10.22068/jstc.2025.2047424.1906. [In Persian]
- [32] Reza Sarkhosh, Mohammad Kazemi Nasrabadi, Mahdi Zandieh (2026). A Novel Sunflower-Inspired Re-entrant Honeycomb with Enhanced In-Plane Energy Absorption. *Journal of Mechanics of Advanced Materials and Structures*.
- [33] Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. ASTM Standard D1621. AI. USA. 2010.
- [34] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM Standard D638. USA. 2014.
- [35] Alexander, J.M.(1960) An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Journal of Mechanics and Applied Mathematics*,13(1), 10-15. doi.org/10.1093/qjmam/13.1.10.