



Original Research Paper

Experimental Investigation of Core Structure Effects on the Flexural Performance of Polymeric Sandwich Beams

Seyed Ali Mousavi¹, Hadi Sabouri² , and Hassan Shokrollahi^{3*} 

1. Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2,3. Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 11 August 2025

Revised 26 October 2025

Accepted 28 October 2025

Available Online 02 December 2025

Keywords:

Sandwich structure

Composite

Recyclable

Glass fibers

Auxetic structure

Composite sandwich panels, due to their unique mechanical properties such as high strength-to-weight ratio, possess significant potential for use in lightweight aerospace structures. In this study, the effect of core structure and thickness variation on the structural performance of these panels is investigated. The structure consists of a polyamide core with honeycomb, re-entrant auxetic, and sinusoidal auxetic patterns, and composite face sheets made of glass fibers and polyamide resin. Three-point bending tests were conducted to examine the influence of core thickness on flexural strength, load-bearing capacity, and displacement prior to failure. The results indicate that increasing the core thickness directly enhances the load-bearing capacity and flexural strength of the structure. Among the configurations studied, the beam with a sinusoidal auxetic core exhibited the highest load-bearing capacity, such that increasing the thickness from 1.5 mm to 2.5 mm led to a 36% rise in the maximum load endured. In contrast, the honeycomb structure showed the highest elastic displacement, indicating greater flexibility of this core. Furthermore, the increase in thickness in the re-entrant auxetic structure had the most significant effect on improving flexural strength, although the load-bearing enhancement was lower compared to the other two configurations. A comparison of load-to-mass and absorbed energy indices revealed that both core geometry and cell wall thickness have substantial effects on the mechanical performance of sandwich structures. Scanning electron microscope (SEM) images also revealed brittle fracture in the cores.

* Corresponding Author's E-mail: hshokrollahi@khu.ac.ir

How to Cite this Article:

S. A. Mousavi, H. Sabouri, and H. Shokrollahi, "Experimental investigation of core structure effects on the flexural performance of polymeric sandwich beams," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 31-42, 2026, <https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.2.3>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by ARI. This article is an open access article licensed under [the Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



مطالعه تجربی تأثیر ساختار هسته بر عملکرد خمشی تیرهای ساندویچی پلیمری

سید علی موسوی^۱، هادی صبوری^۲ و حسن شکراللهی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۲ و ۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

پنل‌های ساندویچی کامپوزیتی به دلیل خواص مکانیکی از جمله نسبت بالای استحکام به وزن، پتانسیل بالایی برای استفاده در سازه‌های سبک هوافضایی دارند. در این پژوهش، تأثیر تغییر ساختار و ضخامت هسته بر عملکرد سازه‌های این پنل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پنل ساندویچی شامل هسته‌ای از جنس پلی‌آمید با ساختار لانه‌زنبوری، آگزتیک ری-اینترنت و آگزتیک سینوسی و رویه‌ای کامپوزیتی با الیاف شیشه و رزین پلی‌آمید می‌باشد. آزمون خمش سه نقطه‌ای انجام شده و تأثیر ضخامت هسته بر استحکام خمشی، تحمل بار و میزان جابجایی تا قبل از شکست بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت هسته تأثیر مستقیمی بر افزایش ظرفیت تحمل بار و تقویت استحکام خمشی سازه دارد. در بین ساختارهای مورد بررسی، تیر دارای هسته آگزتیک سینوسی بالاترین ظرفیت تحمل بار را نشان داده است. به علاوه با افزایش ضخامت این نوع هسته‌ها از ۱/۵ به ۲/۵ میلی‌متر، حداکثر نیروی تحمل‌شده تا ۳۶٪ افزایش یافته است. در مقابل، ساختار لانه زنبوری بیشترین میزان جابجایی الاستیک را ارائه داده که نشان‌دهنده نرمی بالاتر این ساختار است. همچنین، افزایش ضخامت در ساختار آگزتیک ری-اینترنت، بیشترین تأثیر را در بهبود استحکام خمشی نشان داده، اما میزان افزایش تحمل بار در این ساختار نسبت به دو ساختار دیگر کمتر بوده است. مقایسه شاخص‌های بار به جرم و انرژی جذب‌شده نشان داد که هسته هسته و ضخامت دیواره سلول هر دو اثر قابل‌توجهی بر عملکرد مکانیکی سازه‌های ساندویچی دارند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز نشان‌دهنده گسیختگی ترد در هسته‌ها بود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۰ مرداد ۱۴۰۴
بازنگری ۴ آبان ۱۴۰۴
پذیرش ۶ آبان ۱۴۰۴
اولین انتشار ۱۱ آذر ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

سازه ساندویچی
کامپوزیت
قابل بازیافت
الیاف شیشه
ساختار آگزتیک

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hshokrollahi@khu.ac.ir

How to Cite this Article:

S. A. Mousavi, H. Sabouri, and H. Shokrollahi, "Experimental investigation of core structure effects on the flexural performance of polymeric sandwich beams," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 31-42, 2026, <https://doi.org/10.22034/jtae.2026.10.2.3>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by ARI. This article is an open access article licensed under [the Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

[Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



۱ مقدمه

ساختارهای ساندویچی به دلیل خواص مکانیکی استثنایی، نسبت بالای استحکام به وزن و توانایی جذب انرژی، توجه زیادی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و مهندسی عمران به خود جلب کرده‌اند. این ساختارها از یک هسته سبک وزن با مقاومت مکانیکی متوسط و دو رویه با خواص مکانیکی بالا تشکیل شده‌اند که ترکیب این دو به ساختاری با انعطاف‌پذیری و کارایی بالا منجر می‌شود. مواد گرم‌نرم^۱ به دلیل قابلیت بازیافت و استفاده مجدد، گزینه‌ای پایدار برای صنایع مختلف، از جمله سازه‌های کامپوزیتی هستند. این مواد برخلاف گرماسخت^۲ها، می‌توانند با ذوب و شکل‌دهی مجدد، ضایعات صنعتی را کاهش داده و تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند. استفاده از مواد گرم‌نرم در سازه‌های سبک هوافضایی نه تنها موجب کاهش مصرف مواد اولیه و انرژی تولید می‌شود، بلکه امکان طراحی سازگارتر با محیط زیست را نیز فراهم می‌کند.

یکی از جنبه‌های مهم طراحی این ساختارها، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مواد بر رفتار مکانیکی و دینامیکی آن‌ها است. ضخامت هسته و رویه، یکی از اصلی‌ترین پارامترهایی است که مستقیماً بر خواص ارتعاشی، جذب انرژی و استحکام تأثیر می‌گذارد. این خواص برای طراحی سازه‌های سبک وزن که توانایی تحمل بارهای دینامیکی را دارند، با اهمیت است. علاوه بر این، با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از مواد کامپوزیتی مدرن نظیر الیاف شیشه و پلی‌امید و سازه‌های مبتنی بر هسته‌های قابل بازیافت، به طراحان امکان داده است تا ساختارهایی با کارایی بالا و سازگار با محیط زیست ایجاد کنند. این پیشرفت‌ها، همراه با مطالعات عددی و آزمایشگاهی، فرصت‌های جدیدی را برای بهبود طراحی و بهینه‌سازی سازه‌های ساندویچی فراهم کرده‌اند. سازه‌های ساندویچی در صنعت هوافضا از مهمترین دسته‌بندی‌ها هستند و نسبت استحکام به وزن آن‌ها باعث شده در گذشته پر استفاده باشند و در آینده نیز این سازه‌ها پیشرفت‌های بسیاری در صنایع مختلف خواهند داشت.

مطالعات متعددی در زمینه بررسی رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی با انواع مختلف هسته و رویه انجام شده است که نتایج این پژوهش‌ها، مبنای ارزشمندی برای طراحی و تحلیل ساختارهای مشابه فراهم می‌کند. ماتا و همکاران [۱] در پژوهشی رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی با هسته آلومینیومی شش ضلعی (لانه زنبوری) را بررسی کردند و نشان دادند که افزایش ارتفاع هسته و ضخامت دیواره منجر

به بهبود مدول برشی و سفتی خمشی می‌شود، در حالی که اندازه سلول تأثیر کمتری دارد. چن و همکاران [۲] در پژوهشی یک ساختار آگزتیک^۳ جدید با هسته شش ضلعی باز طراحی کردند و نشان دادند که این ساختار با افزودن بخشی شبیه به خود تقویت شده و قابلیت جذب انرژی آن تا ۱۰ برابر افزایش یافته و سفتی و ثبات بیشتری نسبت به ساختارهای معمول دارد. کستانی و همکاران [۳] در مرور خود مسائل سازه‌های ساندویچی مورد استفاده در کاربردهای هوایی را بررسی کرده‌اند و به طراحی‌های اولیه تا تحولات اخیر پرداخته‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که افزایش ضخامت هسته یا استفاده از هسته‌های آلایژی و فوم با کیفیت بالا، تأثیر قابل توجهی در مقاومت خمشی و کاهش بارهای بحرانی دارند. آلفونس و همکاران [۴] در یک مرور تحقیقاتی به بررسی تأثیر رفتار مکانیکی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های متنوع پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که استفاده از ساختارهای هسته‌ای مانند لانه زنبوری، فوم‌های فلزی و ساختارهای زیستی می‌تواند منجر به بهبود جذب انرژی، مقاومت به ضربه و سختی شود، در حالی که وزن سازه کاهش می‌یابد.

ملک‌نژاد و همکاران [۵] در پژوهشی اثر استفاده از هسته‌های موج‌دار و پر شده با فوم بر روی مقاومت جاشدگی لایه‌ها در سازه‌های ساندویچی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از هسته موج‌دار مثلثی شکل باعث افزایش ۱۷۰ درصدی مقاومت به جاشدگی و ۷۶ درصدی سفتی خمشی نسبت به نمونه‌های هسته ساده شده است. شیا و همکاران [۶] در پژوهشی، مکانیزم‌های خرابی پل‌های ساندویچی موج‌دار تحت بارگذاری سه نقطه‌ای را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که سه مکانیزم اصلی خرابی شامل کمناش رویه، تسلیم رویه و کمناش هسته به شدت تحت تأثیر ضخامت رویه، ارتفاع هسته و زاویه موج‌دار بودن پل قرار دارند. همچنین، آزمایش‌ها نشان داد که شکل و اندازه‌ی نقطه‌ی بارگذاری تأثیر قابل توجهی بر نوع مکانیزم خرابی دارد. نصراله‌پور و همکاران [۷] در پژوهشی طراحی بهینه یک پل ساندویچی کامپوزیتی با هسته شش ضلعی لانه زنبوری را برای کاربردهای هوافضا بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی NMPSO^۴ نشان دادند که افزایش تعداد سلول‌ها با کاهش سطح مقطع و افزایش ارتفاع آن‌ها، تغییر شکل و احتمال کمناش پل را کاهش می‌دهد. همچنین، در فشارهای بالا، ضخامت هسته و رویه‌ها تأثیر بیشتری در کاهش تنش برشی، تغییر شکل و کمناش دارند. شکراللهی و همکاران [۸]، [۹] در پژوهشی رفتار خمشی و ارتعاشی پل‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته‌های مختلف را بررسی کردند. در بخش بررسی رفتار خمشی، سه نوع هسته شامل

3. Auxetic
4. Novel Multi-Objective Particle Swarm Optimization

1. Thermoplastic
2. Thermoset

لانه‌زنبری، آگرتیک ری-اینترنت^۱ و موجی سینوسی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان داد که ساختار آگرتیک ری-اینترنت با ضخامت دیواره ۲ میلی‌متر، بهترین نسبت نیرو به وزن و بیشترین جذب انرژی را دارد. همچنین، ساختار آگرتیک سینوسی بیشترین جابجایی را قبل از خرابی نهایی نشان داده و حدود ۱۰٪ افزایش بار و ۱۷٪ افزایش جابجایی در نقطه شکست را نسبت به نمونه‌های نازک‌تر تجربه کرده است. در بخش بررسی رفتار ارتعاشی، تأثیر نوع هسته و ضخامت دیواره سلول‌ها بر فرکانس‌های طبیعی و مدهای ارتعاشی مطالعه شد. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت دیواره در ساختارهای لانه‌زنبری منجر به افزایش فرکانس طبیعی می‌شود، در حالی که ساختارهای آگرتیک، با وجود وزن بیشتر، فرکانس طبیعی پایین‌تری دارند. این یافته‌ها می‌توانند در بهینه‌سازی طراحی پنل‌های ساندویچی برای کاربردهای مختلف مهندسی مؤثر باشند.

دلیل و همکاران [۱۰] در پژوهشی، مکانیزم‌های خرابی تیرهای ساندویچی کامپوزیتی را بررسی کردند و دریافتند که نوع و ترتیب خرابی به مشخصات مکانیکی مواد رویه، هسته و چسب، به همراه ابعاد هندسی سازه بستگی دارد. آن‌ها نشان دادند که شکست می‌تواند به صورت کماتش رویه، شکست هسته، جدایش در فصل مشترک هسته و رویه، یا فرورفتگی موضعی تحت بارگذاری متمرکز رخ دهد و این مکانیزم‌های خرابی می‌توانند به یکدیگر منتقل شوند و مسیر نهایی خرابی را تغییر دهند. فاروق و همکاران [۱۱] در پژوهشی، عملکرد مکانیکی بین لایه‌ای پنل‌های ساندویچی لانه‌زنبری کامپوزیتی را برای کاربردهای هوافضا بررسی کردند. این پنل‌ها شامل رویه‌های کامپوزیتی کربن-اپوکسی متصل به یک هسته لانه‌زنبری نومکس با استفاده از فیلم چسب اپوکسی هستند. نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان داد که پارامترهای بهینه برای فرآیند پخت چسب، دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت است که منجر به بیشترین استحکام خمشی رویه‌ها، بیشترین استحکام نهایی برشی هسته و بالاترین سفتی برشی عرضی می‌شود. همچنین، مشاهده شد که تشکیل مناسب فیلم چسبی بین هسته و رویه‌ها، انتقال بار را بهبود داده و باعث افزایش عملکرد مکانیکی پنل‌های ساندویچی می‌شود.

چن و همکاران [۱۲] در پژوهشی به تحلیل شکست نگاری خرابی پنل‌های ساندویچی در یک پره توربین بادی کامپوزیتی پرداخته است. این مطالعه با استفاده از میکروسکوپ نوری و توموگرافی کامپیوتری با اشعه ایکس (X-ray CT) به بررسی ویژگی‌های شکست، از جمله

شکست لایه‌های رویه، جدایش رویه و هسته، شکست هسته فومی PVC و پارگی الیاف کامپوزیت پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که شکست در ناحیه رویه تحت تنش فشاری به صورت نوارهای خمیده^۲ ظاهر می‌شود، در حالی که در ناحیه تحت تنش کششی، میکرو ترک‌های ماتریس و شکست الیاف مشاهده شده است. علاوه بر این، نقص‌های ناشی از پر شدن ناقص رزین در شیارهای فوم هسته، مسیر رشد ترک را تغییر داده و منجر به جدایش هسته و رویه شده است. وانگ و همکاران [۱۳] در پژوهشی به بررسی بهبود خواص مکانیکی صفحات چوب-پلاستیک^۳ از طریق تقویت ناحیه کششی آن‌ها با لایه‌ای از پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه^۴ پرداختند. با انجام آزمون خمش چهار نقطه‌ای و تحلیل عددی، نشان دادند که افزودن لایه GFRP می‌تواند ظرفیت باربری نهایی را تا ۲۰۵ درصد و میزان تغییر مکان را تا ۵۵ درصد افزایش دهد. شکست‌های مشاهده شده شامل شکست خمشی، برشی-خمشی و جدایش بین لایه‌ای بود. همچنین نتایج عددی حاکی از آن بود که افزایش چگالی WPC تأثیر مثبت بر تقویت دارد، در حالی که زاویه چیدمان الیاف تأثیر قابل توجهی نداشت. ژیه و همکاران [۱۴] در پژوهشی رفتار خمشی تیرهای ساندویچی خمیده^۵ با هسته‌ای از فوم PET^۶ و رویه‌ای از کامپوزیت GFRP را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای و تحلیل مدل تحلیلی، اثر پارامترهایی مانند شعاع خمیدگی، ضخامت هسته و ضخامت رویه را بر ظرفیت باربری و نوع شکست بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش شعاع خمیدگی از ۱۵۰۰ به ۳۰۰ میلی‌متر، منجر به کاهش ۱۷/۷ درصدی ظرفیت باربری و ۶۱/۸ درصدی سفتی سازه می‌شود. همچنین، استفاده از فوم PET باعث کاهش وقوع شکست برشی در هسته و رفتار پیوسته‌تر در منحنی نیرو-جابجایی شد. نقشه‌های شکست نیز برای پیش‌بینی حالت‌های مختلف خرابی طراحی شد که می‌تواند راهنمایی مؤثری برای طراحی سازه‌های سبک‌وزن باشد. در پژوهشی عددی توسط معبودی و همکاران [۱۵] پایداری دینامیکی تیرهای کامپوزیتی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی در جریان مافوق صوت مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، اثرات ترکیبی توزیع هدفمند نانولوله‌های کربنی و جرم متصل بر مرز فلاتر با استفاده از نظریه برش مرتبه اول و روش مربعات تفاضلی تعمیم‌یافته تحلیل شد. نتایج نشان داد که افزایش درصد حجمی نانولوله‌های کربنی موجب افزایش سفتی مؤثر تیر و افزایش فشار بحرانی فلاتر تا حدود ۳۰٪ نسبت به حالت بدون تقویت می‌شود، در حالی که افزایش جرم متصل و نسبت طول به ضخامت، فرکانس

4. Glass Fiber Reinforced Plastic
5. Curved Sandwich Beam
6. Polyethylene Terephthalate

1. Re-Entrant
2. Kink Bands
3. Wood-Plastic Composite

نمود. بر پایه‌ی مرور پژوهش‌های پیشین می‌توان نتیجه گرفت که تاکنون مقایسه‌ی تجربی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های آگزتیک مختلف در قالبی یکسان و با استفاده از مواد گرمانرم قابل‌باز یافت صورت نگرفته است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از سه هندسه‌ی لانه‌زنبوری، ری-اینترنت و سینوسی و بررسی اثر تغییر ضخامت هسته بر رفتار خمشی تیرهای ساندویچی کامپوزیتی بر پایه پلی‌آمید، گامی در جهت توسعه‌ی سازه‌های سبک‌وزن، قابل‌باز یافت و سازگار با محیط زیست در کاربردهای هوافضایی برداشته است. لازم به ذکر است که به منظور رسیدن به دید بهتر در خصوص شکست سازه‌ها، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای سطوح شکست هسته‌ها نیز استفاده شده است.

۲ ساختارهای سازه، روش ساخت و آزمون‌ها

در این تحقیق با تأکید بر استفاده از موادی که قابل‌باز یافت باشد، تیرهای کامپوزیتی ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است. هسته سازه‌ها با استفاده از فرز CNC از ورق ۸ میلیمتری پلی‌آمید^۲ برش خورده و به رویه‌ها متصل شده است. برش هسته‌ها به گونه‌ای بوده است که یک ساختار لانه‌زنبوری با سه ضخامت مختلف و دو ساختار آگزتیک با ضخامت‌های متفاوت ساخته شده است. این سازه از جنس پلی‌آمید بوده که پلیمری گرمانرم است. از خواص پلیمرهای گرمانرم می‌توان به قابلیت ذوب و ریخته‌گری مجدد آن‌ها اشاره کرد. در رویه‌های کامپوزیتی نیز از پلی‌آمید به عنوان رزین استفاده شده است و کامپوزیت‌ها با روش پرس گرم در دما و فشار بالا، با قرارگیری الیاف‌های شیشه بین ورق‌های نازک^۳ از جنس پلی‌آمید ساخته شده‌اند.

اتصال رویه‌ها به هسته توسط چسب سیانوآکریلات^۴ انجام شده است. برای دستیابی به اتصالات بهینه، پس از فرآیند اتصال، چسب به مدت ۴۸ ساعت ثابت قرار گرفت تا خشک شود. در این مدت، اعمال فشار مناسب بر روی اتصالات ضروری است تا پیوند یکنواخت‌تر و استحکام چسبندگی بهبود یابد. هسته سازه‌ها از ورق پلی‌آمید به ضخامت ۸ میلی‌متر با استفاده از دستگاه فرز CNC، برش خورده است. هسته‌ها دارای سه ساختار لانه‌زنبوری، آگزتیک ری-اینترنت و آگزتیک سینوسی^۵ هستند که هر ساختار هسته، با سه ضخامت متفاوت که برای دیواره سلول‌های آن در نظر گرفته شده، ساخته شده است. شماتیک ساختار هسته‌ها و رویه در شکل ۱ آورده شده است.

طبیعی بی‌بعد را کاهش می‌دهد. همچنین مشاهده شد که توزیع بهینه نانولوله‌های کربنی در راستای ضخامت، رفتار پایداری سازه را در تمامی شرایط مرزی به صورت چشمگیری بهبود می‌بخشد. این پژوهش با ارائه مدلی هم‌زمان برای اثر جرم متمرکز و تقویت‌کننده‌های نانومقیاس، درک عمیق‌تری از پدیده‌های ناپایداری در سازه‌های کامپوزیتی سبک‌وزن فراهم کرد. در مطالعه‌ی تجربی-تحلیلی توسط کرمی و همکاران [۱۶] استحکام ضربه‌ای نانوکامپوزیت تابعی اپوکسی/گرافن مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، نمونه‌هایی با توزیع یکنواخت و تابعی نانوذرات گرافن ساخته شدند و ریزساختار آن‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که افزودن تا ۱٪ وزنی گرافن موجب افزایش جذب انرژی ضربه تا حدود ۸۰٪ نسبت به نمونه خالص می‌شود، در حالی که در غلظت‌های بالاتر (۱/۵ درصد وزنی)، به دلیل ایجاد تجمع ذرات، افت استحکام مشاهده شد. مدل‌سازی عددی انجام‌شده با روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس نیز تطابق خوبی با داده‌های تجربی نشان داد و تأیید کرد که توزیع تابعی ذرات نانو به دلیل اتصال بهتر لایه‌ها و کاهش تمرکز تنش، بالاترین مقاومت در برابر شکست را ایجاد می‌کند. این پژوهش اهمیت طراحی تدریجی و هدفمند در نانساختارهای کامپوزیتی را در ارتقای رفتار ضربه‌ای و انرژی جذب‌شده تأیید می‌کند.

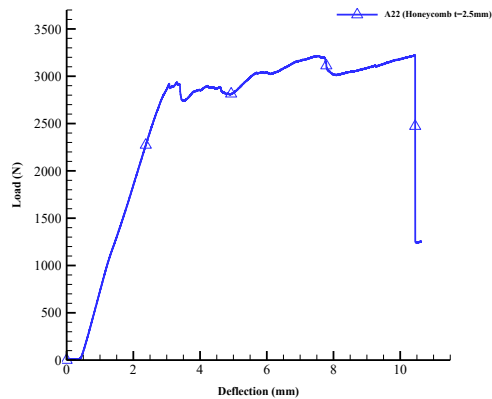
در سازه‌های ساندویچی با هسته‌های آگزتیک، ناحیه‌ی بحرانی اغلب در شرایط بارگذاری خمشی ایجاد می‌شود که اطلاعات جامعی از نحوه‌ی توزیع تنش، گسیختگی هسته و جدایش بین لایه‌ها فراهم می‌کند. از این‌رو، آزمون خمش سه نقطه‌ای می‌تواند به تنهایی شاخص مناسبی برای مقایسه‌ی عملکرد نسبی ساختارها با هندسه‌های مختلف باشد. علاوه بر این، سازه‌های آگزتیک به خاطر منفی بودن نسبت پواسون در برخی از موارد رفتاری دور از انتظار از خود نشان می‌دهند. در نتیجه مطالعه موردی رفتار آن‌ها در هر بارگذاری الزامی به نظر رسیده و سبب حصول اطمینان در طراحی سازه خواهد شد.

اغلب تحقیقات انجام گرفته در زمینه سازه‌های کامپوزیتی و ساندویچی، با استفاده از رزین‌های گرماسخت انجام گرفته است. این رزین‌ها، علیرغم دارا بودن خواص مکانیکی بالا، مشکلات روزافزونی از نظر باز یافت و ملاحظات محیط زیستی ایجاد می‌کنند. با کمی اغماض نسبت به مقوله خواص مکانیکی، بهره‌گیری از پلیمرها و رزین‌های گرمانرم ملاحظات محیط زیستی و سازگاری با طبیعت را برآورده خواهد

4. Cyanoacrylate Adhesive
5 Sinusoidal Ligament

1. Scanning Electron Microscope
2. Polyamide (PA)
3. Film

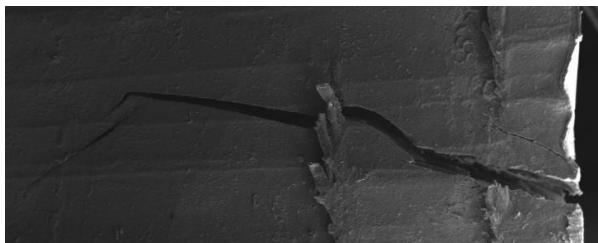
است که نمودار نیرو-جابجایی از ابتدای بارگذاری تا انتهای آن رسم شده است.



شکل ۲- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه لانه زنبوری.

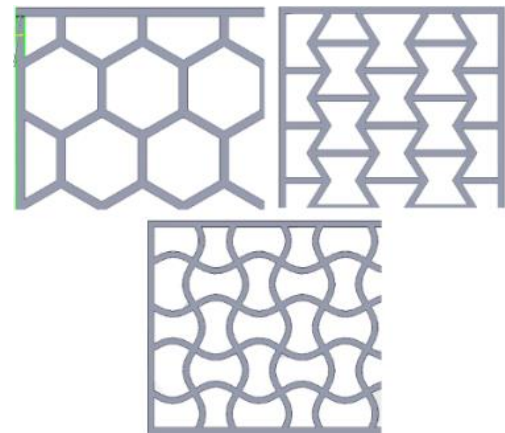
Fig. 2. Load-Deflection diagram for honeycomb specimen.

برای درک بهتر مکانیزم‌های شکست در هسته و تحلیل دقیق‌تری از رفتار سازه در برابر بارگذاری مکانیکی، بررسی ریزساختار سطح شکست اجزای ساندویچی ضروری به نظر می‌رسد. در همین راستا، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تحلیل سطح شکست نمونه‌ها پس از آزمون استفاده شده است. تصاویر SEM به‌دست‌آمده از سطح شکست هسته پس از اعمال بار مکانیکی، مکانیزم‌های شکست موجود در ساختار ساندویچی را نشان می‌دهند. همچنین این تصاویر برای اطمینان از صحت ساخت سازه‌ها گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۳ و شکل ۴ مشاهده می‌شود، سطوح شکست، ناهمواری‌هایی را نشان می‌دهند که حاکی از وقوع شکست ترد در هسته پلی‌آمیدی و همچنین شکست موضعی پلاستیک در برخی نواحی است. مسیر ترک‌ها و وجود سطوح صاف و خطوط مستقیم در امتداد برخی لایه‌ها نشان‌دهنده شکست ترد و انتشار سریع ترک در هسته است. علاوه بر این، بافت یکنواخت سطح هسته، همگنی مواد پلی‌آمیدی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تصویر SEM از سطح شکست نمونه.

Fig. 3. SEM image of the fracture surface of the specimen.



شکل ۱- شماتیک ساختار هسته‌ها.

Fig. 1. Schematic of core structures.

کامپوزیت‌ها دارای ۲ لایه الیاف شیشه با چگالی سطحی^۱ 400 g/m^2 و ۳ لایه ورق پلی‌آمید 500 میکرون و با استفاده از قالب ۱ میلی‌متری ساخته شده‌اند. مشخصات فیزیکی و نحوه کدگذاری نمونه‌ها به اختصار در جدول ۱ آورده شده است. اولین حروف نشانه نوع ساختار هسته، اولین عدد بعد حروف نشانه ضخامت دیواره سلول آن هسته (عدد ۰ برای ضخامت $1/5$ میلی‌متر، عدد ۱ برای ضخامت 2 میلی‌متر و عدد ۲ برای ضخامت $2/5$ میلی‌متر) و عدد سوم نشان دهنده تعداد تکرار آزمون می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سازه‌ها.

Table 1. Physical properties of the structures.

Sample Code	Length (mm)	Weight (gr)
A0	154	60.8
B0	167	77.19
C0	158	72.17

لازم به ذکر است که عرض تمامی نمونه‌ها 52 میلی‌متر و ضخامت همگی آن‌ها برابر $10/8$ میلی‌متر می‌باشد.

آزمون خمش سه نقطه مطابق استاندارد ASTM C393 انجام شده است و نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌ها از زمان شروع بارگذاری تا زمان شکست رسم شده است. بررسی تفاوت رفتار نمونه‌ها با ساختار یکسان و ضخامت دیواره سلول متفاوت از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشد. در شکل ۲ نمودار مربوط به یک نمونه آورده شده

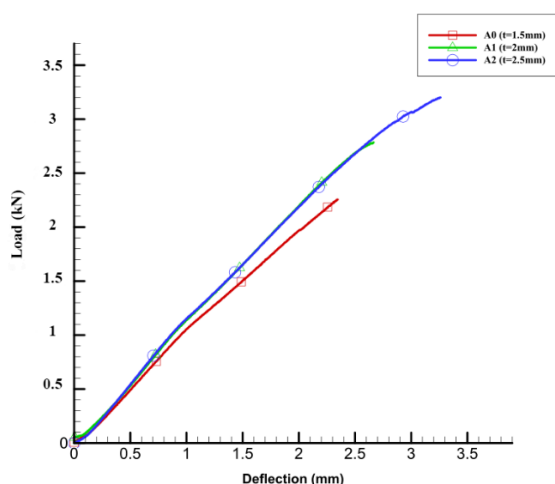
1. Areal Density

منظم الیاف نشان‌دهنده همگنی مواد اولیه و کنترل مناسب فرآیند تولید است.

سطح مقطع کامپوزیت در شکل ۶ قابل مشاهده است. تر شدن الیاف‌ها با رزین به وضوح دیده می‌شود. نظم نسبی الیاف و قرارگیری آن‌ها در بستر رزین نشان‌دهنده پتانسیل مناسب برای انتقال بار میان الیاف و ماتریس است. با این حال، وجود نواحی با چسبندگی کمتر بین الیاف و رزین ممکن است نقاط ضعف ساختاری ایجاد کند که نیاز به بهینه‌سازی فرآیند تولید دارد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بعضی از الیاف‌ها با رزین آغشته نشده است که تأثیری رو عملکرد مکانیکی سازه ندارد زیرا تصویرها از مقطع برش خورده گرفته شده است و ممکن است تخریب‌هایی در اثر حرکت ابزار برشی ایجاد شده باشد.

۳ بررسی نتایج

نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده بر روی تیرهای کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های حاصل از آزمون‌ها به‌صورت نمودارهای نیرو-جاب‌جایی نمایش داده شده و تفاوت عملکرد نمونه‌ها بر اساس متغیر ضخامت دیواره سلول تحلیل می‌شود. در شکل ۷ نمودار نیرو-جاب‌جایی مربوط به نمونه‌های لانه‌زنبوری آورده شده است.



شکل ۷- نمودار نیرو-جاب‌جایی برای نمونه لانه زنبوری.

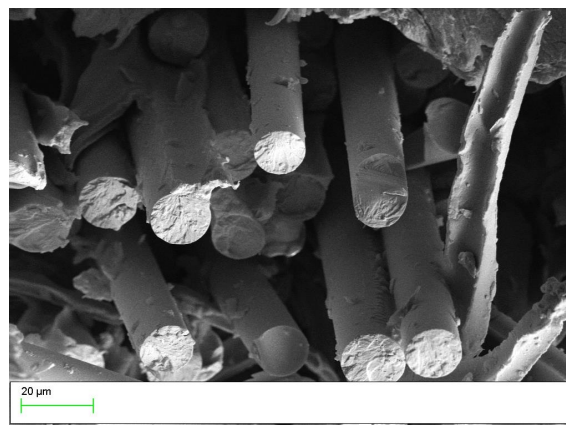
Fig. 7. Load-Deflection diagram for honeycomb specimen.

نمودار نیرو-جاب‌جایی ارائه‌شده برای ساختار لانه‌زنبوری نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت هسته، ظرفیت تحمل بار سازه به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. نمونه با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر بیشترین استحکام و تحمل بار را در مقایسه با نمونه‌های ۲ و ۱/۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. همچنین، این نمونه تا رسیدن به تغییرشکل‌های بزرگ‌تر بدون



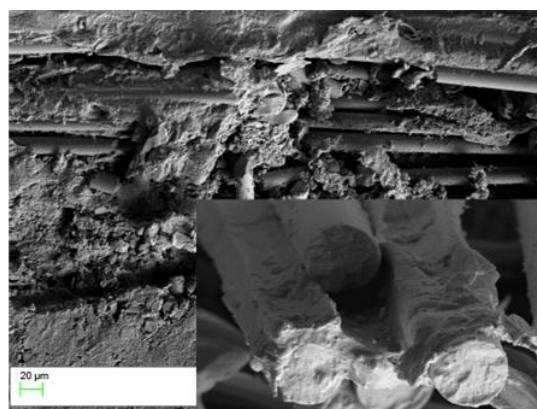
شکل ۴- نمونه سازه ساندویچی بعد از شکست.

Fig. 4. Sandwich Structure specimen after failure.



شکل ۵- نمونه سازه ساندویچی بعد از شکست.

Fig. 5. Sandwich structure specimen after failure.

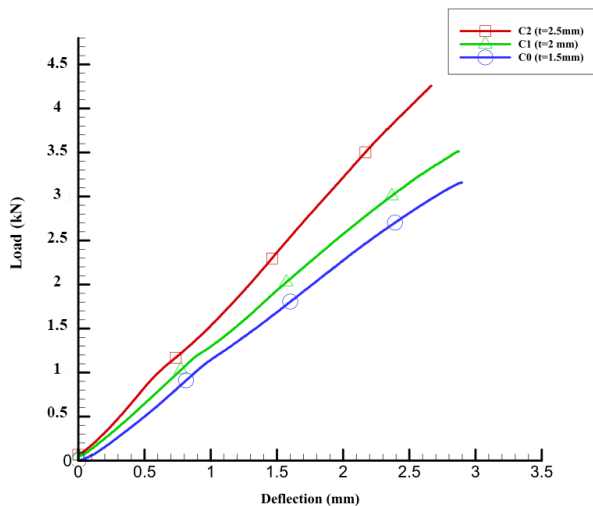


شکل ۶- تصویر SEM از کامپوزیت با الیاف بافته شده و رزین پلی‌آمید.

Fig. 6. SEM image of the composite with woven Glass fibers and polyamide resin.

در شکل ۵ قطر الیاف‌های شیشه به وضوح مشخص است. قطر الیاف‌ها از ۱۲ تا ۲۰ میکرومتر می‌باشد. سطح مقطع یکنواخت و ساختار

بهتری از خود نشان داده است، در حالی که نمونه ۱/۵ میلی متر کمترین مقاومت را داشته و زودتر وارد تغییر شکل های غیر خطی شده است.



شکل ۹- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه آگزتیک سینوسی.

Fig. 9. Load-Deflection diagram for Sinosoidal Ligament Auxetic specimen.

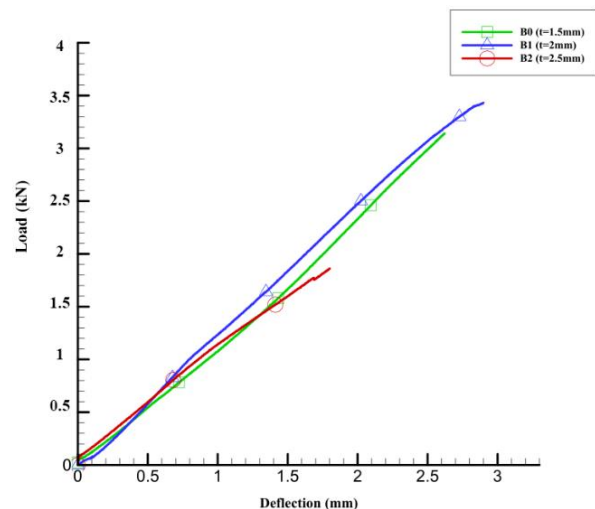
افزایش ضخامت هسته در سازه های ساندویچی به طور معمول منجر به افزایش ظرفیت تحمل بار و استحکام خمشی می شود، اما این بهبود مکانیکی باید در مقایسه با افزایش وزن سازه تحلیل شود. به بیان دیگر، تأثیر مثبت افزایش ضخامت زمانی معنادار است که مشخص شود وزن اضافی ایجاد شده با افزایش ضخامت، به چه میزان نسبت به تحمل بار بیشتر بهینه بوده است. تحلیل نسبت افزایش ظرفیت باربری به افزایش وزن می تواند معیار مؤثری برای ارزیابی کارایی ساختارهای ضخیم تر باشد و در انتخاب ضخامت بهینه برای کاربردهای سبک وزن و مقاوم نقش کلیدی ایفا کند.

نتایج آزمون خمش اطلاعات بسیار زیادی در خصوص رفتار مکانیکی سازه ها فراهم نموده است. جدول ۲ نشان می دهد که با افزایش ضخامت دیواره ها، تحمل بار در تمامی ساختارها افزایش می یابد. در ساختار لانه زنبوری، نیروی تحمل شده از ۲۲۸۰ نیوتن در ضخامت ۱/۵ میلی متر به ۲۸۰۰ نیوتن در ضخامت ۲ میلی متر (افزایش ۲۲/۸ درصدی) و سپس به ۳۲۴۰ نیوتن در ضخامت ۲.۵ میلی متر (افزایش ۱۵/۷ درصدی) رسیده است. در ساختار آگزتیک ری-اینترنت، این مقدار از ۳۱۲۰ نیوتن در ضخامت ۲ میلی متر به ۳۴۱۰ نیوتن در ضخامت ۲/۵ میلی متر (افزایش ۹ درصدی) رسیده است. برای ساختار آگزتیک سینوسی، نیروی تحمل شده از ۳۱۵۰ نیوتن در ضخامت ۱/۵ میلی متر به ۳۵۱۰ نیوتن در ضخامت ۲ میلی متر (افزایش ۱۱/۴ درصدی) و سپس

وقوع خرابی عمل کرده و سفتی بالاتری را از خود نشان داده است. در مقابل، نمونه با ضخامت ۱/۵ میلی متر کمترین تحمل بار را داشته و زودتر وارد ناحیه تغییر شکل شده است. این روند به خوبی تأثیر مستقیم ضخامت هسته بر افزایش سفتی خمشی و ظرفیت تحمل بار را تأیید می کند. بنابراین، افزایش ضخامت هسته می تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد مکانیکی ساختارهای لانه زنبوری ایجاد کند.

در شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نمونه های با هسته آگزتیک ری-اینترنت آورده شده است.

در شکل ۸ مشاهده می شود که خط قرمز که مربوط به نمونه با بیشترین ضخامت است، نتایج متفاوتی را نشان داده که از عملکرد مورد انتظار فاصله دارد. این انحراف به دلیل آن است که تنها یک نمونه از این ضخامت ساخته شده و همان نمونه دارای نقصی در فرآیند ساخت بوده است، که در اثر بارگذاری، دچار شکستگی متفاوتی (جدایش رویه و هسته) نسبت به بقیه نمونه ها داشته است. ضخامت های ۱/۵ و ۲ میلی متر رفتاری قابل پیش بینی داشتند. در مقایسه این دو ضخامت، می توان نتیجه گرفت که افزایش ضخامت هسته از ۱/۵ میلی متر به ۲ میلی متر باعث بهبود استحکام سازه و افزایش ظرفیت تحمل بار شده است. این نتایج تأکید می کند که افزایش ضخامت هسته، بهبود قابل توجهی در ظرفیت مکانیکی سازه های ساندویچی ایجاد می کند، اما صحت و دقت فرآیند تولید نیز تأثیر مستقیمی بر نتایج نهایی دارد.



شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه آگزتیک ری-اینترنت.

Fig. 8. Load-Deflection diagram for Re-entrant Auxetic specimen.

در شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی مربوط به نمونه های با هسته آگزتیک سینوسی آورده شده است. در شکل ۹ نیز نمونه با ضخامت ۲/۵ میلی متر به دلیل ضخامت بالاتر و ساختار مستحکم تر، عملکرد

میلی‌متر به $2/9$ میلی‌متر در ضخامت $2/5$ میلی‌متر (افزایش ۱۱ درصدی) رسیده است. در ساختار آگزتیک سینوسی، تغییر شکل عمودی از $2/7$ میلی‌متر در ضخامت $1/5$ میلی‌متر به $2/9$ میلی‌متر در ضخامت $2/5$ میلی‌متر (افزایش $7/4$ درصدی) افزایش یافته، اما در ضخامت $2/5$ میلی‌متر تغییری نداشته و ثابت مانده است. ساختار آگزتیک سینوسی بیشترین جابجایی عمودی را در تمامی ضخامت‌ها ارائه می‌دهد، اما این مقدار در ضخامت $2/5$ میلی‌متر به یک حد ثابت رسیده است. برای ساختارهای لانه زنبوری و آگزتیک ری-اینترنت، درصد افزایش جابجایی از ضخامت $1/5$ به 2 میلی‌متر نسبت به افزایش از 2 به $2/5$ میلی‌متر بیشتر است.

جدول ۳- مقایسه جابه‌جایی عمودی تا قبل از شکست در سه ساختار.

Table 3. Comparison of Vertical Deflection before Failure in the Three specimens.

Core Structure	Honeycomb	Re-entrant Auxetic	Sinusoidal Auxetic
Max. Elastic Deflection for 1.5mm Thickness Specimen (mm)	2.3	1.8	2.7
Max. Elastic Deflection for 2mm Thickness Specimen (mm)	2.6	2.6	2.9
Max. Elastic Deflection for 2.5mm Thickness Specimen (mm)	3.3	2.9	2.9
Percentage Increase in Max. Load from 1.5 mm to 2 mm Thickness	%13	%44	%7
Percentage Increase in Max. Load from 2 mm to 2.5 mm Thickness	%27	%11	%0

به 4280 نیوتن در ضخامت $2/5$ میلی‌متر (افزایش $21/9$ درصدی) افزایش یافته است.

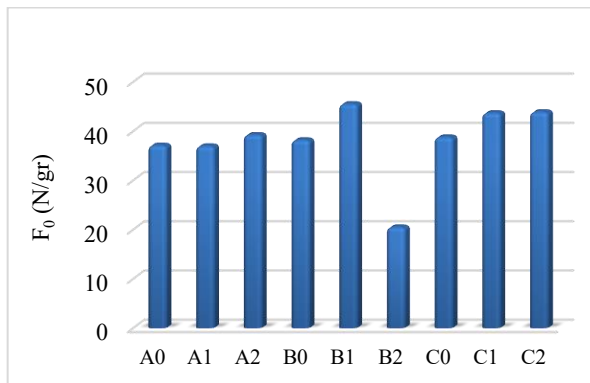
جدول ۲- مقایسه بار حداکثری و درصد افزایش تحمل بار در سه ساختار.

Table 2. Comparison of Maximum load and load-bearing Improvement in three specimens.

Core Structure	Honeycomb	Re-entrant Auxetic	Sinusoidal Auxetic
Max. Load for 1.5mm Thickness Specimen (N)	2280	1890	3150
Max. Load for 2mm Thickness Specimen (N)	2800	3240	3510
Max. Load for 2.5mm Thickness Specimen (N)	3240	3410	4280
Percentage Increase in Max. Load from 1.5 mm to 2 mm Thickness	%23	%65	%11
Percentage Increase in Max. Load from 2 mm to 2.5 mm Thickness	%14	%9	%22

ساختار لانه زنبوری و آگزتیک ری-اینترنت در افزایش از ضخامت $1/5$ به 2 میلی‌متر بهبود بیشتری نسبت به افزایش از 2 به $2/5$ میلی‌متر دارند، اما در ساختار آگزتیک سینوسی، افزایش بار از ضخامت 2 به $2/5$ میلی‌متر چشمگیرتر است. به طور کلی، ساختار آگزتیک سینوسی بیشترین تحمل بار را در تمامی ضخامت‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۳ نشان‌دهنده حداکثر جابجایی عمودی هر ساختار تا قبل از شکست با افزایش ضخامت است. در ساختار لانه زنبوری، جابجایی از $2/3$ میلی‌متر در ضخامت $1/5$ میلی‌متر به $2/6$ میلی‌متر در ضخامت 2 میلی‌متر (افزایش ۱۳ درصدی) و سپس به $3/3$ میلی‌متر در ضخامت $2/5$ میلی‌متر (افزایش ۲۷ درصدی) افزایش یافته است. در ساختار آگزتیک ری-اینترنت، این مقدار از $2/6$ میلی‌متر برای ضخامت 2



شکل ۱۰- نسبت بار به وزن نمونه‌ها با هسته‌های مختلف در لحظه شکست.

Fig. 10. Load-to-weight ratio of specimens with different cores.

نتایج نشان داد که نمونه‌های آگزتیک ری-اینترنت در ضخامت ۲ میلی‌متر (B1) بالاترین مقدار شاخص نیرو به وزن را ثبت کردند، در حالی که کمترین مقدار مربوط به نمونه آگزتیک ری-اینترنت با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر (B2) بود. در سری لانه‌زنبوری (A) تغییر ضخامت دیواره تأثیر چشمگیری بر این شاخص نداشت و مقادیر در محدوده تقریباً یکنواخت باقی ماند. در سری آگزتیک سینوسی (C)، افزایش ضخامت دیواره از ۱/۵ به ۲/۵ میلی‌متر منجر به افزایش نسبی شاخص شد، هرچند مقدار آن در هیچ‌یک از ضخامت‌ها به سطح بیشینه سری B1 نرسید. این نتایج بیانگر آن است که علاوه بر ضخامت دیواره، نوع هندسه هسته و مکانیزم تغییر شکل آن نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به استحکام ویژه بالاتر دارند.

به منظور ارزیابی هم‌زمان توانایی جذب انرژی و کارایی وزنی سازه‌های ساندویچی، انرژی کل جذب‌شده (E) و انرژی ویژه (E₀) برای سه نوع هسته لانه‌زنبوری، آگزتیک ری-اینترنت و آگزتیک سینوسی با ضخامت‌های مختلف دیواره سلول مقایسه شد. این نتایج در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است.

نتایج نشان داد که در شاخص انرژی کل، بیشترین مقدار مربوط به و پس از آن B1 و A2 است. در مقابل، کمترین انرژی جذب‌شده به نمونه B2 تعلق دارد. بررسی انرژی ویژه نشان داد که مقادیر بالای انرژی کل لزوماً به انرژی ویژه بالا منجر نمی‌شود؛ به‌طور مثال، با وجود انرژی کل بالای B1، انرژی ویژه آن کمتر از بسیاری از نمونه‌هاست که این موضوع ناشی از جرم بالاتر نمونه است. بیشترین انرژی ویژه مربوط به نمونه A1 است که ترکیب مناسبی از مقاومت و وزن پایین را ارائه می‌دهد. این نتایج اهمیت در نظر گرفتن هر دو شاخص انرژی کل و انرژی ویژه را در ارزیابی عملکرد مکانیکی سازه‌ها، به‌ویژه در کاربردهایی که وزن نقش کلیدی دارد، نشان می‌دهد.

در جدول ۴، سه ساختار لانه زنبوری، آگزتیک ری-اینترنت و آگزتیک سینوسی از نظر وزن، ضخامت، حداکثر بار تحمل‌شده و جابجایی عمودی مقایسه شده‌اند. در ساختار لانه زنبوری، جابجایی از ۲/۳ میلی‌متر در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر به ۲/۹ میلی‌متر در ضخامت ۲/۵ میلی‌متر افزایش یافته که بیانگر توانایی بالای این ساختار در تحمل تغییر شکل است. حداکثر بار تحمل‌شده نیز از ۲۲۸۰ نیوتن به ۳۲۴۰ نیوتن افزایش یافته، در حالی که وزن از ۲۵/۴ گرم به ۳۸/۵۷ گرم رسیده است. در ساختار آگزتیک ری-اینترنت، جابجایی از ۱/۸ میلی‌متر به ۲/۲ میلی‌متر افزایش یافته که در مقایسه با سایر ساختارها کمترین تغییر را دارد و نشان‌دهنده محدودیت آن در تغییر شکل است. حداکثر بار تحمل‌شده از ۱۸۹۰ نیوتن به ۲۴۱۰ نیوتن افزایش یافته و وزن مشابه لانه زنبوری افزایش پیدا کرده است.

به منظور مقایسه کارایی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های متفاوت، نسبت بار به وزن نمونه‌ها برای سه نوع هسته لانه‌زنبوری، آگزتیک ری-اینترنت و آگزتیک سینوسی در ضخامت‌های مختلف دیواره سلول اندازه‌گیری و تحلیل شد. این نسبت به‌عنوان شاخص مهم برای ارزیابی هم‌زمان استحکام و سبکی سازه در نظر گرفته می‌شود، زیرا افزایش مقاومت سازه بدون افزایش قابل توجه جرم، هدف اصلی طراحی بسیاری از کاربردهای مهندسی است. در شکل ۱۰ نسبت نیرو به وزن (F₀) برای نمونه‌ها با هسته‌های مختلف و ضخامت دیواره سلول متفاوت آورده شده است.

جدول ۴- مقایسه جابه‌جایی عمودی و بار تا قبل از شکست در سه ساختار.

Table 4. Comparison of Vertical Deflection and Load before Failure in the Three specimens.

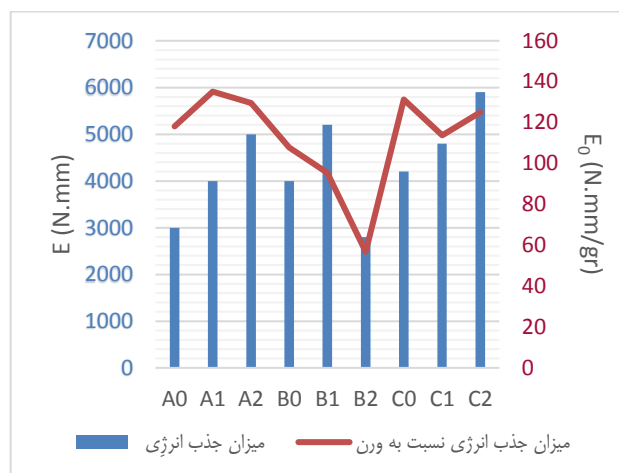
Core Structure	Thickness (mm)	Max. Load (N)	Max. Deflection (mm)	Weight (gr)
Honeycomb	1.5	2280	2.3	25.4
	2	2800	2.6	29.6
	2.5	3200	3.3	38.6
Re-entrant Auxetic	1.5	1890	1.8	37.1
	2	3120	2.6	45.4
	2.5	3410	2.9	49.6
Sinusoidal Auxetic	1.5	3150	2.7	32
	2	3510	2.9	42.2
	2.5	4280	2.9	47.2

وزن این ساختار نیز مشابه سایر نمونه‌ها افزایش یافته و در ضخامت ۲/۵ میلی‌متر به ۴۷/۲۴ گرم رسیده است. ساختار آگزتیک سینوسی، هم از نظر تحمل بار و هم از نظر جابجایی عمودی، عملکرد بهتری نسبت به سایر ساختارها نشان می‌دهد. در مقابل، ساختار لانه زنبوری توانایی مطلوبی در جابجایی بیشتر همراه با بار قابل توجه دارد و ساختار آگزتیک ری-اینترنت، هرچند جابجایی کمتری ارائه می‌دهد، اما با وزن مشابه می‌تواند گزینه مناسبی برای کاربردهایی باشد که جابجایی کمتر مدنظر است.

مقایسه شاخص‌های بار به جرم و انرژی جذب‌شده نشان داد که هندسه هسته و ضخامت دیواره سلول هر دو اثر قابل توجهی بر عملکرد مکانیکی سازه‌های ساندویچی دارند. هسته‌های آگزتیک ری-اینترنت در برخی ضخامت‌ها (مانند B1) توانستند مقادیر بالای بار به جرم را ثبت کنند، اما این برتری همواره با انرژی ویژه بالا همراه نبود. در مقابل، برخی از نمونه‌های لانه‌زنبوری و آگزتیک سینوسی ضمن حفظ بار به جرم مناسب، انرژی ویژه بالاتری نیز ارائه دادند. به طور کلی، افزایش ضخامت دیواره لزوماً باعث بهبود هم‌زمان هر دو شاخص نشد و در مواردی، نمونه‌های با ضخامت کمتر عملکرد بهتری از نظر شاخص وزنی داشتند. این موضوع بیانگر آن است که انتخاب بهینه هندسه و ضخامت هسته باید بر اساس نوع کاربرد و اولویت عملکردی (مقاومت یا جذب انرژی) انجام گیرد. این پژوهش با بهره‌گیری از مواد گرمانرم قابل‌باز یافت و به‌کارگیری سه هندسه‌ی متفاوت هسته شامل ساختارهای لانه‌زنبوری، آگزتیک ری-اینترنت و آگزتیک سینوسی، رویکردی نو و کارآمد در طراحی و ارزیابی سازه‌های ساندویچی سبک‌وزن و پایدار ارائه می‌دهد. تحلیل نتایج نشان داد که تغییر در هندسه‌ی سلولی می‌تواند رفتار خمشی، تمرکز تنش و مکانیزم‌های شکست را به‌طور معناداری تحت تأثیر قرار دهد و این امر زمینه‌ساز بهینه‌سازی هدفمند هندسه‌ی هسته در راستای افزایش استحکام و جذب انرژی است. افزون بر این، استفاده از پلی‌آمید و الیاف شیشه به‌عنوان اجزای قابل‌باز یافت، چشم‌اندازی عملی برای توسعه‌ی سازه‌های سازگار با محیط زیست در صنایع پیشرفته از جمله هوافضا و حمل‌ونقل فراهم می‌سازد. داده‌های حاصل از این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجع تجربی ارزشمندی برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی، توسعه‌ی شبیه‌سازی‌های اجزای محدود و طراحی بهینه‌ی سازه‌های ساندویچی نسل جدید مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، رویکرد ارائه‌شده گامی مؤثر در جهت تلفیق پایداری زیست‌محیطی با کارایی مکانیکی در طراحی سازه‌های آینده به شمار می‌آید.

مراجع

- [1] V. Matta, J. Suresh Kumar, D. Venkataraviteja, and G. B. K. Reddy, "Flexural Behavior of Aluminum Honeycomb Core Sandwich Structure," *IOP Conference Series: Materials Science and*



شکل ۱۱- انرژی و انرژی ویژه نمونه‌ها.

Fig. 11. Energy and specific energy of specimens.

۴ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش، تأثیر تغییر ساختار و ضخامت هسته بر عملکرد سازه‌های تیرهای ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. این سازه‌ها شامل هسته‌ای از جنس پلی‌آمید با ساختار لانه‌زنبوری، آگزتیک ری-اینترنت و آگزتیک سینوسی و رویه‌ای کامپوزیتی با الیاف شیشه و رزین پلی‌آمید می‌باشد. آزمون خمش سه‌نقطه‌ای انجام شده و تأثیر ضخامت هسته بر استحکام خمشی، تحمل بار و میزان جابجایی تا قبل از شکست مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج بدست‌آمده از تحلیل‌های انجام‌شده بر روی ساختار کامپوزیت نشان می‌دهد که ویژگی‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی این مواد نقش قابل توجهی در عملکرد مکانیکی آن‌ها دارند. بررسی ریزساختار با استفاده از تصاویر SEM، اطلاعات ارزشمندی درباره کیفیت پیوند الیاف و رزین، نحوه توزیع رزین و مکانیزم‌های شکست ارائه کرده است که می‌تواند راهنمایی برای بهبود طراحی و فرآیند تولید باشد. ساختار آگزتیک سینوسی در مقایسه با دو ساختار دیگر، چه از نظر تحمل بار و چه از نظر جابجایی عمودی، عملکرد بهتری دارد. با این حال، روند افزایش در ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد که ساختار لانه زنبوری در افزایش ضخامت اولیه عملکرد قابل توجهی داشته و برای کاربردهایی که تحمل بار کمتر اما جابه‌جایی بیشتر نیاز است، می‌تواند گزینه مناسبی باشد. ساختار آگزتیک ری-اینترنت نیز در ضخامت‌های بالاتر بهبود یکنواخت‌تری از نظر تحمل بار و جابجایی دارد. ساختار آگزتیک سینوسی بیشترین جابجایی قبل از شکست را در میان تمامی ساختارها ارائه می‌دهد، به طوری که جابجایی آن از ۲/۷ میلی‌متر در ضخامت ۱/۵ میلی‌متر به ۲/۹ میلی‌متر در ضخامت ۲ میلی‌متر افزایش یافته و در ضخامت‌های بالاتر ثابت مانده است. از نظر بار تحمل‌شده، این ساختار با افزایش از ۳۱۵۰ نیوتن به ۴۲۸۰ نیوتن بهترین عملکرد را داشته است.

- [9] S. A. Mousavi and H. Shokrollahi, "Investigation of Free Vibrations of Recyclable Composite Sandwich Panels with Different Core Structures," *The 14th International Conference on Acoustics and Vibration*, Karaj, Iran, 2024, (In Persian).
- [10] I. M. Daniel, E. E. Gdoutos, K. A. Wang, and J. L. Abot, "Failure modes of composite sandwich beams," *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 309-334, 2002, <https://doi.org/10.1106/105678902027247>.
- [11] U. Farooq, M. S. Ahmad, S. A. Rakha, N. Ali, A. A. Khurram, and T. Subhani, "Interfacial Mechanical Performance of Composite Honeycomb Sandwich Panels for Aerospace Applications," *Arabian Journal for Science and Engineering (AJSE)*, vol. 42, no. 5, pp. 1775-1782, 2017, <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2307-z>.
- [12] X. Chen, "Fractographic analysis of sandwich panels in a composite wind turbine blade using optical microscopy and X-ray computed tomography," *The Engineering Failure Analysis journal*, vol. 111, 2020, Art. no. 104475, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104475>.
- [13] K. Wang, C. Yu, W. Liu, R. Huo, H. Fang, and X. Chen, "Study on flexural property of glass fiber-reinforced polymer reinforced wood-plastic composite panels," *Wood Material Science and Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 478-487, 2025, <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2355554>.
- [14] H. Xie *et al.*, "Flexural behavior evaluation of a foam core curved sandwich beam," *Composite Struct*, vol. 328, 2024, Art. no. 117729, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117729>.
- [15] R. Maboodi, H. Shokrollahi, and M. Esmaeili, "Flutter analysis of a CNT-reinforced composite beam carrying an attached mass in the supersonic flow," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 59-69, 2023, (In Persian), <https://doi.org/10.30699/jtae.2023.7.1.6>.
- [16] S. Tarhani, M. K. Khorramabadi, S. Tarhani, and M. K. Khorramabadi, "Experimental and Analytical Investigation of Impact Strength of Functionally Graded Epoxy/Graphene Nanocomposite," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 45-54, 2024, (In Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.2.4>.
- Engineering*, vol. 197, no. 1, 2017, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/197/1/012046>.
- [2] Z. Chen, J. Li, B. Wu, X. Chen, and Y. Min Xie, "Enhanced mechanical properties of re-entrant auxetic honeycomb with self-similar inclusion," *Composite Structures*, vol. 331, p. 117921, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.117921>.
- [3] B. CASTANIE, C. BOUVET, and M. Ginot, "Review of composite sandwich structure in aeronautic applications," *Composites Part C: Open Access*, vol. 1, 2020, Art. no. 100004, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>.
- [4] M. Alphonse, V. K. Bupesh Raja, V. Gopala Krishna, R. S. U. Kiran, B. V. Subbaiah, and L. V. R. Chandra, "Mechanical behavior of sandwich structures with varying core material - A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3751-3759, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.722>.
- [5] H. Malekinejadbahabadi, A. Farrokhbabadi, G. H. Rahimi, and A. Nazerigivi, "Effect of core shape on debonding failure of composite sandwich panels with foam-filled corrugated core," *Steel and Composite Structures*, vol. 45, no. 3, pp. 467-482, 2022, <https://doi.org/10.12989/scs.2022.45.3.467>.
- [6] F. Xia, P. J. Tan, and D. Ruan, "Failure mechanisms of corrugated sandwich panels under transverse three-point bending," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 24, no. 4, pp. 1808-1827, 2022, <https://doi.org/10.1177/10996362221086517>.
- [7] S. M. N. Shirvani, M. Gholami, H. Afrasiab, and R. A. J. Talookolaei, "Optimal Design of a Composite Sandwich Panel with a Hexagonal Honeycomb Core for Aerospace Applications," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 47, no. 2, pp. 557-568, 2023, <https://doi.org/10.1007/s40997-022-00520-1>.
- [8] S. A. Mousavi, H. Shokrollahi, and H. Sabouri, "Flexural Behavior Assessment of An Eco-Friendly Thermoplastic Composite Sandwich Beam with Recyclable Core and Faces," *Journal of Solid Mechanics*, vol. 16, no. 4, pp. 449-466, 2024, <https://doi.org/10.60664/jsm.2024.1130323>.