



## مطالعه تجربی ویژگی جذب انرژی ساختار لانه زنبوری پر شده با فوم الهام گرفته از گل آفتابگردان تحت بارگذاری خارج از صفحه

رضا سرخوش<sup>1\*</sup>

1- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران.

\* تهران، صندوق پستی 13846-63113، R.sarkhosh@ssau.ac.ir

| چکیده  | اطلاعات مقاله:   |
|--|--|
| این پژوهش ساختار لانه زنبوری گرادایانی جدیدی را به عنوان جذب انرژی معرفی می کند که الگوی تکرار سلول های واحد آن از گل آفتابگردان الهام گرفته شده است. همچنین به ارزیابی و مقایسه مؤلفه های ضربه پذیری و تغییر شکل این ساختار با ساختار لانه زنبوری سنتی می پردازد. در این پژوهش اثر پرکردن ساختار مشبک لانه زنبوری با فوم پلی اورتان سخت بر جذب انرژی و استحکام ساختار مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا چهار نوع لانه زنبوری با پرینتر سه بعدی FDM با ابعاد 70×70×70 میلی متر با جنس پلی لاکتیک اسید (PLA) ساخته شد. سپس فوم دو جزئی پلی اورتان به فضای خالی میان سلول ها تزریق شد، در ادامه نمونه ها تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیکی قرار گرفتند و نمودار نیرو-جابجایی حاصل از آزمایش استخراج شد. در نهایت به بررسی مؤلفه های ضربه پذیری، مانند جذب انرژی، جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهیدگی پرداخته شده است. نتایج تحلیل تجربی نشان داد ساختار پیشنهادی لانه زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان با افزایش 4 و 6 درصدی جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهیدگی، عملکرد بهتری نسبت به ساختار لانه زنبوری سنتی در کاربردهای جذب انرژی دارد. همچنین به کارگیری فوم پلی اورتان در ساختارهای مشبک لانه زنبوری سنتی و لانه زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان باعث افزایش 16 و 10 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی شد که نشان از افزایش استحکام و بهبود عملکرد آن دارد. | دریافت: 1403/06/25<br>پذیرش: 1403/08/15  |
|  | <b>کلیدواژگان:</b><br>ساختار لانه زنبوری،<br>جذب انرژی،<br>پرینتر سه بعدی،<br>فوم پلی اورتان،<br>گل آفتابگردان |

## Experimental study of energy absorption characteristic of sunflower-inspired foam-filled honeycomb structure under out-of-plane loading

Reza Sarkhosh<sup>1\*</sup>

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, Polyurethane Foam, 3D printer, Energy Absorber, Sunflower

### Abstract

This research introduces a novel gradient honeycomb structure as an energy absorber inspired by the sunflower pattern. It evaluates and compares the crashworthiness parameters and deformation mode of this structure with traditional honeycomb structures. In this research, the effect of filling the honeycomb lattice structure with rigid polyurethane foam on energy absorption and structural strength is investigated. Initially, four types of honeycomb samples with dimensions of 70×70×70 mm were fabricated using an FDM 3D printer with poly(lactic acid) (PLA) material. Subsequently, two-component polyurethane foam was injected into the space between the cells. Next, the samples were subjected to quasi-static compressive loading, and the force-displacement diagram obtained from the test was extracted. Finally, crashworthiness parameters such as energy absorption, specific energy absorption, and crushing force efficiency have been investigated. Experimental results demonstrated that the proposed sunflower-inspired honeycomb structure exhibited a 4% and 6% increase in specific energy absorption and crushing force efficiency, respectively, compared to traditional honeycomb structures in energy absorption applications. Additionally, the use of polyurethane foam in both conventional and sunflower-inspired honeycomb lattice structures led to a 16% and 10% increase in energy absorption and average crushing force, respectively, indicating increased strength and improved performance.

Please cite this article using:

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.  
https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2040117.1897

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

ساختارهای مشبک به دلیل خواص مکانیکی منحصربه‌فرد، به خصوص ویژگی جذب انرژی که دارند در صنایع مختلف مانند حمل و نقل، صنایع دریایی و صنایع هوافضا و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. محققان همواره در تلاش هستند با ارائه و ایجاد تغییر در ترکیب مواد و هندسه ساختار و... خواص مکانیکی ساختارهای مشبک را بهبود ببخشند [2-4]. این امر با ظهور پرینترهای سه‌بعدی که تولید ساختارهای پیچیده را ممکن می‌سازد مورد توجه محققین قرار گرفته‌است و مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ساختارهای مشبک با الگو گرفتن از طبیعت [5] و محیط پیرامون که با کمک ساخت افزایشی تولید می‌شوند، می‌تواند خواص مکانیکی به خصوص جذب انرژی بهتری نسبت به ساختارهای مشبک سنتی داشته‌باشند.

در همین راستا، انصاری‌پور و همکاران [6] به بررسی توانایی چاپ سه‌بعدی و چهاربعدی در ساخت قطعات پلیمری پرداختند و توانایی این روش‌ها را برای تولید قطعات، با هندسه‌های پیچیده و هوشمند بررسی نمودند. کی و همکاران [7] ساختار مشبک لانه‌زنبوری با الهام از اورینگامی را مورد مطالعه تجربی و عددی قرار دادند و پس از ساخت و انجام آزمایش فشار و بررسی نتایج، نشان دادند که ساختار پیشنهادی لانه‌زنبوری اورینگامی جذب انرژی بهتری نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی دارد. لی و همکاران [8] در پژوهشی به طراحی و تحلیل ساختارهای لانه‌زنبوری الهام‌گرفته از طبیعت، به عنوان جاذب انرژی سیستم باتری خودروهای برقی پرداختند و مؤلفه‌های مهم بر عملکرد ایمنی این ساختارها را مورد بررسی قرار دادند. عسگری و همکاران [9] با الهام از ساختار داخلی چوب، ساختاری نوین را به منظور بهبود خواص مکانیکی ارائه‌دادند که پس از ساخت توسط پرینتر سه‌بعدی SLA و انجام آزمون فشار به بررسی خواص مکانیکی آن پرداختند و نتایج تجربی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه کردند.

همچنین ساختارهای مشبک که به صورت سلسله‌مراتبی و گرادیدانی طراحی می‌شوند، از لحاظ خواص مکانیکی نسبت به ساختارهای معمولی دارای برتری هستند. به همین دلیل، استفاده از این نوع ساختارها در انواع ابزارهای محافظ به عنوان جاذب انرژی مورد توجه قرار گرفته‌است [10]. در همین راستا ژانگ و همکاران [11] ساختار سلسله‌مراتبی جدیدی را به منظور افزایش عملکرد مکانیکی سازه طراحی نمودند که توسط ساخت افزایشی به کمک لیزر SLM ساخته‌شد و پس از انجام آزمون فشار و بررسی نتایج تجربی و عددی، نشان‌دادند ساختارهای سلسله‌مراتبی خواص مکانیکی، به خصوص جذب انرژی بهتری نسبت به ساختارهای معمولی دارند. لانگ بای و همکاران [12] ساختار مشبک گرادیدانی جدیدی را با پرینتر سه‌بعدی با روش SLS ساختند و تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی قرار دادند و پس از بررسی نتایج و نمودارها، نشان دادند که ساختار گرادیدانی نسبت به ساختار یکنواخت خواص مکانیکی و استحکام مطلوب‌تری دارد. وانگ و همکاران [13] با جایگزین کردن تیرهای مدور به جای تیرهای صاف در ساختار مشبک و طراحی سلسله‌مراتبی پس از تولید ساختار از طریق ساخت افزایشی و انجام آزمون فشار شبه‌استاتیکی و بررسی نتایج تجربی و عددی توانستند نشان دهند که ساختار پیشنهادی، جذب انرژی مطلوب‌تری نسبت به ساختار اولیه دارد. در تحقیقی ژانگ و همکاران [14] به مرور و معرفی انواع ساختارهای مشبک مطالعه‌شده در سال‌های اخیر پرداختند و این ساختارها را از جهت خواص مکانیکی مورد مقایسه قرار دادند که با مقایسه مطالعات انجام‌شده در این حوزه می‌توان به برتری ساختارهای سلسله‌مراتبی و گرادیدانی نسبت به ساختارهای یکنواخت پی‌برد.

علاوه‌براین، ساختارهای آگزتیک نشان‌دادند که خواص مکانیکی بهبودیافته‌ای نسبت ساختارهای سنتی دارند در همین راستا، تان و همکاران [15] با ارائه ساختار مشبک آگزتیک سلسله‌مراتبی و ساخت نمونه با روش پرینتر سه‌بعدی و انجام آزمون فشار نشان‌دادند ساختار آگزتیک پیشنهادی در تصادفات می‌تواند خاصیت جذب انرژی و محافظتی بهتری نسبت به ساختارهای معمولی داشته‌باشد. نجفی و همکاران [16] خواص مکانیکی و جذب انرژی ساختار لانه‌زنبوری و سه ساختار آگزتیک ری اینترنت، سر نیزه‌ای، آنتی‌تتراکیرال تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ساختارهای آگزتیک جذب انرژی بهتری نسبت به ساختار لانه‌زنبوری معمولی دارند. شفیع‌پور و همکاران [17] ساختار لانه‌زنبوری هدف‌مندی با سفتی منفی طراحی و به کمک ساخت افزایشی تولید نمودند و پس از انجام آزمون فشار و مقایسه نتایج با شبیه‌سازی عددی نشان‌دادند که ساختار پیشنهادی برای کاربرد به عنوان جاذب انرژی گزینه‌ی مطلوب‌تری می‌باشد. همچنین پرورش و همکاران [18] به بررسی و مقایسه ساختارهای لانه‌زنبوری و ساختارهای آگزتیک که با مواد منعطف TPU از طریق ساخت افزایشی FDM ساخته شده‌بودند پرداختند. آن‌ها نشان‌دادند ساختارهای آگزتیک جذب انرژی بهتری نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی در بارگذاری شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای دارند. زمانی و همکاران [19] با طراحی نوآورانه‌ی گرادیدانی ضخامت و سایز سلول‌ها در ساختار آگزتیک خواص خمشی و جذب انرژی این ساختار را بهبود بخشیدند. اسماعیلی و همکاران [20] به بررسی عملکرد دو متاساختار آگزتیک نوین ستاره مثلثی آکستیک و ستاره‌ی مثلثی آکستیک - دوفلش پرداختند نمونه‌ها از طریق ساخت افزایشی ساخته‌شدند و تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی با سه نرخ مختلف قرار گرفتند نتایج نشان‌داد این دو ساختار پتانسیل بالایی برای بهبود استحکام و خواص جذب انرژی در مقایسه با ساختارهای معمولی و متداول دارند.

همچنین تحقیقات نشان‌دادند که استفاده از مواد ترکیبی [21] به ویژه استفاده از فوم‌های پلیمری سبک، در فضای خالی بین سلول‌های مشبک می‌تواند عملکرد ساختارهای مشبک را افزایش دهد در همین راستا آندریو و همکاران [22] سه ساختار مشبک دو بعدی با مواد ترکیبی فیبر کربن به کمک پرینتر سه‌بعدی را از لحاظ جذب انرژی مورد مطالعه قرار دادند، این ساختارها در دو جهت بارگذاری داخل و خارج از صفحه مورد آزمایش قرار گرفتند. آن‌ها پس از بررسی نتایج تجربی و رفتار ساختارها در پاسخ به فشار، به این نتیجه رسیدند که در ساختار پیشنهادی خاصیت جذب انرژی افزایش داشته‌است. ملاطفی و مظفری [23] به مطالعه عددی لانه‌زنبوری پر شده با فوم پلی‌اورتان در بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی با سرعت‌های مختلف پرداختند و نشان‌دادند در بارگذاری شبه‌استاتیکی، حضور فوم باعث افزایش جذب انرژی می‌شود و در بارگذاری دینامیکی با افزایش سرعت بارگذاری، تأثیر فوم بر جذب انرژی کاهش می‌یابد. فرخ آبادی و همکاران [24] در مطالعه‌ای به بررسی عددی و تجربی ساختارهای مشبک تولیدشده به روش پرینتر سه‌بعدی پر شده با فوم پلی‌اورتان تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی پرداختند و نشان‌دادند حضور فوم در ساختارهای مشبک منجر به افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود. یان و همکاران [25] با پر کردن فضای خالی سلول‌های شش‌ضلعی ساختار لانه‌زنبوری ساخته‌شده توسط پرینتر سه‌بعدی از فوم جاذب PMI نشان‌دادند خاصیت جذب انرژی و خواص مکانیکی در بارگذاری داخل صفحه و خارج از صفحه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. صنعت همواره نیازمند به ساختارهای سبک‌تر، مستحکم‌تر و خواص جذب انرژی بهبودیافته می‌باشد از طرفی ساختارهای سنتی و متداول

به منظور انجام آزمون فشار طبق استاندارد ASTM D1621 [26]، نمونه‌ها به صورت مکعبی و به ابعاد  $70 \times 70 \times 70$  میلی‌متر مطابق شکل 1-ب ترسیم شده است، ضخامت تمام دیوارها در این نمونه 0.8 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. به منظور مقایسه عملکرد ساختار پیشنهادی با ساختار لانه زنبوری سنتی، لانه زنبوری با مشخصات هندسی مطابق با شکل 2 و با ابعاد نمونه  $70 \times 70 \times 70$  میلی‌متر و شرایط ساخت یکسان طراحی شده است.

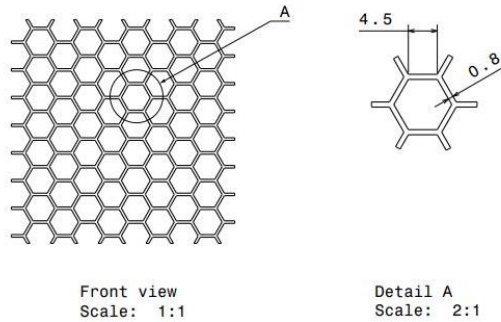
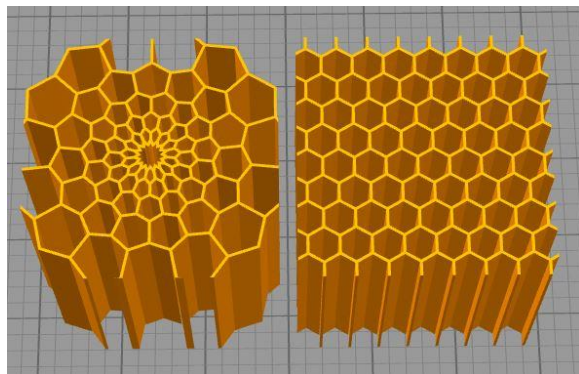


Fig. 2 Traditional honeycomb geometry

شکل 2 هندسه‌ی لانه زنبوری سنتی

2-2- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌ها از طریق ساخت افزایشی به روش FDM که یک فناوری پیشرفته در ساخت و تولید به حساب می‌آید، ساخته شد در این روش ماده پلی لاکتیک اسید که یک گرمانرم زیست تخریب پذیر می‌باشد از طریق حرارت دهی ذوب شده سپس مواد ذوب شده توسط نازل در یک مسیر از پیش تعیین شده به صورت لایه لایه روی هم قرار می‌گیرند تا قطعه مورد نظر تولید شود در این مطالعه از پرینتر سه بعدی مدل هایپر کیوب جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. برای جلوگیری از ساخت تکیه گاه، قطعات به صورت افقی ساخته شدند. با نرم افزار تخصصی پرینتر سه بعدی 3D Simplify مدل سه بعدی ایجاد گردید و با اعمال تنظیمات یکسان برای هر نمونه که در جدول 1 آورده شده است، فایل استریوگرافی آماده ساخت شده که در شکل 3 نشان داده شده است. 12 نمونه مکعبی با فیلامنت PLA+ برند ESUN ساخته شد. برای یافتن خواص مکانیکی مواد PLA+ مطابق با استاندارد ASTM D638 [27] نمونه‌های آزمون کشش مطابق شکل 4 مدل سازی و طبق تنظیمات یکسان با نمونه‌ها، توسط پرینتر سه بعدی ساخته شد و تحت کشش تک محوره قرار گرفت که نتایج آن در شکل 5 و جدول 2 مشاهده می‌شود.



شکل 3 مدل سه بعدی نمونه‌ها در نرم افزار 3D simplify

محدودیت‌هایی در تحمل بار و ظرفیت جذب انرژی دارند از این رو محققان در تلاش هستند با بهره‌گیری از سازه‌های موجود در طبیعت و کمک پرینترهای سه بعدی، ساختارهای نوین با خواص مکانیکی بهبود یافته معرفی کنند تا نیاز صنایع مختلف را در این زمینه مرتفع سازند. در پژوهش حاضر یک ساختار لانه زنبوری گرادینانی جدیدی با الهام از ساختار گل آفتابگردان پیشنهاد شده است. در این ساختار، سایز سلول‌ها به صورت شعاعی به سمت مرکز کاهش می‌یابد همچنین فضاهای خالی سلول‌ها، با فوم سخت پلی‌اورتان پر شدند و خواص مکانیکی و ویژگی جذب انرژی ساختار جدید و تأثیر حضور فوم در ساختار مشبک بررسی شده است. در این پژوهش در ابتدا ساختارها در نرم افزار کتیا مدل سازی شدند و سپس با کمک پرینتر سه بعدی با استفاده از فیلامنت PLA+ ساخته شدند و در ادامه تحت آزمون فشار شبه استاتیکی قرار گرفتند و نتایج حاصل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

2- مطالعه تجربی

1-2- هندسه ساختار و طراحی نمونه‌ها

هندسه‌ی ساختار لانه زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان مطابق شکل 1-الف می‌باشد که سلول‌های شش ضلعی با کشیده شدن به سمت مرکز که با کوچک تر شدن اندازه سلول همراه است شکل می‌گیرد. ضلع‌ها با نمایه‌ی Y در امتداد با خطی که از مرکز آمده است، قرار دارد همچنین نقاط اتصال بین دو خط متقارن X و خطوط متقارن Y بر روی خط شعاعی که از مرکز آمده، قرار دارد خطوط هم نام نسبت به خط چین قرمز متقارن هستند. ابعاد سلول مرتبه‌ی صفر سازه، به صورت  $X_0=8.7\text{mm}$ ,  $Y_0=8.7\text{mm}$ ,  $\alpha=24^\circ$ ,  $\beta=120^\circ$  تعریف می‌شود. به همین ترتیب، سلول‌های واحد شش ضلعی با تکرار در راستای محیطی مرتبه صفر سازه را می‌سازد در همین راستا در ساختار گرادینانی با کاهش شعاع عدد مرتبه بالاتر می‌رود برای مرتبه بعدی ابعاد سلول‌ها مطابق فرمول (1) و (2) روند کاهشی را طی می‌کنند تا به مرکز برسند.

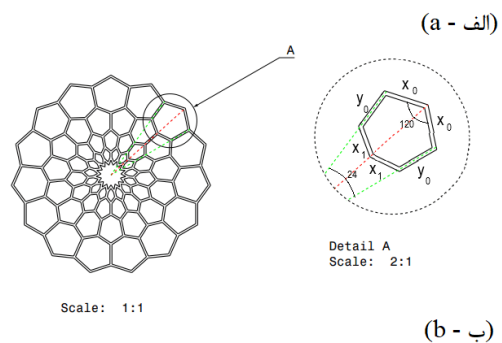


Fig.1 a) Sunflower inspired geometry b) Square section of the structure

شکل 1 الف) هندسه لانه زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان (ب) مقطع برش خورده مربعی ساختار

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

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

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)  |

3-2- ساخت و تزریق فوم

فوم پلی‌اورتان دو جزئی در فضای خالی ساختار لانه‌زنبوری تزریق می‌شود و با توجه به خاصیت این فوم و چگالی پایین آن پیش‌بینی می‌شود با تزریق آن به ساختار لانه‌زنبوری در نتایج حاصل از آزمون فشار شبه‌استاتیکی تک محوره خاصیت جذب انرژی و استحکام فشاری افزایش یابد. پس از ساخت نمونه‌ها توسط پرینتر سه‌بعدی، دو ماده‌ی Polyol Rand F 4109 و ISO 200 محصول شرکت شیمیایی پارس با نسبت برابر یک به یک با یکدیگر مخلوط شدند. سپس مخلوط به داخل ظرف حاوی ساختارمشبک اضافه شد. پس از چند ثانیه دو ماده طی واکنش گرماده منبسط شده و شروع به تشکیل فوم می‌کند، با پرشدن فضای خالی بین سلول‌ها با فوم و حذف بخش‌های اضافی، ساختارهای لانه‌زنبوری پر شده با فوم آماده‌شدند همچنین دو عدد فوم مکعبی با چگالی 57.2 کیلوگرم بر متر مربع با ابعاد 70×70×70 میلی‌متر ساخته شد و تحت فشار شبه‌استاتیکی با سرعت 5 میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفت که نتایج و نمودار نیرو- جابه‌جایی فوم در جدول 3 و شکل 6 مشاهده می‌شود.

جدول 3 خواص مکانیکی فوم پلی‌اورتان

Table 3 Mechanical Properties of PU Foam

| جنس مواد       | چگالی (Kg/m <sup>3</sup> ) | جذب انرژی (J) | جذب انرژی ویژه (KJ/Kg) |
|----------------|----------------------------|---------------|------------------------|
| فوم پلی‌اورتان | 57.2                       | 53            | 2.7                    |

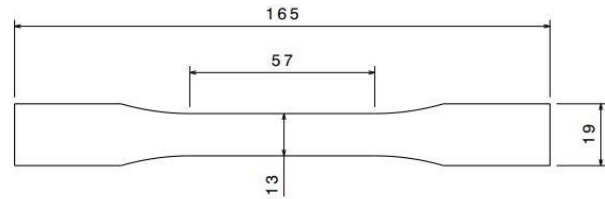


Fig. 4 Tensile Test Specimens

شکل 4 نمونه‌های آزمون کشش

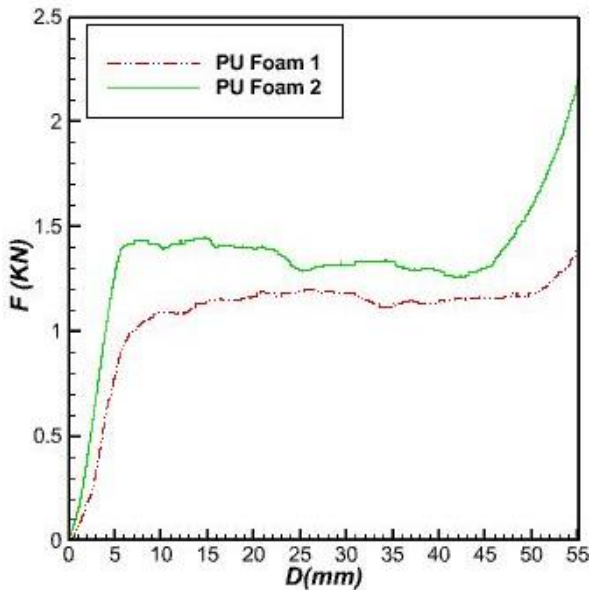


Fig. 6 Load-displacement diagrams of Polyurethane Foam

شکل 6 منحنی نیرو-جابه‌جایی فوم پلی‌اورتان

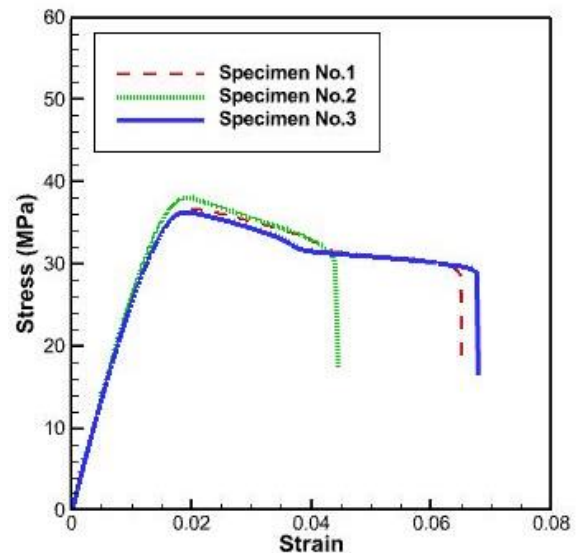


Fig. 5 Stress-Strain Curve Of PLA+ Specimens

شکل 5 نمودار تنش- کرنش نمونه‌های PLA+

جدول 2 خواص مکانیکی مواد PLA+

| جنس مواد | چگالی (g/cm <sup>3</sup> ) | استحکام تسلیم (MPa) | استحکام نهایی (MPa) | مدول یانگ (GPa) |
|----------|----------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| PLA+     | 1.2                        | 33.4                | 37                  | 2.71            |

پس از ساخت نمونه‌ها و تزریق فوم، نمونه‌های آماده شده، که در شکل 7 نشان داده شده است، جهت سهولت در نامگذاری، کدگذاری و جهت محاسبه خواص ضربه‌پذیری، وزن شدند که نتایج آن در جدول 4 آورده شده‌است.

جدول 4 کدگذاری نمونه‌ها

| وزن (g) | توضیحات  | معرفی ساختارها                  | کد ساختار |
|---------|--|---------------------------------|-----------|
| 80      | لانه‌زنبوری سنتی بدون فوم                              | Hexagon Honeycomb Empty         | HHE       |
| 110     | لانه‌زنبوری سنتی پر شده با فوم                         | Hexagon Honeycomb Foam Filled   | HHF       |
| 73      | لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان بدون فوم      | Sunflower Honeycomb Empty       | SHE       |
| 102     | لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان پر شده با فوم | Sunflower Honeycomb Foam Filled | SHF       |

3- نتایج و بحث

منحنی نیرو-جابجایی استخراج شده از آزمون فشار شبه‌استاتیک ساختار-های مشبک را می‌توان به دو ناحیه تقسیم‌بندی کرد. ابتدا با اعمال فشار به ساختار مشبک، سازه دچار تغییر شکل بازگشت‌پذیر موسوم به تغییر شکل الاستیک می‌شود سپس با اعمال جابه‌جایی بیشتر سازه وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک شده و خردشدن 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-جابجایی تا قبل از تراکم نهایی سازه، انرژی جذب شده توسط ساختار مشبک نامیده می‌شود که طبق رابطه (3) محاسبه می‌شود.

$$EA = \int_0^d f(x)dx \quad (3)$$

1-3- پاسخ فشرده‌سازی خارج از صفحه

پس از انجام آزمون فشار، منحنی نیرو-جابجایی هر 12 نمونه استخراج شد که در شکل 9 تا 12 مشاهده می‌شود و جهت بررسی عملکرد ضربه‌پذیری نمودارها مورد بررسی قرار گرفتند.

2-3- ارزیابی ضربه‌پذیری

در کاربردهای مختلف صنعتی مانند صنعت هوایی، وزن ساختار مشبک دارای اهمیت بالایی می‌باشد. برای مقایسه عملکرد ساختار مشبک لانه‌زنبوری، مؤلفه جذب انرژی ویژه بر اساس منحنی نیرو-جابجایی، مطابق فرمول (4) 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.

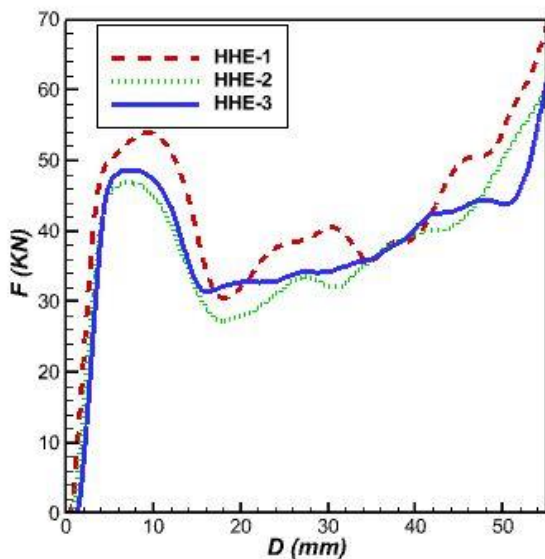


Fig. 9 Load-displacement diagrams of specimen HHE  
شکل 9 منحنی نیرو-جابجایی ساختار HHE

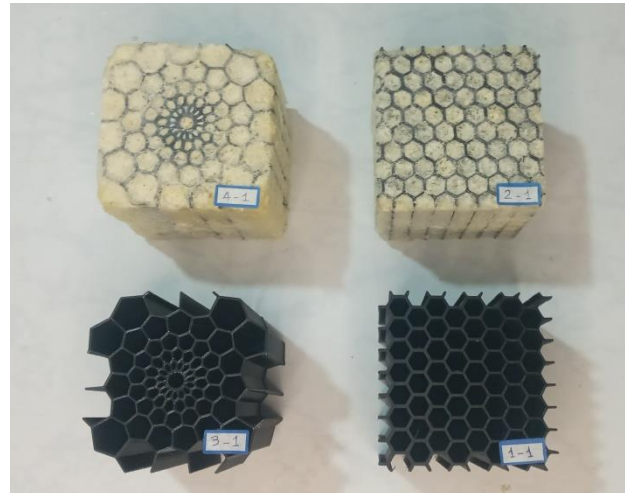


Fig. 7 Manufactured Specimens

شکل 7 نمونه‌های ساخته‌شده

4-2- آزمون فشار شبه‌استاتیکی

آزمایش‌های فشرده‌سازی شبه‌استاتیکی بر روی چهار نوع ساختار مشبک در بارگذاری خارج از صفحه (سه نمونه برای هر نوع، کلاً 12 نمونه) با استفاده از دستگاه آزمون Zwick-roll Z100 با ظرفیت بارسنج 10 کیلو نیوتن در دمای محیط انجام شد که مطابق شکل 8، نمونه بر روی فک ثابت دستگاه قرار داده می‌شود و صفحه متحرک برای ارضای شرایط شبه‌استاتیکی با سرعت ثابت 5 میلی‌متر در دقیقه به سمت پایین حرکت می‌کند و نمونه لانه‌زنبوری را تا رسیدن به تراکم نهایی تحت فشار قرار می‌دهد. نتایج این آزمون توسط رایانه‌ی متصل به دستگاه در قالب منحنی نیرو-جابجایی حاصل می‌شود.



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

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (4)$$

که در فرمول بالا EA میزان جذب انرژی و m وزن ساختار لانه زنبوری می باشد. همچنین بازده نیروی لهیدگی CFE مؤلفه مهمی برای مقایسه و ارزیابی مقاومت در برابر خردشدگی در ساختار مشبک جذب انرژی می باشد که طبق فرمول (5) تعریف می شود.

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

که 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 فرمول (6) استفاده می شود.

$$MCF = \frac{1}{d} \int_0^d f(x) dx = \frac{EA}{d} \quad (6)$$

نمونه ها تا حدود 80 درصد ارتفاع اولیه خود تحت بارگذاری فشاری قرار گرفتند. با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی، سازه ها به طور میانگین تا فشردگی 46 میلی متر 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 داده های وزن ساختارها، فرمول های محاسباتی (3) تا (6) و نمودار نیرو-جابجایی، جدول 5 جهت سهولت در ارزیابی مؤلفه های ضربه پذیری مانند جذب انرژی و جذب انرژی ویژه و بازده نیروی لهیدگی ارائه شده است.

جدول 5 مؤلفه های ضربه پذیری

| SEA (KJ/Kg) | EA (J) | PCF (KN) | CFE (%) | کد ساختار |
|-------------|--------|----------|---------|-----------|
| 21.2        | 1697   | 49.9     | 74      | HHE       |
| 18          | 1976   | 59.2     | 73      | HHF       |
| 22.1        | 1613   | 43.6     | 80      | SHE       |
| 17.39       | 1775   | 51       | 76      | SHF       |

نحوه ی فروریزی و تغییر شکل سازه تحت بارگذاری فشاری به منظور بررسی جذب انرژی اهمیت ویژه ای دارد. شکل 13 رفتار هر چهار ساختار را هنگام آزمون فشار شبه استاتیکی در جابجایی های مختلف نشان می دهد. هنگامی که سازه ی لانه زنبوری تحت بارگذاری فشاری قرار می گیرد، ابتدا سازه دچار تغییر شکل الاستیک شده و هنگامی که جابجایی بیش از حد بحرانی شود، سازه به دلیل ورود به ناحیه تغییر شکل پلاستیک شروع به فروریزی و خردشدن می کند و نیرویی که سازه تحمل می کند دچار افت قابل ملاحظه ای می شود با اعمال جابجایی بیشتر با توجه به مقاومت سازه در برابر خردشدن نمودار نیرو-جابجایی روند صعودی نزولی خود را تکرار می کند 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 بی نهایت میل می کند در این حالت سازه توانایی جذب انرژی نخواهد داشت. مطابق شکل 13 در ساختار HHE، پس از کمناش اولیه دیواره، چین خوردگی از بالا شروع شده و تا تراکم کامل ادامه می یابد. این رفتار ساختار HHE، در تحقیق الکساندر [28] تأیید می شود. الکساندر در مطالعه ای نشان داد، خردشدگی لانه زنبوری تحت

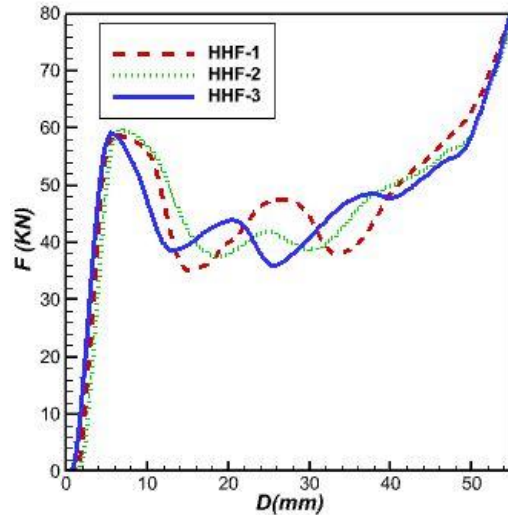


Fig. 10 Load-displacement diagrams of specimen HHF

شکل 10 منحنی نیرو-جابجایی ساختار HHF

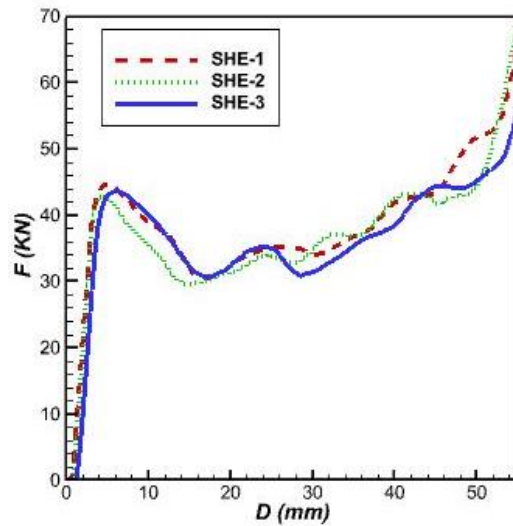


Fig. 11 Load-displacement diagrams of specimen SHE

شکل 11 منحنی نیرو-جابجایی ساختار SHE

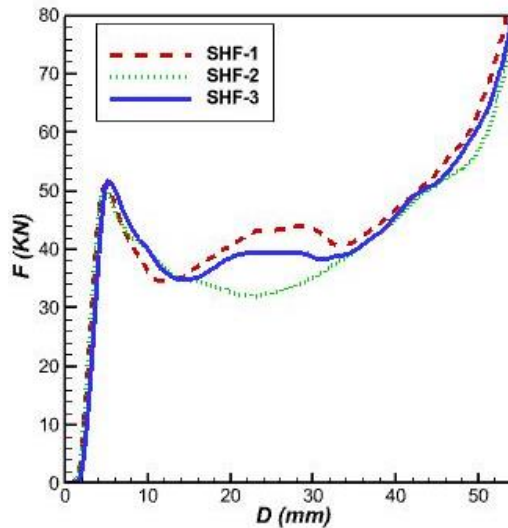


Fig. 12 Load-displacement diagrams of specimen SHF

شکل 12 منحنی نیرو-جابجایی ساختار SHF

انبساط کامل فوم در حین واکنش فوم‌سازی وزن و چگالی فوم نسبت به حالت آزاد افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های 13 و 14 مشاهده می‌شود، حضور فوم پلی‌اورتان داخل فضای ساختار مشبک در حین بارگذاری فشاری باعث کماتش دیواره‌های عمودی به سمت بیرون و افزایش حجم ساختار فشرده شده می‌شود زیرا هنگام فشردگی، فوم متخلخل با خرد شدن و افزایش چگالی و اشغال فضای داخل سلول، مانع از کماتش دیواره‌های سلول به سمت داخل می‌شود که همین موضوع سبب افزایش مقاومت در برابر خردشدگی و افزایش جذب انرژی می‌شود با توجه به نمودار نمونه‌های HHE و SHF پس از گذر از حالت الاستیک نسبت به ساختارهای HHE و SHE پس از اولین قله افت نیروی کمتری را تجربه می‌کنند که علت آن را می‌توان حضور فوم در هسته‌ی ساختار مشبک عنوان نمود به عبارت دیگر تزریق فوم پلی‌اورتان در ساختار مشبک باعث افزایش میانگین نیروی لهیدگی می‌شود که اهمیت ویژه‌ای در ارتقای خاصیت جذب انرژی دارد.

با توجه شکل‌های 15 تا 18 و ارزیابی صورت گرفته می‌توان بیان نمود که جذب انرژی ویژه ساختار پیشنهادی لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی با افزایش 4 درصدی همراه است. همچنین بازده نیروی لهیدگی در ساختار پیشنهادی در حالت پر از فوم 3 درصد و در حالت بدون فوم 6 درصد افزایش داشته‌است که بیانگر بهبود عملکرد ساختار در جلوگیری از ایجاد صدمات می‌باشد علاوه بر این، تزریق فوم بر فضای خالی بین سلول‌ها باعث افزایش 10 و 16 درصدی جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی در ساختارهای لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان و لانه‌زنبوری سنتی می‌شود.

بارگذاری به صورت چین‌خوردگی منظم دیواره‌ها اتفاق می‌افتد. در ساختار HHE خردشدگی و تغییر شکل از ارتفاع حدود 50 درصد سازه شروع می‌شود و ابتدا دیواره‌ها از دو طرف به سمت بیرون دچار کماتش شده و همزمان چین‌خوردگی و شکست شروع می‌شود و تا رسیدن به تراکم نهایی ادامه می‌یابد. ساختار SHE تحت اعمال بار فشاری ابتدا با کماتش که در دیواره‌های عمودی اتفاق می‌افتد مقاومت خود را در برابر بار اعمال شده انجام می‌دهد و سپس از بالا و ارتفاع حدود 50 درصد سازه، شکست و فروریزی شروع می‌شود که با تداوم جابجایی فشردگی از بالا و وسط ساختار به سمت پایین ادامه پیدا می‌کند. در ساختار SHF کماتش سازه به صورت محدود از پایین شروع می‌شود و حضور فوم در ساختار، باعث کاهش ناحیه‌ی تغییر شکل در کل سازه می‌شود که با تداوم اعمال فشار فروریزی سازه از پایین ادامه می‌یابد همچنین کماتش کل دیواره‌ی عمودی در این ساختار مشاهده می‌شود. ساختارها با هسته‌ی پر شده با فوم مقاومت فشاری بیشتری در برابر خردشدن 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 جابجایی فوم با ساختار متخلخل روی هم فشرده می‌شود و با اشغال فضای بین دیواره‌ها نقش تقویت‌کننده‌ای برای دیواره‌ها ایفا می‌کند. مطابق شکل 13 ساختارهای HHE و SHF در جابجایی یکسان نسبت به ساختارهای HHE و SHE تغییر شکل محدودتر و کمتری را تجربه می‌کنند که نشان از افزایش استحکام ساختار دارد.

حضور فوم در هسته‌ی ساختار مشبک علاوه بر افزایش استحکام و جذب انرژی منجر به افزایش وزن ساختار هم می‌شود که به دلیل کمبود فضا برای

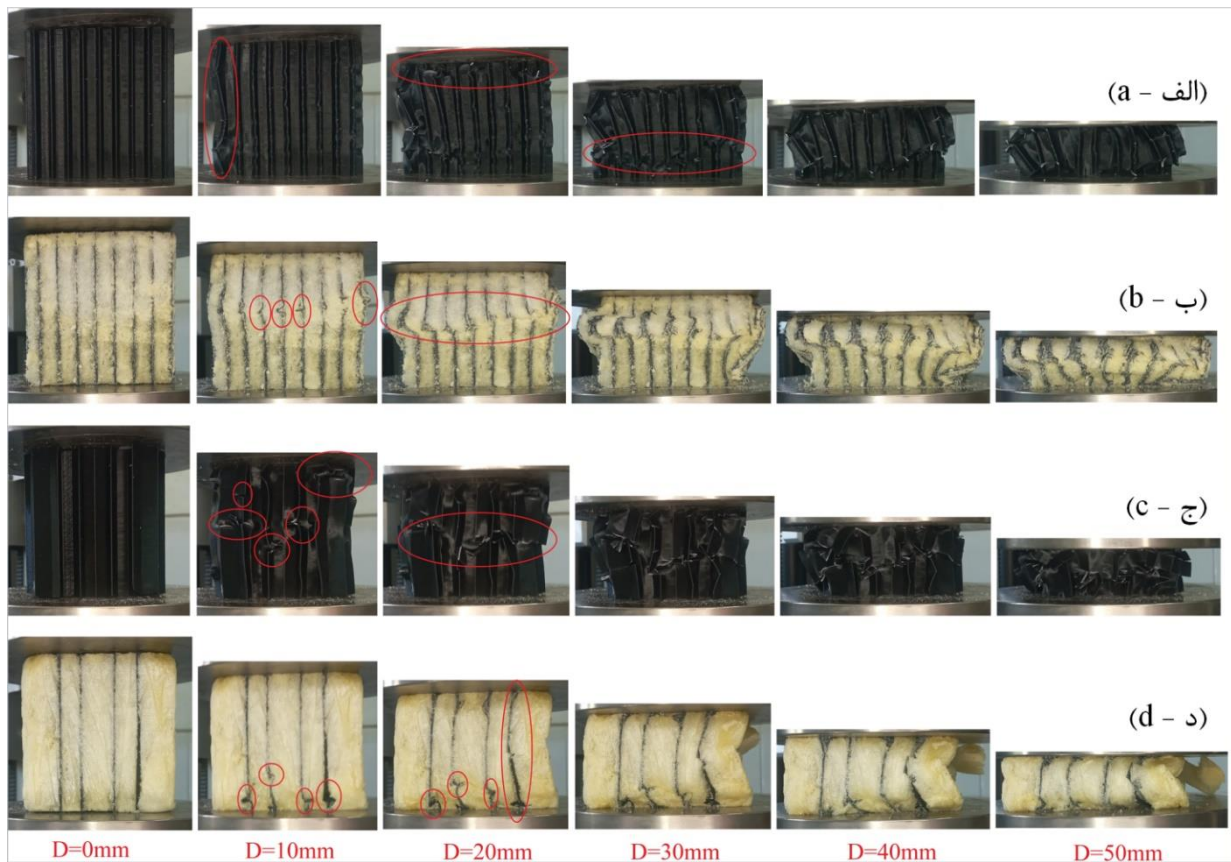


Fig. 13 Deflection mechanism of specimens a) HHE b) HHF c) SHE d) SHF

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



Fig. 17 Bar chart comparing the SEA of the SHE and HHE Specimens  
شکل 17 نمودار میله‌ای مقایسه‌ی جذب انرژی ویژه نمونه‌های SHE و HHE

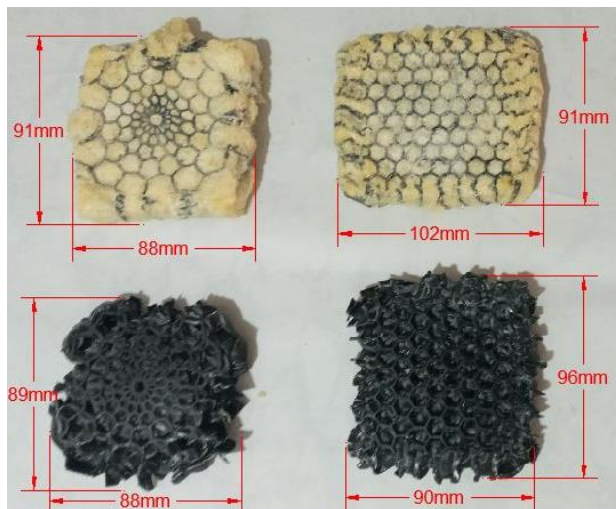


Fig. 14 Specimens after compression test

شکل 14 نمونه‌ها پس از آزمون فشار

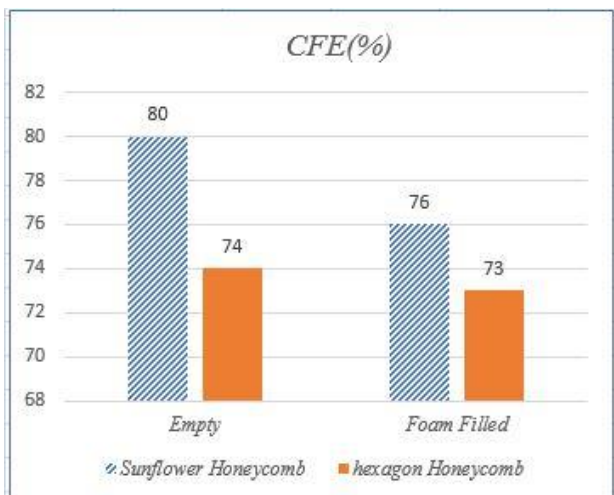


Fig. 18 Bar chart comparing the CFE of the Specimens  
شکل 18 نمودار میله‌ای مقایسه‌ی بازده نیروی لهیدگی نمونه‌ها

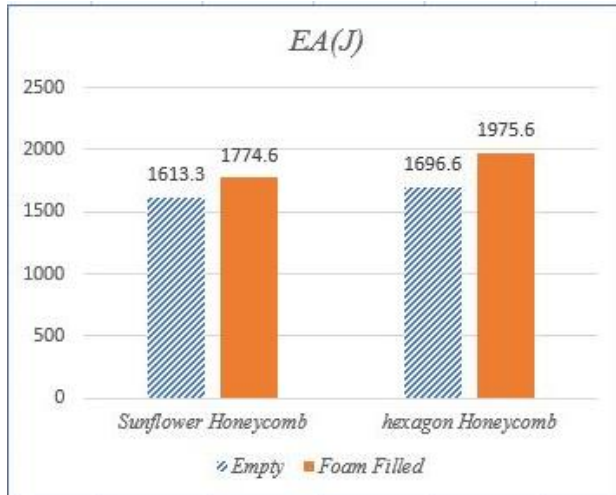


Fig. 15 Bar chart comparing the EA of the Specimens  
شکل 15 نمودار میله‌ای مقایسه‌ی جذب انرژی ویژه نمونه‌ها

4- نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر ساختار جدید لانه‌زنبوری الیاف گرفته از گل آفتابگردان به منظور استفاده در هسته‌ی جاذب‌های 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 مؤلفه‌های ضربه‌پذیری از نتایج آزمایش استخراج شدند که با استناد به آن‌ها و نحوه‌ی تغییر شکل و فروریزی ساختارها می‌توان نتایج زیر را عنوان نمود:

- جذب انرژی ویژه ساختار لانه‌زنبوری الیاف گرفته از گل آفتابگردان نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی افزایش 4 درصدی داشت.
- بازده نیروی لهیدگی ساختار لانه‌زنبوری الیاف گرفته از گل آفتابگردان نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی در حالت پر از فوم و بدون فوم افزایش 3 و 6 درصدی داشت که نشان‌دهنده‌ی برتری آن در کاربردهای محافظتی در تصادفات می‌باشد.

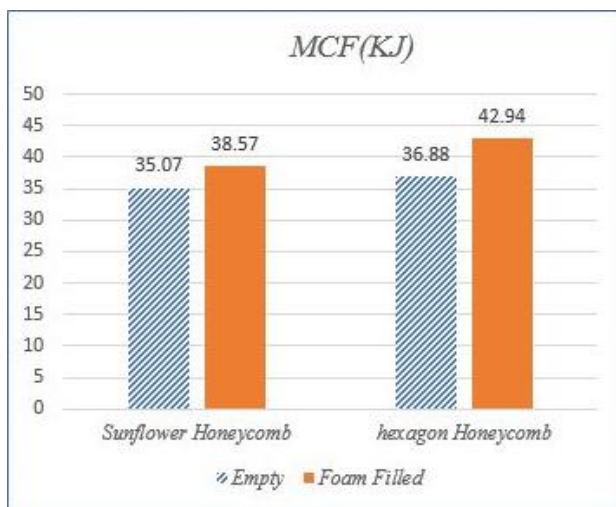


Fig. 16 Bar chart comparing the MCF of the Specimens  
شکل 16 نمودار میله‌ای مقایسه‌ی میانگین نیروی لهیدگی نمونه‌ها

- [12] Bai, L., Gong, C., Chen, X., Sun, Y., Xin, L., Pu, H., Peng, Y., Luo, J., "Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 182, pp. 105735, 2020.
- [13] Wang, P., Yang, F., Ru, D., Zheng, B., Fan, H., "Additive-manufactured hierarchical multi-circular lattice structures for energy absorption application," *Materials & Design*, Vol. 210, pp. 110116, 2021.
- [14] Qi, C., Jiang, F. and Yang, S., "Advanced honeycomb designs for improving mechanical properties: A review," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 227, pp. 109393, 2021.
- [15] Tan, H., He, Z., Li, E., Cheng, A., Chen, T., Tan, X., Li, Q., Xu, B., "Crashworthiness design and multi-objective optimization of a novel auxetic hierarchical honeycomb crash box," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 64, No. 4, pp. 2009-2024, 2021.
- [16] Najafi, M., Ahmadi, H., Liaghat, G.H., "Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasistatic Loading," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 415-424, 2020.
- [17] Shafipour, M. and Ahmadi-Brooghani, S.Y., "Numerical and Experimental Study of Energy Absorption Amount of Functionally Graded Honeycomb with Negative Stiffness Property under Quasi-Static Load," In Persian, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, No. 10, pp. 697-700, 2021.
- [18] Parvareh, 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.
- [19] 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.
- [20] Esmacili, 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.
- [21] 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.
- [22] Andrew, J.J., Alhashmi, H., Schiffer, A., Kumar, S., Deshpande, V.S., "Energy absorption and self-sensing performance of 3D printed CF/PEEK cellular composites," *Materials & Design*, Vol. 208, pp. 109863, 2021.
- [23] Molatefi, H. and Mozafari, H., "Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method," In Persian, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 177-185, 2015.
- [24] Farrokhhabadi, A., Veisi, H., Gharehbaghi, H., Montesano, J., Behraves, A. H., & Hedayati, S. K., "Investigation of the energy absorption capacity of foam-filled 3D-printed glass fiber reinforced thermoplastic auxetic honeycomb structures," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 30, No. 4, pp. 758-769, 2023.
- [25] Yan, L., Zhu, K., Zhang, Y., Zhang, C., & Zheng, X., "Effect of absorbent foam filling on mechanical behaviors of 3D-printed honeycombs," *Polymers*, Vol. 12, No. 9, pp. 2059, 2020.
- [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] 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.
- اولین نیروی بیشینه در ساختار لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی کمتر بوده که عامل مهمی در عملکرد بهتر در ضربه‌پذیری و جذب انرژی می‌باشد.
  - پرکردن سازه‌ی لانه‌زنبوری با فوم پلی‌اورتان می‌تواند باعث افزایش جذب انرژی 16 درصدی ساختارهای لانه‌زنبوری سنتی و افزایش 10 درصدی لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان شود که باعث افزایش استحکام هسته لانه‌زنبوری خواهد شد.
  - میانگین نیروی لهیدگی در ساختارهای پر شده با فوم نسبت به ساختارهای بدون فوم افزایش 10 و 16 درصدی داشته است.
- به طور کلی ساختار پیشنهادی لانه‌زنبوری الهام گرفته از گل آفتابگردان عملکرد بهتری در کاربرد جذب انرژی نسبت به ساختار لانه‌زنبوری سنتی دارد و می‌تواند در صنعت جایگزین مناسبی برای آن باشد همچنین حضور فوم باعث افزایش استحکام و جذب انرژی و کاهش صدمات در کاربردهای جذب انرژی خواهد شد.

## 5- مراجع

- [1] Gibson, L.J., and Ashby, M.F., "Cellular Solids: Structure and Properties," Cambridge, London, England, 1997.
- [2] Sahu, S.K., Sreekanth, P.R. and Reddy, S.K., "A Brief Review on Advanced Sandwich Structures with Customized Design Core and Composite Face Sheet," *Polymers*, Vol. 14, No. 20, pp. 4267, 2022.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] San Ha, N., and Lu, G., "A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 181, pp. 107496, 2020.
- [6] 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.
- [7] Qi, J., Li, C., Tie, Y., Zheng, Y., Duan, Y., "Energy absorption characteristics of origami-inspired honeycomb sandwich structures under low-velocity impact loading," *Materials & Design*, Vol. 207, pp. 109837, 2021.
- [8] Li, R., Zhao, Z., Bao, H., Pan, Y., Wang, G., Liu, B., ... & Li, J., "Bio-inspired honeycomb structures to improve the crashworthiness of a battery-pack system," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 158, pp. 108041, 2024.
- [9] Mojaveri Agah, H. and Asgari, M., "Developing a new functionally graded lattice structure based on an elliptic unit cell for additive manufacturing and investigation of its properties," In Persian, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 55, No. 4, pp. 97-100, 2023.
- [10] Seharang, A., Azman, A.H., Abdullah, S., "A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts," *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 1687814020916951, 2020.
- [11] Zhang, Y., Chen, T., Xu, X., Hu, Z., "Out-of-plane mechanical behaviors of a side hierarchical honeycomb," *Mechanics of Materials*, Vol. 140, pp. 103227, 2020.