



مطالعه‌ی تجربی ظرفیت جذب انرژی ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر و پرشده با فوم پلی‌اورتان در بارگذاری شبه‌استاتیکی

رضا سرخوش^{1*}

1- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران
* تهران، صندوق پستی 13846-63113، R.sarkhosh@ssau.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1403/09/20

پذیرش: 1403/12/07

کلیدواژگان:

ساختار لانه‌زنبوری،

جذب انرژی،

پرینتر سه‌بعدی،

فوم پلی‌اورتان،

لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر

چکیده

این مطالعه با ارائه یک رویکرد نوآورانه در طراحی ساختارهای لانه‌زنبوری، یک ساختار تقویت‌شده‌ی جدیدی را معرفی می‌کند که دیواره‌ی داخلی سلول‌های آن، با فنری با شکل شش‌ضلعی تقویت‌شده است. همچنین به ارزیابی و مقایسه مؤلفه‌های ضربه‌پذیری و جذب انرژی ساختار پیشنهادی، با ساختار لانه‌زنبوری سنتی می‌پردازد. علاوه بر این، تأثیر پرکردن فضای خالی بین سلول‌های ساختار لانه‌زنبوری با فوم پلی‌اورتان سخت، بر استحکام مکانیکی و جذب انرژی ساختارها، مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش چهار نوع ساختار لانه‌زنبوری با جنس پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA+) با کمک پرینتر سه‌بعدی FDM با ابعاد مکعبی ساخته شد. پس از آن، فوم دوجزئی پلی‌اورتان به فضای خالی میان سلول‌ها تزریق شد. در ادامه، نمونه‌ها در جهت خارج از صفحه، تحت بارگذاری فشاری شبه‌استاتیکی قرار گرفتند و نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از بارگذاری، استخراج شدند. نتایج نشان داد ساختار پیشنهادی لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر، در حالت خالی با افزایش 14 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی و افزایش 24 درصدی راندمان نیروی لهیدگی و در حالت پرشده با فوم با افزایش 21 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی و 26 درصدی راندمان نیروی لهیدگی، عملکرد بهبودیافته‌ای نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی دارد. همچنین به کارگیری فوم پلی‌اورتان در ساختارهای مشبک لانه‌زنبوری سنتی و لانه‌زنبوری تقویت‌شده، به ترتیب باعث افزایش 16 و 23 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی شد که نشان از بهبود خواص مکانیکی آن دارد.

Experimental study of energy absorption capacity of spring-reinforced honeycomb Structures filled with polyurethane foam under quasi-static loading

Reza Sarkhosh^{1*}

1- Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 13846-63113, Tehran, Iran, R.sarkhosh@ssau.ac.ir

Keywords

Honeycomb structure, Energy absorber, 3D printer, Polyurethane foam, Spring-reinforced honeycomb

Abstract

This study introduces an innovative approach to the design of honeycomb structures by presenting a new reinforced structure with hexagonal spring-reinforced cell walls. The crashworthiness and energy absorption capabilities of the proposed structure are evaluated and compared to those of traditional honeycomb structures. Additionally, the impact of filling the void space between the cells of the honeycomb structure with rigid polyurethane foam on the mechanical strength and energy absorption of the structures is investigated. In this research, four types of honeycomb structures made of polylactic acid (PLA+) were fabricated using an FDM 3D printer with cubic dimensions. Subsequently, a two-part polyurethane foam was injected into the void space between the cells. The samples were then subjected to quasi-static compressive loading out-of-plane, and the resulting force-displacement diagrams were extracted. The results showed that the proposed spring-reinforced honeycomb structure, in its empty state, exhibited a 14% increase in energy absorption and mean crushing force, along with a 24% increase in crushing force efficiency compared to the traditional honeycomb structure. When filled with foam, the proposed structure showed a 21% increase in energy absorption and mean crushing force and a 26% increase in crushing force efficiency, indicating an improved performance. Furthermore, applying polyurethane foam in both traditional and reinforced honeycomb structures resulted in a 16% and 23% increase in energy absorption and mean crushing force, respectively, demonstrating an improvement in their mechanical properties.

Please cite this article using:

Sarkhosh, R., "Experimental study of energy absorption capacity of spring-reinforced honeycomb Structures filled with polyurethane foam under quasi-static loading." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 3, pp. 2554-2562, 2025.
https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2047424.1906

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

از گذشته تا به امروز، ساختارهای مشبک به دلیل توانایی جذب‌انرژی بالا، خواص مکانیکی برجسته و چگالی پایین، از پرکاربردترین سازه‌ها در صنایع مختلف همچون پزشکی، عمران، هوافضا و غیره بوده است [1]. ظهور فناوری‌های [2] پیشرفته مانند پرینترهای سه‌بعدی امکان توسعه‌ی ساختارهای مشبک را فراهم نموده‌است. محققان همواره در تلاش هستند با بهره‌گیری از روش‌های مختلف همچون تغییر هندسه‌ی ساختار یا ابداع هندسه‌ی جدید [3] با الهام گرفتن از طبیعت [4-5] و محیط پیرامون یا ترکیب منطقی مواد، عملکرد ساختارهای مشبک را بهبود بخشند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد ساختارهای مشبک با طراحی‌های نوآورانه که به کمک پرینترهای سه‌بعدی تولید می‌شوند عملکرد مکانیکی بهتری نسبت به ساختارهای سنتی دارند [6]. در همین راستا، خان و همکاران [7] مروری بر طراحی و ساخت، ساختارهای مشبک تناوبی تولیدشده توسط پرینتر سه‌بعدی ارائه دادند و به بررسی پیشرفت‌ها و چالش‌های این ساختارها در حوزه‌ی جذب‌انرژی پرداختند و آن‌ها را براساس عملکرد جذب‌انرژی طبقه‌بندی نمودند. هاو و همکاران [8] جعبه‌های ضربه‌گیر نوین، با هسته‌ی مشبک سه‌بعدی ساخته‌شده توسط پرینتر سه‌بعدی با مواد کامپوزیتی را معرفی نمودند و با کمک روش‌های شبیه‌سازی عددی و تجربی به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد جذب‌انرژی و کاهش وزن این جعبه‌ها پرداختند و راهکارهایی برای بهبود عملکرد آن‌ها ارائه کردند. هدایت و همکاران [9] به بررسی تأثیر مؤلفه‌های مختلف ساخت با پرینتر سه‌بعدی بر روی مقاومت فشاری و جذب‌انرژی ساختارهای مشبک در بارگذاری شبه‌استاتیکی پرداختند.

همچنین ساختارهای مشبک که با طراحی منطقی به صورت ترکیبی ساخته می‌شوند، از لحاظ خواص مکانیکی نسبت به ساختارهای معمولی دارای برتری هستند. به همین دلیل استفاده از این نوع ساختارها در انواع جاذب‌های انرژی موردتوجه قرار گرفته‌است. در همین راستا، شو و همکاران [10] با ترکیب هندسه‌ی ساختار آگزتیک و لانه‌زنبوری به بررسی این ساختار ترکیبی پرداختند. با بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های تولیدشده توسط پرینتر سه‌بعدی، نشان دادند ساختار هیبریدی خواص مکانیکی و جذب‌انرژی بهبود یافته‌ای ارائه می‌دهد. فو و همکاران [11] ساختار جدیدی از لانه‌زنبوری آگزتیک تقویت‌شده با دنده‌های باریک را معرفی کردند و پس از بررسی تحلیلی و عددی، نشان دادند که ساختار پیشنهادی نسبت به سایر ساختارهای لانه‌زنبوری از لحاظ خواص مکانیکی دارای برتری می‌باشد. وانگ و همکاران [12] با ترکیب هندسه‌ی لانه‌زنبوری ستاره‌ای و ری‌اینترنت، یک ساختار ترکیبی جدیدی را ارائه دادند و پس از بررسی نتایج حاصل از آزمون ضربه در بارگذاری داخل صفحه به مقایسه‌ی عملکرد جذب‌انرژی این ساختار با ساختار اولیه پرداختند. وی و همکاران [13] با ترکیب المان‌های ستاره‌ای و مثلثی در ساختار لانه‌زنبوری، یک ساختار نوآورانه را معرفی نمودند و پس از شبیه‌سازی عددی آزمون ضربه در سرعت‌های مختلف، نشان دادند ساختار پیشنهادی از لحاظ مکانیکی، به خصوص جذب‌انرژی نسبت به ساختارهای پیشین، دارای برتری می‌باشد. وانگ و همکاران [14] با ترکیب نوآورانه‌ی سلول‌های لانه‌زنبوری پیکان دوتایی و ستاره‌ای شکل، ساختار جدیدی را پیشنهاد دادند و پس از بررسی تحلیلی نشان دادند ساختار پیشنهادی جدید، به طور قابل توجهی ظرفیت جذب‌انرژی را افزایش می‌دهد.

علاوه بر این، ساختارهای گرادایانی، از طریق تغییر منطقی مؤلفه‌هایی همچون اندازه، زاویه [15] و چگالی ساختار در جهت‌های مختلف، امکان بهبود خواص مکانیکی ساختارهای مشبک را فراهم می‌کند که نشان‌دهنده‌ی برتری ساختارهای گرادایانی نسبت به ساختارهای سنتی می‌باشد. در همین راستا، آنی و همکاران [16] در مطالعه‌ی، ساختارهای لانه‌زنبوری با چگالی متغیر و ساخته‌شده توسط پرینتر سه‌بعدی را تحت بارگذاری خارج از صفحه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد ساختار گرادایانی نسبت به ساختارهای یکنواخت عملکرد بهتری در تحمل بار و جذب‌انرژی دارد. نیا و همکاران [17] با طراحی گرادایانی الهام‌گرفته از بالپوش حشرات و بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان دادند ساختار پیشنهادی جدید به دلیل طراحی گرادایانی، توانایی جذب‌انرژی بسیار بالاتری نسبت به ساختارهای سنتی دارد و می‌تواند جایگزین خوبی برای این ساختارها باشد. در پژوهشی که توسط سیمون باتس و همکاران [18] انجام شد تأثیر الگوهای مختلف گرادایانی بر رفتار مکانیکی ساختارهای لانه‌زنبوری منعطف ساخته‌شده توسط پرینتر سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با کمک روش تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان دادند ساختارهای گرادایانی در بارگذاری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای نسبت به ساختارهای یکنواخت ظرفیت جذب‌انرژی بالاتری دارند.

همچنین مطالعات نشان دادند ترکیب مواد [19-20]، به خصوص به‌کاربردن فوم‌های سبک پلیمری [21] در ساختارهای مشبک می‌تواند خواص مکانیکی آن‌ها را تا حد قابل توجهی ارتقا بخشد. در همین راستا، منتظری و همکاران [22] در مطالعه‌ی، اثر پرکردن فضای بین سلول‌های ساختارهای تولید شده با پرینتر سه‌بعدی از جنس PLA و TPU را بر خواص مکانیکی، در بارگذاری خمشی سه‌نقطه‌ای بررسی نمودند آن‌ها با کمک روش‌های تجربی و تحلیلی نشان دادند حضور فوم در ساختارهای لانه‌زنبوری می‌تواند به طور امیدوارانه‌ای، خواص جذب‌انرژی را بهبود بخشد. تقی‌پور و همکاران [23] به بررسی تجربی و عددی تأثیر روش پرکردن هسته‌های موجود در دوزنقه‌ای شکل دولایه با فوم پلی‌اورتان سخت پرداختند و نشان دادند حضور فوم در ساختار مشبک، خواص ضربه‌پذیری را بهبود می‌بخشد. فرخ‌آبادی و همکاران [24] در پژوهشی با هدف بهبود جذب‌انرژی ساختارهای مشبک تولید شده به روش پرینتر سه‌بعدی، از دو روش تقویت ساختار با الیاف شیشه و پرکردن فضای خالی بین سلول‌ها با فوم پلی‌اورتان استفاده کردند که نتایج نشان دادند استفاده از فوم و الیاف شیشه در ساختار، منجر به افزایش خواص مکانیکی و جذب‌انرژی می‌شود. همچنین فتحی و همکاران [25] به بررسی تأثیر الگوهای مختلف پرشدن فوم، بر بهبود رفتار مکانیکی ساختارهای لانه‌زنبوری پرداختند و با انجام آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی توانستند نشان دهند که الگوهای ارائه شده باعث افزایش قابل توجه استحکام فشاری، جذب‌انرژی و کاهش وزن در این ساختارها می‌شود.

با توجه به پیشرفت روزافزون صنعت و نیاز به ساختارهای بهینه‌تر، همواره طراحی ساختارهای سبک‌تر و با استحکام بالاتر موردتوجه بوده‌است. از طرفی، به علت محدودیت‌هایی که ساختارهای سنتی در تحمل بار و ظرفیت جذب‌انرژی دارند، همواره پژوهشگران سعی دارند با بهره‌گیری از روش‌های مختلف با کمک پرینترهای سه‌بعدی، ساختارهای نوین با خواص مکانیکی بهبودیافته معرفی کنند تا نیاز صنعت را در این زمینه مرتفع سازند. در پژوهش حاضر، یک ساختار جدید لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر معرفی شده است که ساختار فنری شش‌ضلعی، نقش حمایتی برای دیواره‌های عمودی سلول‌های لانه‌زنبوری در بارگذاری خارج از صفحه دارد. همچنین، فضای خالی میان سلول‌ها، با فوم سخت پلی‌اورتان پر شدند. خواص

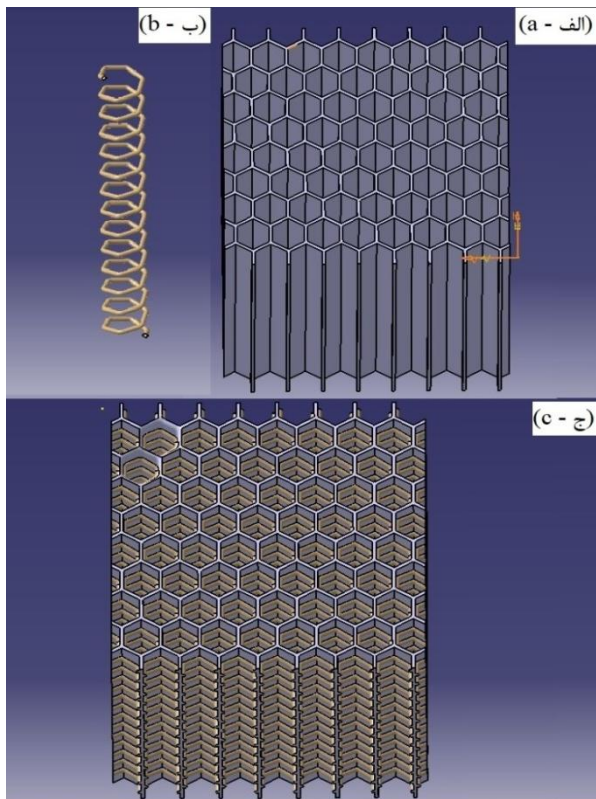


Fig. 2 a) Traditional honeycomb b) Spring 3D model c) Reinforced honeycomb

شکل 2 الف) لانه‌زنبوری سنتی، ب) مدل سه‌بعدی فنر، ج) لانه‌زنبوری تقویت‌شده

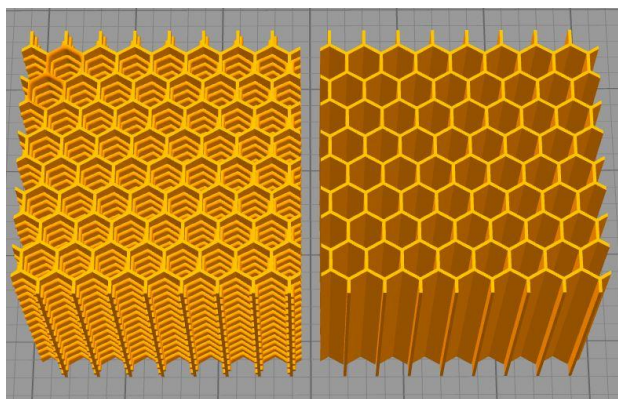


Fig. 3 3D model of Specimens in 3D simplify software
شکل 3 مدل سه‌بعدی نمونه‌ها در نرم‌افزار 3D simplify

جدول 1 مؤلفه‌های پرینتر سه‌بعدی

مقدار	مؤلفه‌های ساخت
0.3	ارتفاع لایه (mm)
210	دمای نازل (C)
50	دمای صفحه چاپ (C)
33.4	سرعت پرینت (mm/s)
0.4	قطر نازل (mm)
1.75	قطر فیلامنت (mm)

ضربه‌پذیری و ویژگی جذب انرژی ساختار جدید در حالت خالی و پرشده با فوم، نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی، مورد مقایسه قرار گرفته است. در این پژوهش، ابتدا ساختارها در نرم‌افزار کتیا مدل‌سازی شدند و با کمک پرینتر سه‌بعدی با استفاده از فیلامنت +PLA ساخته شدند سپس بعد از تزریق فوم به فضای بین سلول‌ها، نمونه‌ها تحت آزمون فشار شبه‌استاتیکی قرار گرفتند و نتایج حاصل، ارزیابی و مقایسه قرار شدند.

2- مطالعه‌ی تجربی

1-2- هندسه‌ی ساختار و مدل‌سازی نمونه‌ها

در این مطالعه، ساختار لانه‌زنبوری سنتی با مشخصات هندسی، مطابق با شکل 1 و با ابعاد نمونه $70 \times 70 \times 70$ میلی‌متر مطابق شکل 2- الف معرفی می‌شود.

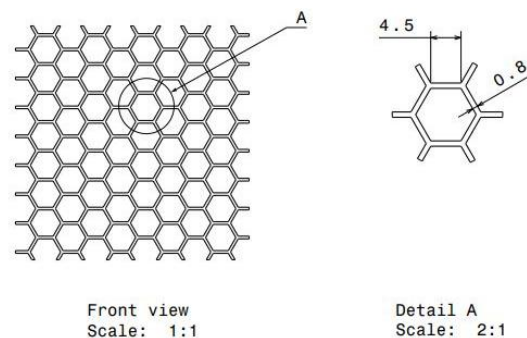


Fig. 1 Traditional honeycomb geometry

شکل 1 هندسه‌ی لانه‌زنبوری سنتی

در ادامه، با اضافه کردن فنر با مقطع دایره‌ای و شکل شش‌ضلعی به ساختار لانه‌زنبوری سنتی، مطابق شکل 2- ب، ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده معرفی می‌شود که در شکل 2- ج، مشاهده می‌شود. در این ساختار، فنر با طول 70 میلی‌متر، قطر مقطع 1.5 میلی‌متر و گام 5 میلی‌متر نقش حمایت‌کننده برای دیواره‌ی سلول‌ها ایفا می‌کند به منظور انجام آزمون فشار طبق استاندارد [26] ASTM D1621، تمام نمونه‌ها به صورت مکعبی و به ابعاد $70 \times 70 \times 70$ میلی‌متر مدل‌سازی شدند.

2-2- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌ها پس از مدل‌سازی سه‌بعدی، با بهره‌گیری از فناوری ساخت افزایشی به روش مدل‌سازی رسوب‌شده (FDM) و با استفاده از دستگاه پرینتر سه‌بعدی مدل‌های پرینت‌شده، تولید شدند. در این مطالعه برای ساخت نمونه‌ها از ماده‌ی زیست‌تخریب‌پذیر پلی‌لاکتیک‌اسید (+PLA) تولیدشده توسط شرکت ESUN استفاده شد. ابتدا مدل‌های سه‌بعدی مطابق شکل 3، با کمک نرم‌افزار 3D Simplify و با ایجاد تنظیمات چاپ یکسان، مطابق جدول 1 آماده‌ی ساخت شدند. پس از آن فرآیند چاپ به صورت افقی انجام شد تا از ساخت ساپورت جلوگیری شود. همچنین برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد +PLA، سه نمونه مطابق با استاندارد [27] ASTM D638 طبق شکل 4 مدل‌سازی و با ایجاد تنظیمات چاپ یکسان با سایر نمونه‌ها، ساخته شد در ادامه نمونه‌ها، تحت کشش تک‌محوره قرار گرفتند که نتایج آن در جدول 2 و شکل 5 مشاهده می‌شود.

سازی تا انبساط کامل و پرشدن فضای بین سلولی ساختار لانه‌زنبوری ادامه یافت. سپس بعد از خشک شدن کامل فوم و حذف قسمت‌های اضافی، نمونه‌های نهایی برای مراحل بعد آماده شدند. همچنین به منظور ارزیابی خواص مکانیکی فوم پلی‌اورتان، دو نمونه‌ی مکعبی با ابعاد $70 \times 70 \times 70$ میلی‌متر و چگالی 57.2 ساخته شدند. در ادامه، نمونه‌ها تحت آزمون فشار شبه‌استاتیکی قرار گرفتند که نتایج حاصل از این آزمون، در قالب نمودار نیرو-جابجایی در شکل 6 و جدول 3 مشاهده می‌شود.

جدول 3 خواص مکانیکی فوم پلی‌اورتان

Table 3 Mechanical Properties of PU Foam

جنس مواد	چگالی (kg/m^3)	جذب انرژی (J)	جذب انرژی ویژه (kJ/kg)
فوم پلی‌اورتان	57.2	53	2.7

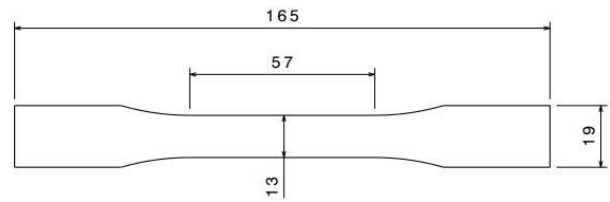


Fig. 4 Tensile Test Specimens [28]

شکل 4 نمونه‌های آزمون کشش [28]

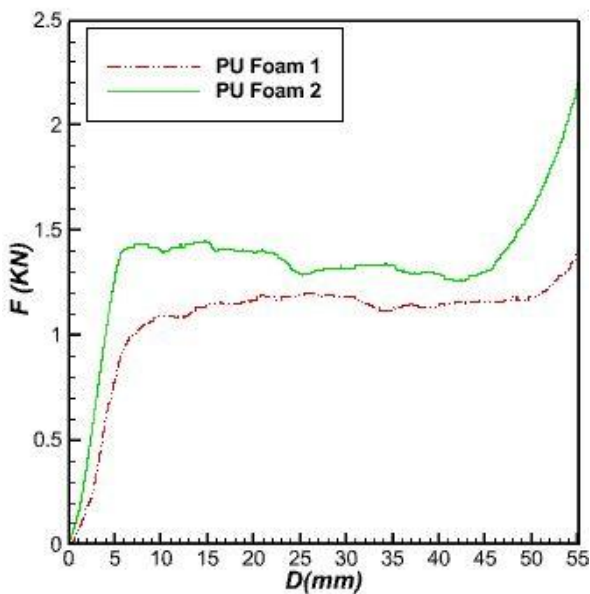


Fig. 6 Load-displacement diagrams of Polyurethane Foam [28]

شکل 6 منحنی نیرو-جابجایی فوم پلی‌اورتان [28]

پس از ساخت نمونه‌ها توسط پرینتر سه‌بعدی و تزریق فوم پلی‌اورتان، نمونه‌های لانه‌زنبوری سنتی مطابق شکل 7-الف و نمونه‌های لانه‌زنبوری تقویت‌شده مطابق شکل 7-ب، آماده شدند. در ادامه نمونه‌ها جهت سهولت در نام‌گذاری، کدگذاری شدند و وزن آن‌ها جهت محاسبه خواص ضربه‌پذیری، اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول 4 آورده شده‌است.

4-2- آزمون فشار شبه‌استاتیکی

به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر و ساختار لانه‌زنبوری سنتی در حالت خالی و پرشده با فوم، نمونه‌ها در جهت خارج از صفحه تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار گرفتند. در این مطالعه، از دستگاه آزمون Zwick-roll Z100 با ظرفیت بارسنج 10 کیلو نیوتن استفاده شد. در این آزمایش، هر نمونه مطابق شکل 8، بین دو فک دستگاه قرار گرفت سپس فک بالا با سرعت ثابت 5 میلی‌متر بر دقیقه، به سمت پایین حرکت کرد و ساختار مشبک را تا جابه‌جایی 55 میلی‌متر تحت فشار قرار داد. در حین بارگذاری تصاویر تغییر شکل ساختارها، ثبت شد. علاوه بر این، داده‌های تغییر مکان و نیرو، توسط رایانه‌ی متصل به دستگاه، جمع‌آوری و در قالب نمودارهای نیرو-جابجایی ارائه شدند.

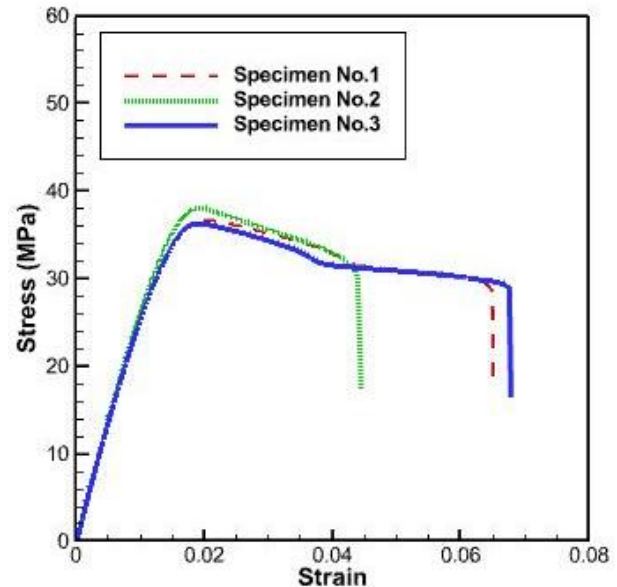


Fig. 5 Stress-Strain Curve Of PLA+ Specimens [28]

شکل 5 نمودار تنش- کرنش نمونه‌های PLA+ [28]

جدول 2 خواص مکانیکی مواد PLA+ [28]

Table 2 Mechanical Properties of PLA+ [28]

جنس مواد	چگالی (g/cm^3)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
+PLA	1.2	33.4	37	2.71

2-3- ساخت و تزریق فوم

پس از ساخت نمونه‌ها توسط پرینتر سه‌بعدی، فضای خالی ساختارها با فوم دوجزئی پلی‌اورتان پر شدند تا عملکرد مکانیکی آن‌ها افزایش یابد. در این مطالعه، به منظور اضافه کردن فوم به فضای خالی ساختارها، دو ماده‌ی Polyol Rand F 4109 و ISO PM 200 تولیدشده توسط شرکت شیمیایی پارس با نسبت یکسان یک به یک با یکدیگر مخلوط شدند، سپس بلافاصله به داخل ظرف حاوی ساختار لانه‌زنبوری اضافه شدند. پس از چند ثانیه، مخلوط طی واکنش گرمازا، منبسط شده و شروع به تشکیل فوم می‌کند. فرآیند فوم

3- نتایج و بحث

در تحلیل عملکرد مکانیکی و محاسبه‌ی پارامترهای ضربه‌پذیری و جذب انرژی ساختارهای مشبک، از نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از بارگذاری فشاری استفاده می‌شود. این نمودار به دو بخش اصلی الاستیک و پلاستیک تقسیم‌بندی می‌شود. با اعمال بار، ابتدا ساختار مشبک، تغییر شکل برگشت پذیر و الاستیک را تجربه می‌کند. در ادامه، با افزایش بار اعمال شده، ساختار وارد ناحیه‌ی تغییر شکل غیر قابل برگشت و پلاستیک شده و لهیدگی سازه در این ناحیه آغاز می‌شود و تا تراکم کامل ادامه می‌یابد. برای محاسبه‌ی ظرفیت جذب انرژی ساختار مشبک، می‌توان مطابق رابطه‌ی 1، مساحت سطح زیر منحنی نمودار را تا قبل از تراکم نهایی محاسبه نمود.

$$EA = \int_0^d f(x)dx \quad (1)$$

3-1- پاسخ فشرده‌سازی خارج از صفحه

نتایج آزمایش فشرده‌سازی، بر روی هر 12 نمونه، در شکل‌های 9 تا 12 در قالب نمودار نیرو-جابجایی ارائه شد و در ادامه این نمودارها به عنوان مرجعی برای محاسبه‌ی خواص لهیدگی و جذب انرژی، مورد استفاده قرار گرفتند.

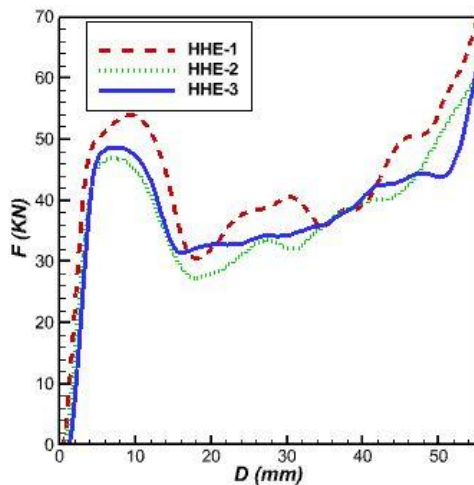


Fig. 9 Load-displacement diagrams of specimen HHE
شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی ساختار HHE

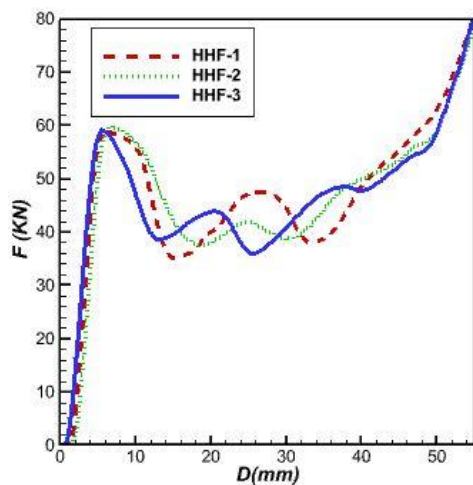


Fig. 10 Load-displacement diagrams of specimen HHF
شکل 10 منحنی نیرو-جابجایی ساختار HHF

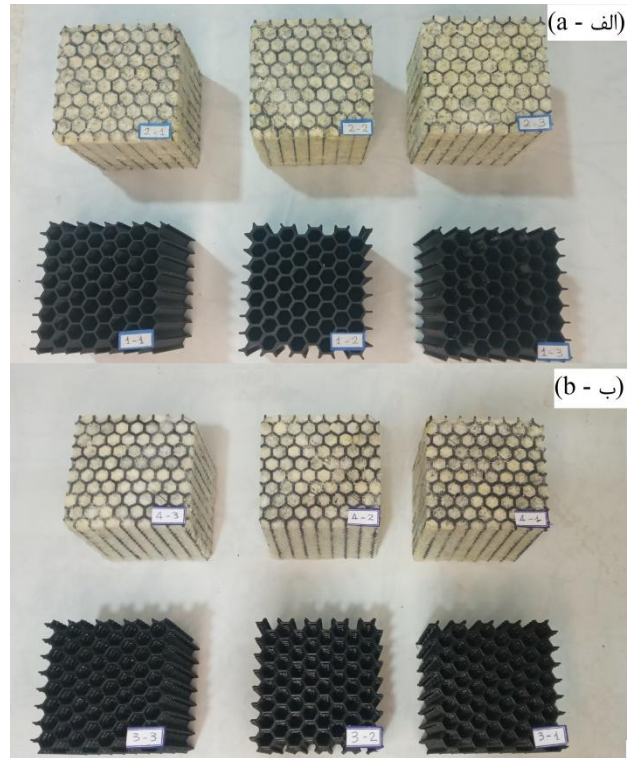


Fig. 7 a) Traditional honeycomb Specimens b) Spring-Reinforced honeycomb

شکل 7 الف) نمونه‌های لانه‌زنبوری سنتی ب) نمونه‌های لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر



Fig. 8 Zwick- roell z100 test apparatus for quasi-static test
شکل 8 دستگاه آزمون فشار و نحوه‌ی قرارگیری نمونه در دستگاه

جدول 4 کدگذاری نمونه‌ها

Table 4 Specimens Coding

کد ساختار	توضیحات	وزن (g)
1 HHE	لانه‌زنبوری سنتی بدون فوم	80
2 HHF	لانه‌زنبوری سنتی پرشده با فوم	110
3 SHE	لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر بدون فوم	101
4 SHF	لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر پرشده با فوم	133

¹Hexagon Honeycomb Empty
²Hexagon Honeycomb Foam Filled
³Spring Honeycomb Empty
⁴Spring Honeycomb Foam Filled

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} \quad (3)$$

در رابطه‌ی بالا CFE بازده نیروی لهیدگی، MCF میانگین نیروی لهیدگی و PCF اولین نیروی بیشینه می‌باشد. برای محاسبه MCF از نمودار نیرو-جاب‌جایی، از رابطه‌ی (4) استفاده می‌شود.

$$MCF = \frac{1}{a} \int_0^d f(x) dx = \frac{EA}{a} \quad (4)$$

تمام نمونه‌ها تا جاب‌جایی 55 میلی‌متر تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. با توجه به نمودارهای نیرو-جاب‌جایی، ساختارها به طور میانگین تا فشردگی 46 میلی‌متر توانایی جذب انرژی دارند و پس از آن پارامتر نیرو با شیب زیاد به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. از این مقدار در محاسبه‌ی MCF به عنوان طول فشردگی (d) مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از نمودارهای نیرو-جاب‌جایی حاصل از آزمایش و فرمول‌های (1) تا (4) پارامترهای ضربه‌پذیری مانند جذب انرژی ویژه، جذب انرژی، میانگین نیروی لهیدگی و بازده‌ی نیروی لهیدگی محاسبه شدند که در جدول 5 مشاهده می‌شود.

جدول 5 مؤلفه‌های ضربه‌پذیری

Table 5 Crashworthiness parameters

SEA (kJ/kg)	EA (J)	MCF (kN)	CFE (%)	PCF (kN)	کد ساختار
21.2	1697	36.8	74	49.9	HHE
18	1976	42.9	73	59.2	HHF
19.2	1939	42.2	92	45.9	SHE
17.9	2382	51.8	92	56.3	SHF

درک رفتار فروریزی ساختار مشبک، در طراحی سازه با ویژگی‌های بهبودیافته، از اهمیت بالایی برخوردار است. شکل 13 نحوه‌ی فروریزی ساختارهای لانه‌زنبوری سنتی و لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر در حالت‌های خالی و پرشده با فوم را در جاب‌جایی‌های مشخص نشان می‌دهد که می‌توان در جاب‌جایی‌های یکسان، تغییر شکل هر کدام از ساختارها را با یکدیگر مقایسه نمود. هنگامی که سازه، تحت فشار محوری قرار می‌گیرد در مراحل اولیه، به صورت الاستیک، تغییر شکل می‌دهد و در نمودار نیرو-جاب‌جایی، نیرو با شیب ملایم افزایش می‌یابد. در این مرحله، با حذف فشار، سازه به شکل اولیه‌ی خود باز می‌گردد. با اعمال بار بیشتر، سازه وارد ناحیه‌ی پلاستیک شده و تغییر شکل‌ها، با حذف بار تغییری نمی‌کنند در این حالت لهیدگی سازه شروع می‌شود که در نمودار نیرو-جاب‌جایی، نیرو ابتدا با افت مواجه می‌شود سپس رفتار تقریباً تناوبی را طی می‌کند با تداوم اعمال فشار، سازه به تراکم نهایی خود می‌رسد در این حالت، سازه‌ی مشبک تقریباً صلب عمل می‌کند و نیرو به صورت ناگهانی به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و توانایی جذب انرژی آن در برابر نیروهای اعمالی به پایان می‌رسد.

همانطور که در پژوهش قبلی [28] بررسی شد مطابق شکل 13 در ساختار HHE ابتدا دیواره‌های کناری تحت فشار، دچار کمناش می‌شوند سپس چین‌خوردگی و لهیدگی از بالا شروع می‌شود و تا تراکم کامل ادامه می‌یابد این رفتار منطبق با رفتار لانه‌زنبوری مطالعه شده در پژوهش‌های گذشته [29] است. در ساختار HHF فروریزی و شکست ساختار، تقریباً از ارتفاع 50 درصد سازه شروع می‌شود، سپس با تداوم اعمال فشار، دیواره‌ها از دو طرف به سمت بیرون کمناش کرده و لهیدگی تا رسیدن به تراکم نهایی ادامه پیدا می‌کند.

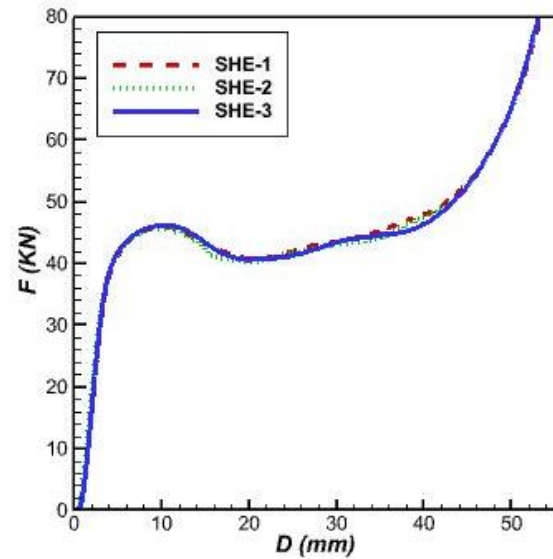


Fig. 11 Load-displacement diagrams of specimen SHE

شکل 11 منحنی نیرو-جاب‌جایی ساختار SHE

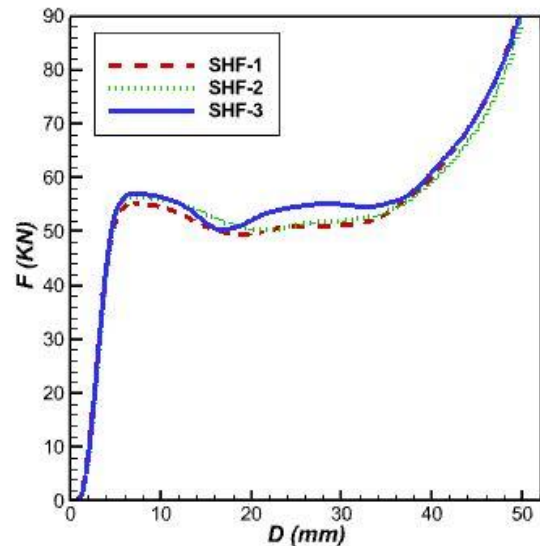


Fig. 12 Load-displacement diagrams of specimen SHF

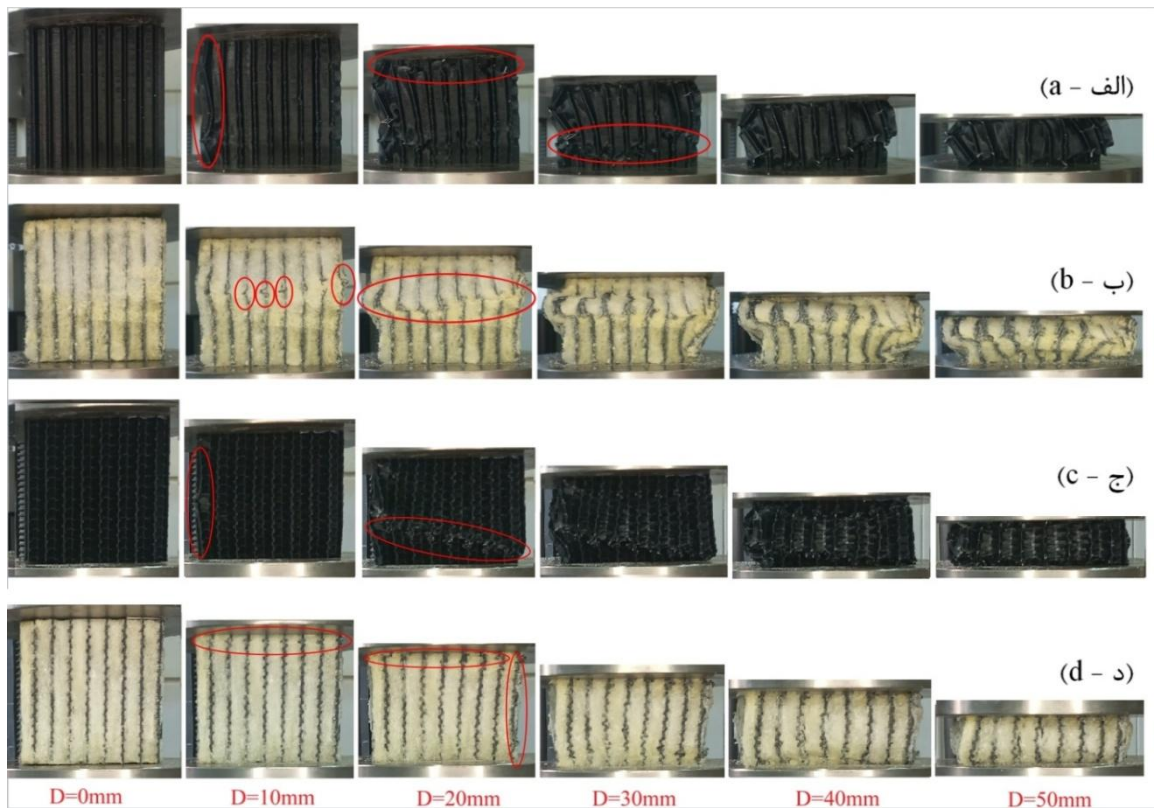
شکل 12 منحنی نیرو-جاب‌جایی ساختار SHF

3-2- ارزیابی ضربه‌پذیری

پارامتر وزن در طراحی ساختارهای مشبک جاذب انرژی مورد استفاده‌ی صنایع هوایی، اهمیت بسیار بالا و حیاتی دارد. در همین راستا، برای ارزیابی عملکرد این ساختارها، از مؤلفه‌ی جذب انرژی ویژه، مطابق فرمول (2) استفاده می‌شود. این مؤلفه امکان مقایسه و ارزیابی صحیح ظرفیت جذب انرژی ساختارهای مشبک را در واحد وزن، فراهم می‌سازد.

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (2)$$

در رابطه‌ی بالا SEA میزان جذب انرژی ویژه، EA ظرفیت جذب انرژی و m وزن ساختار مشبک می‌باشد. علاوه بر این، بازده نیروی لهیدگی CFE مؤلفه مهمی برای مقایسه و ارزیابی عملکرد ضربه‌پذیری در کاربردهای جذب انرژی می‌باشد که طبق فرمول (3) تعریف می‌شود.

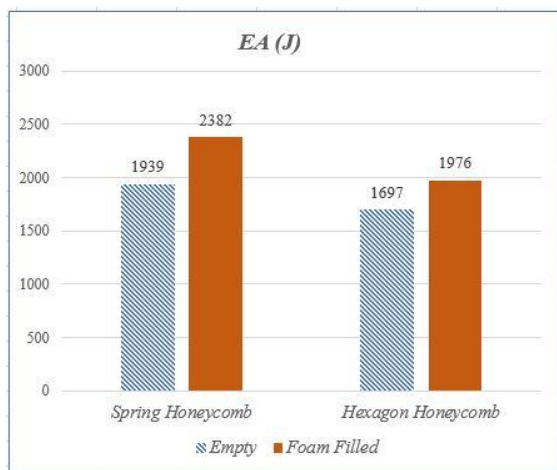


شکل 13 نحوه‌ی تغییر شکل ساختارهای (الف) HHE (ب) HHF (ج) SHE (د) SHF

Fig. 13 Deflection mechanism of specimens a) HHE b) HHF c) SHE d) SHF

جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی و افزایش 24 درصدی راندمان نیروی لهیدگی و در حالت پرشده با فوم با افزایش 21 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی و 26 درصدی راندمان نیروی لهیدگی، عملکرد بهبودیافته‌ای نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی خود دارد. همچنین حضور فوم پلی‌اورتان در ساختارهای مشبک لانه‌زنبوری سنتی و لانه‌زنبوری تقویت‌شده، به ترتیب باعث افزایش 16 و 23 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی می‌شود که نشان از بهبود عملکرد مکانیکی آن دارد. به طور کلی در این پژوهش، بهترین عملکرد ضربه‌پذیری مربوط به ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر و پرشده با فوم می‌باشد و ضعیف‌ترین عملکرد، به ساختار لانه‌زنبوری سنتی بدون فوم، تعلق دارد.

در ساختار SHE سازه، مقاومت بیشتری در برابر فشار اعمال‌شده از خود، نشان می‌دهد و شکست در ناحیه‌ی محدودتری اتفاق می‌افتد. در این ساختار، شکست در دیواره‌ی عمودی آغاز می‌شود سپس با تداوم اعمال فشار از ارتفاع حدود 30 درصد شروع به چین‌خوردگی و لهیدگی می‌کند. تغییر رنگ در بخش‌هایی که لهیدگی موضعی اتفاق می‌افتد نمایانگر ورود سازه به ناحیه‌ی پلاستیک می‌باشد. در ساختار SHF چین‌خوردگی، از بالاترین ارتفاع آغاز می‌شود و با تداوم اعمال فشار در کل سازه اتفاق می‌افتد که در تغییر شکل و اعوجاج دیواره‌ی کناری به وضوح دیده می‌شود. با بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی، می‌توان نشان داد مقاومت فشاری ساختارهای تقویت‌شده‌ی SHE و SHF نسبت به ساختارهای سنتی HHE و HHF با افزایش همراه است. علاوه بر این، ساختارهای SHF و HHF تغییر شکل محدودتری را نسبت به ساختارهای SHE و HHE تجربه می‌کنند که دلیل آن را می‌توان حضور فوم پلی‌اورتان در فضای خالی ساختار بیان کرد.



شکل 14 نمودار میله‌ای مقایسه‌ی جذب انرژی نمونه‌ها

Fig. 14 Bar chart comparing the EA of the Specimens

نتایج نشان داد، تزریق فوم به ساختار لانه‌زنبوری علاوه بر افزایش استحکام فشاری و جذب انرژی، وزن ساختار را هم افزایش می‌دهد که بر روی خاصیت جذب انرژی ویژه تأثیرگذار هستند. علاوه بر این، با توجه به نمودارها، ساختارهای SHE و SHF با ورود به ناحیه‌ی پلاستیک، افت نیروی کمتری را نسبت به ساختارهای HHE و HHF تجربه می‌کنند و همان‌طور که نتایج عددی هم تایید می‌کنند منجر به افزایش MCF و CFE خواهد شد که بیانگر بهبود عملکرد ضربه‌پذیری ساختارهای پرشده با فوم می‌باشد. نزدیک بودن MCF و PCF منجر به افزایش CFE می‌شود، که برای جذب‌های انرژی مزیت محسوب می‌شود.

با توجه به شکل‌های 14 تا 16 و محاسبات انجام‌شده می‌توان بیان کرد ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر، در حالت خالی با افزایش 14 درصدی

لهیدگی و 26 درصدی راندمان نیروی لهیدگی نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی متناظر خود همراه است.

- حضور فوم در ساختار لانه‌زنبوری سنتی، منجر به افزایش 16 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی شد.
- حضور فوم در ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر، با افزایش 23 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی، اثر مثبت خود را بر خواص مکانیکی ساختار پیشنهادی نشان داد.
- در ساختار تقویت‌شده‌ی پیشنهادی، حضور فوم پلی‌اورتان نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی اثر مثبت افزایش‌دهنده‌تری دارد.

در نتیجه، در این مطالعه نشان داده شد که ساختار پیشنهادی لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر، عملکرد بهبودیافته‌ای نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی در کاربردهای جذب انرژی و محافظتی دارد و می‌تواند در صنعت جایگزین مناسبی برای آن باشد. همچنین پرکردن فضای خالی بین سلول‌های ساختارهای مشبک با فوم پلیمری سبک، باعث افزایش استحکام فشاری و جذب انرژی آن می‌شود که می‌تواند به منظور جلوگیری از صدمات و افزایش ایمنی در جذب‌های انرژی مورد استفاده قرار گیرد.

5- مراجع

[1] Gibson, L.J., and Ashby, M.F., "Cellular Solids: Structure and Properties," Cambridge, London, England, 1997.

[2] Ansari-pour, A., Heidari-Rarani, M., Mahshid, R., "A review of 4D printing of polymers and polymer composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 1, pp. 2147-2165, 2023.

[3] Esmaceli, A., Karimi, M., Heidari-Rarani, M., & Shojaie, M., "A new design of star auxetic metastructure with enhanced energy-absorption under various loading rates: Experimental and numerical study," Structures Elsevier, Vol. 63, pp. 106457, 2024.

[4] Ramakrishna, D., & Bala Murali, G., "Bio-inspired 3D-printed lattice structures for energy absorption applications: A review," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 237, No. 3, pp. 503-542, 2023.

[5] Hosseini Vajari, M., & Behzadnasab, M., "An experimental investigation on mechanical properties of 3D-printed bio-inspired sandwich panels based on silk cocoon geometry," In Persian, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 19-26, 2021.

[6] Parvaresh, M., Ahmadi, H., and Liaghat, Gh., "Investigation on the Energy Absorption of Elastomeric Auxetic Structures in Quasi-static and Impact Loading," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1431-1442, 2021.

[7] Khan, S. A., Rahman, M. A., Khraisheh, M., & Hassan, I. G., "Advances in 3D printed periodic lattice structures for energy research: Energy storage," transport and conversion applications, 2024.

[8] Hou, W., He, P., Yang, Y., & Sang, L., "Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 247, pp.108198, 2023.

[9] Hidayat, D., Istiyanto, J., Sumarsono, D. A., Kurniawan, F., Ardiansyah, R., Wandono, F. A., & Nugroho, A., "Investigation on the Crashworthiness Performance of Thin-Walled Multi-Cell PLA 3D-Printed Tubes: A Multi-Parameter Analysis," Designs, Vol. 7, No. 5, pp. 108, 2023.

[10] Xu, M., Xu, Z., Zhang, Z., Lei, H., Bai, Y., & Fang, D., "Mechanical properties and energy absorption capability of AuxHex structure under in-plane compression: Theoretical and experimental studies," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 159, pp. 43-57, 2019.

[11] Fu, M. H., Chen, Y., & Hu, L. L., "Bilinear elastic characteristic of enhanced auxetic honeycombs," Composite Structures, Vol. 175, pp. 101-110, 2017.

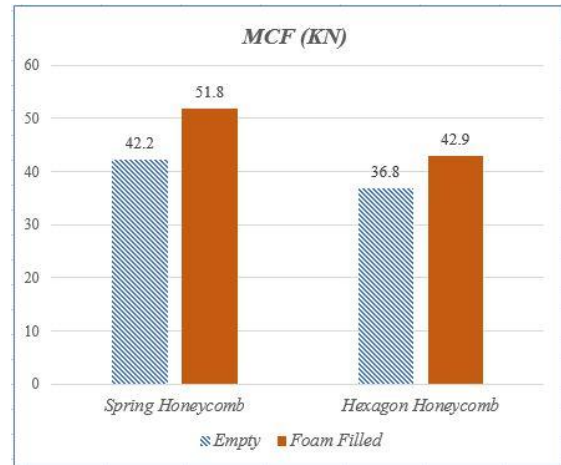


Fig. 15 Bar chart comparing the MCF of the Specimens

شکل 15 نمودار میله‌ای مقایسه‌ی میانگین نیروی لهیدگی نمونه‌ها

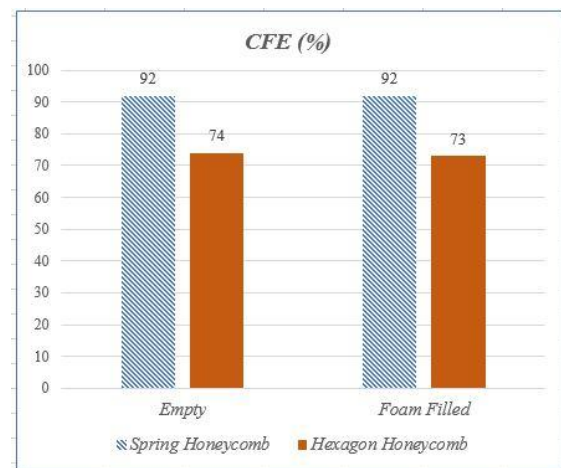


Fig. 16 Bar chart comparing the CFE of the Specimens

شکل 16 نمودار میله‌ای مقایسه‌ی بازده نیروی لهیدگی نمونه‌ها

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک ساختار جدید لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر، به عنوان جاذب انرژی معرفی شد و عملکرد آن تحت بارگذاری فشاری، در جهت خارج از صفحه، نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، تأثیر حضور فوم پلی‌اورتان در فضای خالی ساختارهای لانه‌زنبوری، بر میزان استحکام فشاری و جذب انرژی، مورد بحث و بررسی قرار گرفت. مؤلفه‌های ضربه‌پذیری از نمودارهای نیرو- جابه‌جایی استخراج شدند و نحوه‌ی تغییر شکل و فروریزی ساختارها مورد بحث قرار گرفتند. با استناد به داده‌های بدست‌آمده از این مطالعه، می‌توان نتایج زیر را عنوان کرد:

- ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر در حالت خالی با افزایش 14 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی و 24 درصدی راندمان نیروی لهیدگی نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی متناظر خود، عملکرد مکانیکی بهینه‌تری از خود نشان داد.
- ساختار لانه‌زنبوری تقویت‌شده با فنر در حالت پرشده با فوم پلی‌اورتان، با افزایش 21 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی

- [29] Alexander, J.M., "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading," *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 13, No. 1, pp.10-15, 1960.
- [12] Wang, H., Lu, Z., Yang, Z., & Li, X., "A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance," *Composite Structures*, Vol. 208, pp. 758-770, 2019.
- [13] Wei, L., Zhao, X., Yu, Q., & Zhu, G., "A novel star auxetic honeycomb with enhanced in-plane crushing strength," *Thin-Walled Structures*, Vol. 149, pp. 106623, 2020.
- [14] Wang, H., Lu, Z., Yang, Z., & Li, X., "In-plane dynamic crushing behaviors of a novel auxetic honeycomb with two plateau stress regions," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 151, pp. 746-759, 2019.
- [15] Zamani, M. H., Heidari-Rarani, M., & Torabi, K., "Optimal design of a novel graded auxetic honeycomb core for sandwich beams under bending using digital image correlation (DIC)," *Composite structures*, Vol. 286, pp. 115310, 2022.
- [16] Anni, I. A., Uddin, K. Z., Pagliocca, N., Singh, N., Rahman, O., Youssef, G., & Koohbor, B., "Out-of-plane load-bearing and mechanical energy absorption properties of flexible density-graded TPU honeycombs," *Composites Part C: Open Access*, Vol. 8, pp. 100284, 2022.
- [17] Niu, X., Xu, F., & Zou, Z., "Bionic inspired honeycomb structures and multi-objective optimization for variable graded layers," *Journal of Sandwich Structures & Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 215-231, 2023.
- [18] Bates, S. R., Farrow, I. R., & Trask, R. S., "Compressive behaviour of 3D printed thermoplastic polyurethane honeycombs with graded densities," *Materials & Design*, Vol. 162, pp. 130-142, 2019.
- [19] Zarei, H.R., "Experimental Investigation of Energy Absorption of Aluminum/Composite Hybrid Tube Produced by Tape Winding Method under Quasi-Static Load," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 55 -67, 2022.
- [20] Gharehbaghi, H., Farrokhhabadi, A., "Experimental and numerical investigation of the energy absorption capability of the bi-material lattice structure," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 2, pp. 1976-1982, 2023.
- [21] Sarkhosh, R., Farrokhhabadi, A., Zarei H., "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*, Vol. 44, No. 8, pp. 346, 2022.
- [22] Montazeri, A., Bahmanpour, E., & Safarabadi, M., "Three - point bending behavior of foam - filled conventional and auxetic 3D - printed honeycombs," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 25, No. 17, pp. 2300273, 2023.
- [23] Taghipoor, H. and Malekzade Fard, K., "Experimental and numerical study of Energy Absorption in foam filled Trapezoidal core sandwich panels subjected to quasi-static loading," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 4, pp. 565-574, 2019.
- [24] Farrokhhabadi, A., Ashrafian, M. M., Behraves, A. H., & Hedayati, S. K., "Assessment of fiber-reinforcement and foam-filling in the directional energy absorption performance of a 3D printed accordion cellular structure," *Composite Structures*, Vol. 297, pp. 115945, 2022.
- [25] Fathi, M., Sameezadeh, M., & Vaseghi, M., "Compressive response and energy absorption of foam-filled aluminum honeycomb composite: Experiments and simulation," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 45, No. 11, pp. 562, 2023.
- [26] Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics, ASTM Standard D1621, AI, US, 2010.
- [27] Heidari-Rarani, M., Ezati, N., Sadeghi, P., "Effect of various processing parameters on tensile properties of FDM 3D printed of PLA specimens," In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 7, pp. 855-862, 2020.
- [28] Sarkhosh, R., "Experimental study of energy absorption characteristic of sunflower-inspired foam-filled honeycomb structure under out-of-plane loading", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 2, pp. 2512-2520, 2024.