



بررسی آزمایشگاهی رفتار خمشی سازه ساندویچی با لایه میانی آگزتیک ساخته شده از مواد سازگار با محیط زیست

سید علی حسینی، حسن شکراللهی*، سیدعلی موسوی، هادی صبوری

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: hshokrollahi@khu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۸ اسفند ۱۴۰۳
پذیرش: ۲ خرداد ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

ساندویچ پنل
ساختار آگزتیک
مواد زیست تخریب پذیر
تست خمش چهار نقطه‌ای
چاپ سه بعدی

چکیده

استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و بهبود پایداری مکانیکی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این تحقیق، به بررسی رفتار خمشی ساندویچ پنل‌هایی پرداخته شده است که هسته آن‌ها دارای ساختار آگزتیک بوده و از پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) ساخته شده است. این هسته‌ها با استفاده از فناوری چاپ سه‌بعدی تولید شده‌اند تا کنترل دقیق‌تری بر هندسه و ابعاد سلولی آن‌ها باشد. همچنین، برای بهینه‌سازی نسبت استحکام به وزن و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، از ورق‌های چوب بالسا به‌عنوان رویه استفاده شده است. به‌منظور بررسی جامع‌تر، آزمون‌های خمش چهارنقطه‌ای و کشش روی نمونه‌ها انجام شد تا تأثیر پارامترهای هندسی، از جمله شکل و ابعاد سلولی هسته‌های آگزتیک، بر استحکام، میزان جذب انرژی و پایداری سازه ارزیابی گردد. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که هسته‌های آگزتیک، در مقایسه با ساختارهای غیرآگزتیک مانند لانه‌زنبوری و سرنیزه‌ای، عملکرد بهتری از نظر استحکام و جذب انرژی ارائه می‌دهند. علاوه بر این، مشخص شد که افزایش ابعاد سلولی هسته، بدون افزایش وزن، موجب بهبود استحکام و افزایش میزان جذب انرژی سازه می‌شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب هندسه و ساختار مناسب در طراحی سازه‌های آگزتیک با استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر می‌تواند به بهبود عملکرد مکانیکی منجر شود. این نتایج، ضمن تأکید بر امکان استفاده از مواد زیست‌تخریب‌پذیر در سازه‌های مهندسی، می‌تواند مبنایی برای تحقیقات آینده در زمینه توسعه سازه‌های سبک، پایدار و کارآمد باشد.

Experimental investigation of bending behavior of sandwich structures with auxetic core made of biodegradable materials

Seyed Ali Hosseini, Hassan Shokrollahi*, Seyed Ali Mousavi, Hadi Sabouri

Department of Mechanical Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran
* Corresponding Author's Email: hshokrollahi@khu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 8 March 2025
Accepted: 23 May 2025

Keywords:

Sandwich Panel
Auxetic Structure
Biodegradable Materials
Four-point Bending Test
3D Print

Abstract

The use of biodegradable materials in the design and construction of engineering structures has attracted significant attention as an effective approach to reducing environmental pollution and enhancing mechanical sustainability. This study investigates the flexural behavior of sandwich panels with auxetic cores made of polylactic acid (PLA). These cores were fabricated using 3D printing technology to achieve precise control over their geometry and cellular dimensions. Additionally, balsa wood sheets were used as face sheets to optimize the strength-to-weight ratio and minimize environmental impact. To conduct a comprehensive evaluation, four-point bending and tensile tests were performed on the specimens to assess the effect of geometric parameters, including the shape and size of the auxetic core cells, on strength, energy absorption, and structural stability. The experimental results indicated that auxetic cores including re-entrant designs exhibit superior performance in terms of strength and energy absorption compared to non-auxetic structures such as honeycomb designs. Furthermore, it was found that increasing the core cell dimensions without adding extra weight enhances both strength and energy absorption capacity. The findings of this study suggest that incorporating biodegradable materials in the design of auxetic structures not only reduces environmental impact but also improves their mechanical performance. These results provide a foundation for future research in the development of lightweight and efficient structural designs.

Please cite this article using:

Hosseini SA, Shokrollahi H, Mousavi SA, Sabouri H. Experimental investigation of bending behavior of sandwich structures with auxetic core made of biodegradable materials. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Jun 22;12(4):63-75. doi: 10.22034/ijme.2025.511051.2055 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

پنل‌های ساندویچی یا ساندویچ پنل‌ها به دلیل راندمان سازه‌ای بالا به شکل گسترده‌ای در صنایع مختلف، به‌ویژه ساختمان و حمل‌ونقل، مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، چالش‌های زیست‌محیطی و لزوم کاهش روزافزون استفاده از منابع غیرقابل تجدید، ضرورت توسعه مواد بازیافتی و زیست‌تخریب‌پذیر را در این سازه‌ها پررنگ‌تر کرده است. انتخاب مواد اولیه و روش‌های ساخت، با در نظر گرفتن معیارهای مکانیکی و زیست‌محیطی انجام شده است. نتایج بررسی‌های تجربی و عددی نشان داده است که چوب بالسا و پلیمر پلی‌لاکتیک اسید (PLA) گزینه‌های مناسبی برای هسته‌های آگرتیک این سازه‌ها هستند [۱]. با تحلیل ویژگی‌های مکانیکی و مقایسه این پنل‌ها با نمونه‌های متداول، استحکام و ظرفیت تحمل بار آن‌ها ارزیابی شده و امکان‌سنجی استفاده از این مواد در کاربردهای مهندسی بررسی شده است.

از آنجا که تحقیقات در زمینه ساندویچ پنل‌های با هسته آگرتیک هنوز در حال توسعه است، بررسی دقیق‌تر پژوهش‌های پیشین و بهینه‌سازی طراحی از اهداف تحقیقات آینده خواهد بود. گریم و همکاران [۲] ساختار لانه‌زنبوری نیمه بازگشتی را معرفی کردند که ترکیبی از سلول‌های بازگشتی و غیر بازگشتی است. تحلیل FEM نشان داد که این ساختار در یک جهت دارای نسبت پواسون صفر و در جهت عمود، مدول یانگ بالایی است، که باعث افزایش سختی و ایجاد انحنای استوانه‌ای در هسته‌های ساندویچی مهندسی می‌شود. ودلی و همکاران [۳] پاسخ ضربه‌ای ساندویچ پنل‌های آلومینیومی با هسته چین‌دار اکستروژده را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این پنل‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای توزیع‌شده، تغییر شکل کمتری نسبت به صفحات یکپارچه دارند، اما در برابر ضربات متمرکز، مقاومت کمتری نشان دادند. افزودن سرامیک به هسته باعث بهبود مقاومت بالستیکی این سازه‌ها شد. بیانچی و همکاران [۴] رفتار مکانیکی فوم‌های پلی‌یورتان آگرتیک را تحت بارگذاری کششی چرخه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که میزان فشرده‌سازی در تولید، تأثیر زیادی بر مدول مماسی و ضریب پواسون دارد. همچنین، این فوم‌ها به دلیل جذب انرژی بالا، برای کاربردهای جاذب ارتعاش مناسب هستند. گیسون و همکاران [۵] مکانیک سازه‌های سلولی سه‌بعدی را با مدل‌سازی تحلیلی بررسی کرده و نشان دادند که خواص مکانیکی فوم‌های سلولی به چگالی و هندسه آن‌ها وابسته است. نتایج حاکی از کاهش نمایی مدول یانگ و استحکام با کاهش چگالی بود. این مطالعه مبنایی برای طراحی سازه‌های سبک ارائه کرد. میر و همکاران [۶] خواص مکانیکی و کاربردهای سازه‌های آگرتیک را بررسی کردند. آن‌ها انواع مختلف این سازه‌ها، از جمله فوم‌های سلولی، پلیمرهای میکروسکوپی و کامپوزیت‌های آگرتیک را تحلیل کرده و دریافتند که این مواد در مقایسه با مواد معمولی، مقاومت به ضربه، سختی برشی و جذب انرژی بالاتری دارند. در نتیجه قابلیت زیادی برای استفاده در کاربردهای مختلف پزشکی و مهندسی دارند. ایوانز و همکاران [۷] مروری جامع بر مواد آگرتیک ارائه کرده و نشان دادند که این مواد، به دلیل نسبت پواسون منفی، سختی فشاری و مقاومت به ضربه بالایی دارند. ژیاو و همکاران [۸] رفتار فشاری ساندویچ پنل‌های با هسته آگرتیک فلزی مدرج^۱ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغییر گرادینانی ضخامت دیواره‌های سلولی، استحکام فشاری و نسبت پواسون را بهبود داده و ظرفیت جذب انرژی هسته‌های مدرج را نسبت به نمونه‌های یکنواخت افزایش می‌دهد. اینگرو و همکاران [۹] طراحی و مدل‌سازی ساختارهای لانه‌زنبوری آگرتیک و ترکیبی را برای بهبود خواص مکانیکی درون‌صفحه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که ساختار آگرتیک-تقویت‌شده، استحکام فشاری ۳۰٪ بیشتر از لانه‌زنبوری معمولی و ۶۵٪ بیشتر از ساختار آگرتیک دارد. همچنین، ساختارهای ترکیبی امکان کنترل تغییر شکل و مکانیزم شکست را فراهم می‌کنند. شهرجودی و همکاران [۱۰] خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌هایی با هسته فوم آگرتیک و رویه‌های فیبر کربنی را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های فشاری و ضربه‌ای نشان داد که پنل‌های با هسته آگرتیک، مدول فشاری ۸/۴ برابر و مقاومت فشاری ۲۰ برابر بیشتر از پنل‌های با فوم معمولی دارند. همچنین، مقاومت به ضربه آن‌ها ۱۳٪ بالاتر بود که نشان‌دهنده توانایی جذب انرژی بهتر آن‌ها است. شکری‌راد و همکاران [۱۱] به بررسی قابلیت جذب انرژی در سازه‌های آگرتیک سلولی پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، تأثیر هندسه سلولی بر میزان جذب انرژی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی را تحلیل کردند. نتایج نشان داد که ساختارهای آگرتیک در مقایسه با نمونه‌های معمولی، عملکرد بهتری در برابر ضربه دارند و توانایی بالاتری در جذب انرژی از خود نشان می‌دهند. روان و همکاران [۱۲] عملکرد مکانیکی یک ساختار آگرتیک به نام ری‌اینترنت کایرال آگرتیک^۲ (RCA) را تحت فشار تک‌محوری شبه‌استاتیکی بررسی کردند. آن‌ها این ساختار را با لانه‌زنبوری شش‌ضلعی و لانه‌زنبوری ری‌اینترنت

¹ Graded Metallic

² Re-entrant Chiral Auxetic

مقایسه کردند. نتایج نشان داد که ساختار RCA در بارگذاری خارج از صفحه، توانایی جذب انرژی بیشتری نسبت به دو ساختار دیگر دارد، اما لانه‌زنبوری شش ضلعی کارایی جذب انرژی بالاتری نشان داد. همچنین، ساختار RCA نسبت پواسون منفی و رفتار مکانیکی ناهمسانگردی از خود نشان داد. نجفی و همکاران [۱۳] جذب انرژی در سازه‌های آگرتیک را تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها سه هندسه آگرتیک (ری‌اینترت، سرنیزه‌ای^۱ و آنتی‌تتراکایرال) و یک هندسه غیرآگرتیک (لانه‌زنبوری) را با روش چاپ سه‌بعدی تولید کردند. نتایج نشان داد که سازه‌های آگرتیک نسبت به لانه‌زنبوری عملکرد بهتری در جذب انرژی دارند و سازه سرنیزه‌ای ۱۶۱٪ جذب انرژی بیشتری نسبت به لانه‌زنبوری ارائه می‌دهد. حبیب و همکاران [۱۴] جذب انرژی در سازه‌های مشبک پلیمری تولید شده با فناوری چاپ سه‌بعدی را بررسی کردند. آن‌ها شش نوع هندسه مختلف واحد سلولی را با چگالی نسبی یکسان طراحی و از نظر عملکرد جذب انرژی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که ساختارهای با تغییر شکل خمشی، جذب انرژی بیشتری دارند، در حالی که ساختارهای مبتنی بر کشش و کمانش، استحکام بیشتری دارند اما عملکرد ضعیف‌تری در جذب انرژی نشان می‌دهند. لی و همکاران [۱۵] رفتار خمشی سازه‌های ساندویچی با هسته‌های چاپ سه‌بعدی با هندسه‌های مختلف را بررسی کردند. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد که هسته‌های خرابی بیشترین سختی و استحکام خمشی را ارائه می‌دهند، در حالی که هسته‌های آگرتیک سرنیزه‌ای، با مکانیزم شکست متفاوتی که دارند، ظرفیت جذب انرژی بیشتری خواهند داشت. نتایج عددی و تجربی نشان داد که انتخاب ساختار هسته تأثیر زیادی بر مکانیزم‌های شکست و پاسخ غیرخطی مکانیکی سازه‌های ساندویچی دارد. موسوی و همکاران [۱۶] در پژوهشی رفتار خمشی تیرهای ساندویچی ترموپلاستیکی با رویه‌های الیاف شیشه و هسته‌های پلی‌امیدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. سه نوع هسته لانه‌زنبوری، آگرتیک ری‌اینترت و آگرتیک سینوسی آزمایش شدند. نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد که هسته آگرتیک ری‌اینترت (۲ میلی‌متر) بالاترین جذب انرژی و بهترین نسبت نیرو به وزن را دارد. همچنین، افزایش ضخامت در هسته آگرتیک سینوسی تأثیر کمتری بر استحکام داشت، اما در آگرتیک معمولی تغییر مکان در شکست ۳۰٪ افزایش یافت. این تحقیق نشان داد که ساندویچ پنل‌های ترموپلاستیکی علاوه بر استحکام بالا، بازیافت‌پذیر بوده و برای سازه‌های پایدار مناسب هستند. پلی‌نسکی و همکاران [۱۷] رفتار خمشی تیرهای ساندویچی سبک مبتنی بر چوب را با هسته آگرتیک بررسی کردند. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد که تیرهای دارای رویه HDF^۲ و تخته سه‌لایی بهترین خواص مکانیکی را دارند. همچنین، استفاده از هسته آگرتیک باعث بهبود توانایی جذب انرژی این سازه‌ها شد، اما میزان انرژی مستهلک‌شده در برخی ترکیبات کاهش یافت. این مطالعه پتانسیل استفاده از مواد بازیافتی در ساخت پنل‌های ساندویچی را نشان داد. یزدانی و همکاران [۱۸] جذب انرژی و عملکرد مکانیکی پنل‌های ساندویچی با هسته‌های مشبک آگرتیک را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از چاپ سه‌بعدی، نمونه‌هایی با هسته‌های شش ضلعی، مستطیلی و آگرتیک تولید کرده و رفتار آن‌ها را تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت پایین آزمایش کردند. نتایج نشان داد که پنل‌های آگرتیک بیشترین ظرفیت جذب انرژی و کمترین نیروی انتقالی به رویه‌ها را دارند، که آن‌ها را برای کاربردهای جاذب انرژی و کاهش ضربه مناسب می‌کند. باکس و همکاران [۱۹] نشان دادند که مواد فلزی و پلیمری رایج را می‌توان با ایجاد آرایه‌های منظم از حفره‌ها به ساختارهای آگرتیک تبدیل کرد. آزمایش‌های فشاری نشان داد که این سازه‌ها به جای شکست موضعی، دچار تغییر الگوی ساختاری می‌شوند که مشابه رفتار مشاهده‌شده در سازه‌های الاستومری است. بررسی‌های عددی نشان داد که این تغییرات به دلیل کمانش اعضای باریک سازه‌ای رخ می‌دهد. این تحقیق امکان طراحی متامتریال‌های سخت با خواص آگرتیک را برای کاربردهای صنعتی پیشنهاد می‌کند. دونگ و همکاران [۲۰] خواص مکانیکی فشاری لانه‌زنبوری آگرتیک ری‌اینترت فلزی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت دیواره‌های سلولی موجب تغییر شکل پایدارتر و تنش لهیدگی بیشتر می‌شود. همچنین، شبیه‌سازی عددی تأیید کرد که برای دقت بیشتر، نمونه‌ها باید حداقل چهار سلول داشته باشند. فوجیتا و همکاران [۲۱] طراحی پنل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری برای سیستم‌های فضایی را بررسی کردند. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای روی پنل‌هایی با هسته آلومینیومی و رویه‌های CFRP^۳ نشان داد که این سازه‌ها وزن کم و استحکام خمشی مناسبی دارند و استفاده از آن‌ها در کاهش وزن و بهبود عملکرد سیستم‌های خورشیدی فضایی موثر است. رضایت و همکاران [۲۲] پژوهشی در مورد جذب انرژی پنل‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری و رویه آلومینیومی انجام دادند. این پژوهش شامل تحلیل‌های عددی در

¹ Arrowhead

² High-Density Fibreboard

³ Carbon-Fiber Reinforced Polymer

نرم افزار آباکوس و آزمایش های تجربی تحت بارگذاری شبه استاتیکی بود. نتایج نشان داد که مکانیزم های تخریب شامل چروک شدگی، جدایش لایه ها، پارگی و خرد شدن لایه میانی است. حسن زاده و همکاران [۲۳] یک ساختار آگرتیک هیبریدی نوین را با ترکیب سلول های سرنیزه ای و میسینگ ریب^۱ و به روش پرینت سه بعدی طراحی و بررسی کردند. آزمایش های انجام شده نشان داد که این ساختار هنگام کشش در جهت طولی، در جهت عرضی نیز گسترش یافته و نسبت پواسون منفی از خود نشان می دهد. بیشترین مقدار این نسبت پواسون، ۰/۵۴- در مقدار کرنش طولی ۵٪ گزارش شده که عملکرد بهتری نسبت به نمونه های پیشین دارد.

در این پژوهش، به منظور ارائه یک راهکار سازه ای پایدار، از مواد زیست سازگار در ساخت ساندویچ پنل ها استفاده شده و رفتار خمشی آن ها بررسی گردیده است. برای مقایسه عملکرد سازه های آگرتیک و غیر آگرتیک، سه هندسه شامل دو نوع هسته آگرتیک (ری اینترن و سرنیزه ای) و یک هسته غیر آگرتیک (لانه زنبوری) بررسی شده اند. این سازه ها با استفاده از مواد زیست تخریب پذیر و تجدید پذیر شامل PLA و چوب بالسا ساخته شده و از نظر مکانیکی ارزیابی شده اند. هدف اصلی، تحلیل تأثیر هندسه هسته بر خواص مکانیکی سازه ها بوده است. بررسی ها نشان داده است که سازه های آگرتیک، به دلیل استحکام بالاتر و ظرفیت جذب انرژی مناسب تر، برای کاربردهای مهندسی مانند سازه های جذب انرژی عملکرد بهتری دارند. استفاده هم زمان از هندسه های آگرتیک و مواد زیست تخریب پذیر و قابل بازیافت، افق جدیدی در طراحی سازه های سبک، پایدار و دوستدار محیط زیست گشوده و پتانسیل بالایی برای توسعه کاربردهای مهندسی فراهم کرده است.

۲- مراحل آماده سازی و ساخت نمونه ها

برای آماده سازی و ساخت با استفاده از مطالعات پیشین و تحقیقات گذشته [۱۳، ۲۴، ۲۵]، جنس ماده PLA، هندسه و ابعاد سلولی هسته ها انتخاب شده است و سپس به کمک نرم افزار CATIA، هسته ها طراحی و برای ساخت به چاپگر سه بعدی داده شد.

پس از ساخت هسته ها، رویه ها با استفاده از ورق چوب بالسا بریده و با چسب به هسته چسبانده و برای آزمون خمش آماده شد. ورق های چوب بالسا در ضخامت ها و سختی های مختلف در بازار موجود است. تصویر نمونه استفاده شده در شکل ۱-ج آورده شده است. به طور معمول هرچه رنگ چوب تیره تر باشد، سختی آن بیشتر است. لازم به ذکر است با توجه به بافت و ساختار چوب به دلیل ناهمگنی طبیعی ساختار چوب، خواص مکانیکی آن در نقاط مختلف متغیر خواهد بود. رویه ها با ضخامت ۱ میلی متر و طول و عرض ۲۰۰×۵۰ میلی متر از برش ورق بالسا به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ میلی متری آماده شدند.



(ب)



(ج)



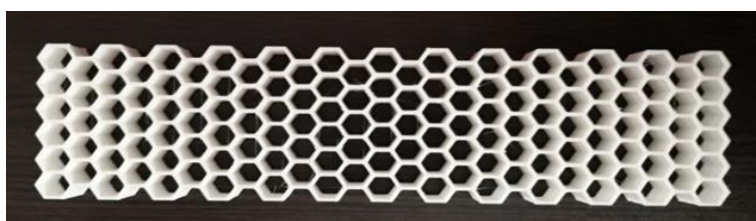
(الف)

شکل ۱ الف) دستگاه چاپگر سه بعدی PLA، ب) قرقره فیلامنت، ج) ورق چوب بالسا

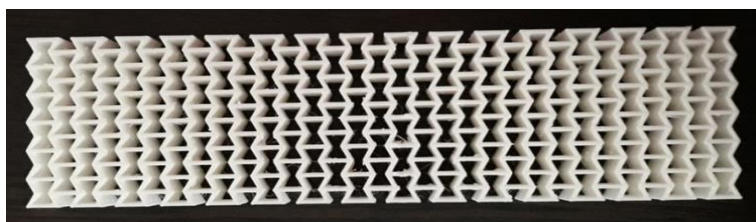
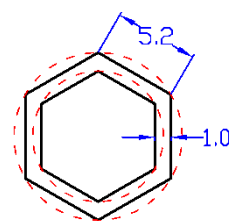
¹ Missing Rib

برای ساخت هسته آگرتیک از فناوری چاپ سه بعدی با فیلامنت PLA استفاده شده است. فیلامنت PLA از برند مدریک^۱ (شکل ۱-ا) و دستگاه چاپگر سه بعدی Quantum 3D (شکل ۱-الف) است. پارامترهای چاپ شامل دمای نازل ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد و دمای صفحه گرم ۵۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. کیفیت محور Z، ۰/۲ میلی‌متر و قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر و همچنین ضخامت دیواره سلولها ۱ میلی‌متر است.

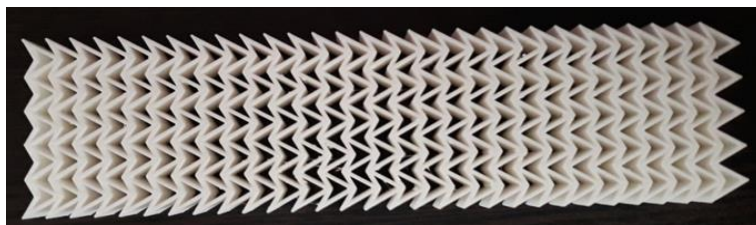
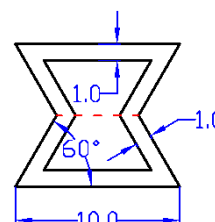
برای اتصال بین رویه و هسته، با توجه به خواص چوب بالسا و پلیمر پلی لاکتیک اسید و نیاز به چسبندگی مطلوب و هماهنگی بین چسب و اجزای متصل شونده، از چسب همه کاره رازی استفاده شده است. با توجه به ابعاد استاندارد و مناسب برای تست خمش چهارنقطه‌ای، ابعاد ۲۰۰×۵۰ میلی‌متر برای نمونه‌ها در نظر گرفته شد و با استفاده از نرم‌افزار کتیا طراحی و سپس با کمک نرم‌افزار 3D Simplify طرح هسته برای ساخت به چاپگر ارسال گردید. در این پژوهش دو هندسه آگرتیک ری‌اینترنت و سرنیزه‌ای و هسته متداول غیرآگرتیک لانه زنبوری مقایسه شده‌اند نمونه‌های ساخته شده در شکل ۲ آورده شده است.



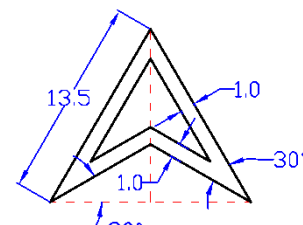
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۲ انواع هسته‌های ساخته شده به روش چاپ سه بعدی به همراه سلول واحد هر یک؛ (الف) غیرآگرتیک لانه زنبوری، (ب) آگرتیک ری‌اینترنت، (ج) آگرتیک سرنیزه‌ای

سه نمونه از هر هندسه با ابعاد مذکور و ارتفاع‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر، همراه با رویه‌های ۱ میلی‌متری ساخته شد. ضخامت دیواره سلولها ۱ میلی‌متر و قطر نازل چاپگر ۰/۴ میلی‌متر تعیین گردید. پس از آماده‌سازی، رویه‌ها بالسا با یک لایه چسب روی هسته‌ها متصل شده و نمونه‌ها تحت وزن ۱ کیلوگرم به مدت ۱ ساعت نگهداری شدند تا اتصال کامل شود.

برای تهیه نمونه‌ها، ورق چوب بالسا در راستای الیاف بریده شد تا تنش‌های فشاری و کششی در آزمون خمش همراستا با الیاف باشند. در غیر این صورت، استحکام کاهش یافته و احتمال شکست زود هنگام افزایش می‌یابد. چوب بالسا در جهت الیاف استحکام و چقرمگی بالاتری دارد، اما ناهماهنگی الیاف می‌تواند موجب ناپایداری مکانیکی و شکست ناگهانی شود. وزن هسته‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

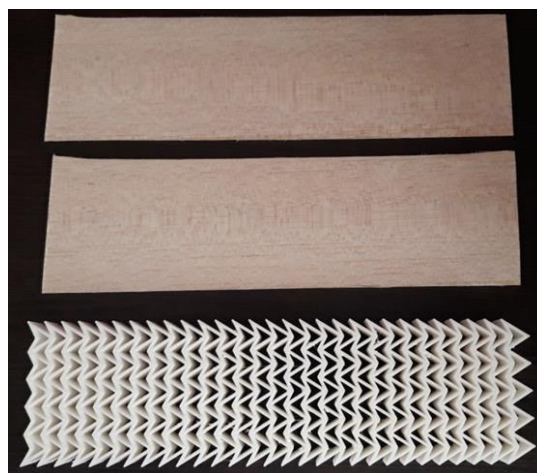
^۱ Medrik



(ب)



(ج)



(الف)

شکل ۳ الف) هسته سرنیزه‌ای و رویه‌ها، ب) چسب زدن و اتصال اجزا، ج) نمونه نهایی ساخته شده ساندویچ پنل

جدول ۱ وزن هسته‌ها بر حسب گرم

سرنیزه‌ای	ری اینترنت	لانه زنبوری	نوع هسته
۵۵/۱۴ ± ۵/۰۸	۴۴/۳۱ ± ۳/۵۷	۲۷/۶۱ ± ۲/۵۱	ضخامت هسته ۱۰ میلی‌متر
۸۳/۳۲ ± ۷/۴۸	۶۵/۷۱ ± ۵/۳۰	۴۰/۰۵ ± ۳/۴۵	ضخامت هسته ۱۵ میلی‌متر
۱۰۴/۸۱ ± ۹/۶۹	۸۹/۶۱ ± ۷/۲۵	۵۳/۷۹ ± ۴/۶۳	ضخامت هسته ۲۰ میلی‌متر

نمونه‌های دمبلی‌شکل پلیمری جهت آزمون کشش PLA مطابق با استاندارد ASTM D638 تهیه شدند. این نمونه‌ها دارای طول کلی ۱۶۵ میلی‌متر و طول گیج ۵۷ میلی‌متر هستند. به منظور انجام مطالعه‌ای تکمیلی، هسته‌های ری اینترنت با وزن ثابت و ابعاد سلولی متفاوت ساخته شدند. در این نمونه‌ها، وزن هسته‌ها ثابت نگه داشته شد و ابعاد سلول‌ها افزایش یافت تا تأثیر کاهش چگالی هسته بر استحکام و خواص مکانیکی ساندویچ پنل بررسی شود. در این طراحی، طول اضلاع سلول‌ها افزایش یافته است، اما ابعاد کلی هسته‌ها بدون تغییر باقی مانده است.

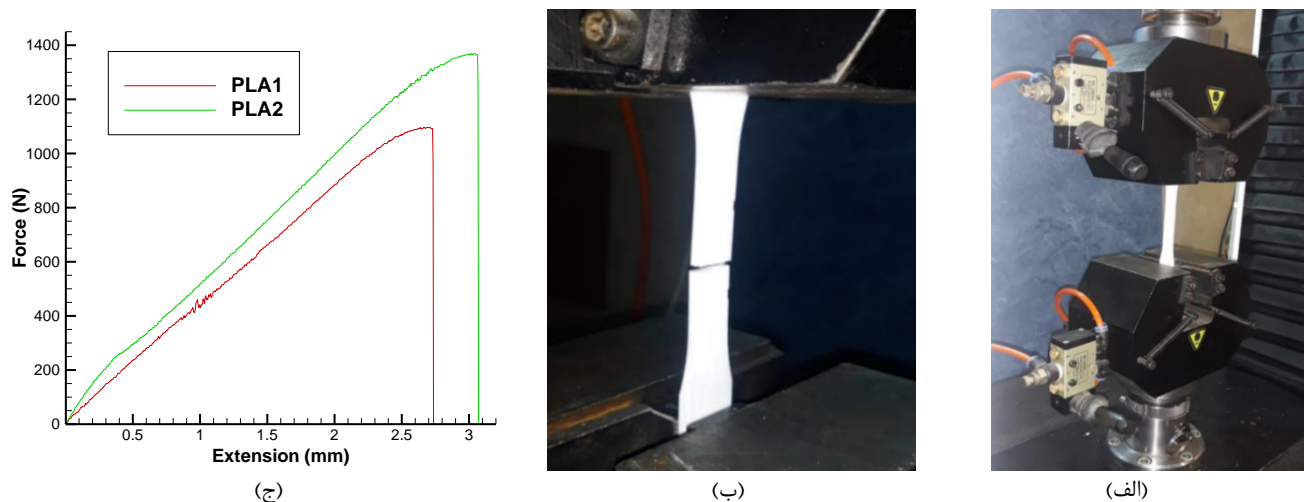
۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج به دست آمده از آزمون‌های مختلف ارائه شده است. این نتایج شامل تست کشش نمونه‌های دمبلی پلیمری و چوب بالسا و نیز تست خمش سازه‌های ساندویچی است. نمونه‌ها پس از ساخت و آماده‌سازی، با استفاده از دستگاه یونیورسال مورد آزمون‌های کشش و خمش قرار گرفته و با توجه به داده‌های بدست آمده از آزمون، نمودارهای مربوط به خواص مکانیکی آن‌ها ترسیم شد. آزمون کشش با نرخ کرنش ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. از این نمونه دو قطعه ساخته و مورد آزمون قرار گرفت تا با مقایسه نتایج بدست آمده، اطلاعات دقیق‌تری بدست آید. در شکل ۴ قطعه دمبلی PLA پیش و پس از آزمون کشش به همراه منحنی نیرو-جابجایی آن ارائه شده است.

فرایند ساخت و آزمون‌ها ممکن است به دلایلی از جمله آلودگی‌های روی سطح نمونه، عدم یکسان بودن خواص مکانیکی در تمامی سطح و بسیاری موارد دیگر مورد تأثیر قرار گیرد. برخی از تأثیرات ایده‌آل نبودن شرایط در نمودارها قابل مشاهده است. در جدول ۲ مدول یانگ، استحکام تسلیم و استحکام نهایی PLA ارائه شده است.

از چوب بالسا، شش نمونه ساخته شد و مورد آزمون کشش قرار گرفت. در شکل ۵، قرارگیری نمونه چوب بالسا در فک کشش قبل از شروع آزمون، به همراه سه نمونه پس از آزمون کشش و همچنین نمودارهای نیرو-جابجایی نمونه‌های بالسا آمده است. با مقایسه نتایج تست کشش برای چوب بالسا و اختلاف نسبتاً زیاد میان آن‌ها می‌توان دریافت که بر خلاف مواد مصنوعی و ساخته انسان مانند فولاد یا پلیمرها که دارای خواص تقریباً یکسان در همه نقاط قطعه هستند، برای مواد و مصالح طبیعی مانند چوب، حتی

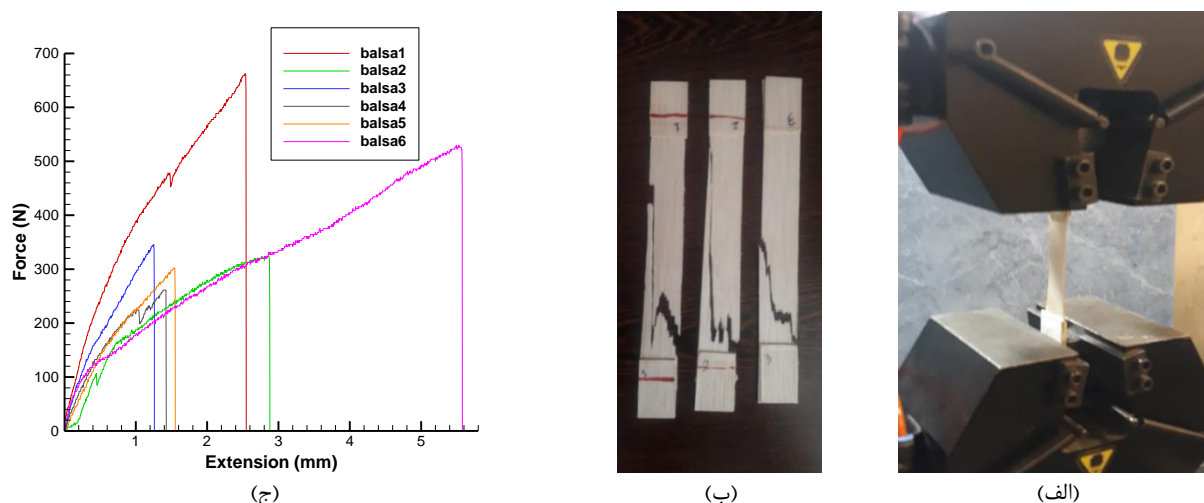
برای قطعات ساخته شده از یک ورق، خواص مکانیکی متفاوتی وجود دارد. باید به این نکته دقت داشت که نمونه‌های آماده شده برای آزمون کشش با دست ساخته شده‌اند و از لحاظ دقت ابعادی دارای خطای کمی هستند. در جدول ۳ نتایج به دست آمده از آزمون کشش ارائه شده است. اختلاف درصد بین کمترین و بیشترین مقدار مدول الاستیسیته ۸۰/۱ درصد و برای استحکام نهایی ۶۲/۵ درصد است.



شکل ۴ الف) قطعه دمبلی PLA قبل از شروع تست کشش، ب) قطعه دمبلی PLA در پایان تست کشش، ج) نمودار نیرو-جابجایی

جدول ۲ خواص به دست آمده از تست کشش PLA

نمونه	مدول الاستیسیته (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)
PLA1	۰/۶۳۳	۲۶/۶۶	۲۸/۱۱
PLA2	۰/۷۱۳	۳۲/۵۶	۳۵/۰۸



شکل ۵ الف) نمونه چوب بلسا هنگام آزمون کشش، ب) نمونه‌های چوب بلسا پس از تست کشش، ج) نمودار نیرو-جابجایی چوب بلسا

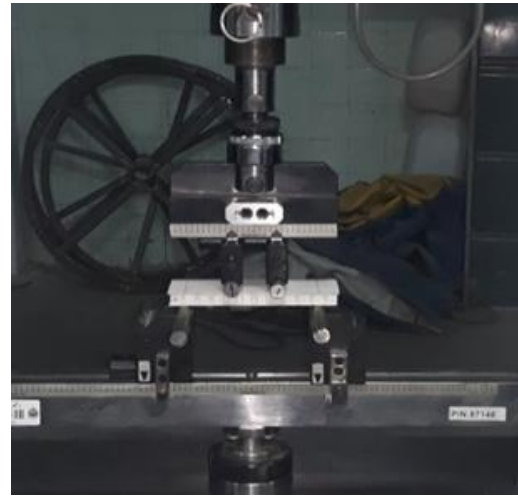
جدول ۳ خواص به دست آمده از تست کشش چوب بلسا

نمونه	بلسا ۱	بلسا ۲	بلسا ۳	بلسا ۴	بلسا ۵	بلسا ۶
مدول الاستیسیته (MPa)	۱۰۶۸/۰۱	۴۵۳/۱۴	۲۱۷۴/۶۶	۹۵۶/۱۵	۹۴۱/۶۶	۴۴۴/۱۵
استحکام نهایی (MPa)	۳۳/۱۱	۱۵/۸۶	۳۲/۶۲	۱۲/۴۳	۱۳/۷۱	۲۳/۵۴

تست خمش چهار نقطه، با استفاده از دستگاه یونیورسال سنتام STM-150 انجام شده است. محاسبات و تست خمش برای سازه‌های ساندویچی بر اساس استاندارد ASTM C393-00 انجام شده است. در شکل ۶ سازه در فک دستگاه دیده می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۶ نمونه ساندویچ پنل در هنگام تست با دستگاه یونیورسال؛ (الف) ابتدای تست خمش، (ب) در پایان تست خمش

پس از انجام آزمون‌های کشش و خمش، داده‌های حاصل تحلیل شده و نمودارهای رفتار سازه‌ها و مقایسه آن‌ها بررسی گردیده است. شکل ۷-الف از آزمون خمش برای نمونه‌ها با هسته ۱۰ میلی‌متری بدست آمده که این سازه‌ها شامل هسته‌های لانه زنبوری (hnc)، ری‌اینترت (RE) و سرنیزه‌ای (arh) است. در شکل ۷-الف، دو سازه با هسته لانه‌زنبوری به نام‌های hnc1 و hnc2 نشان داده شده‌اند. نمونه‌ی hnc1 با استفاده از ناحیه‌ای متفاوت از همان ورق چوب بالسا ساخته شده که به لحاظ ظاهری رنگ تیره‌تری داشته و از نظر مکانیکی سخت‌تر بوده است. این تفاوت طبیعی در خواص چوب بالسا باعث شد که رفتار مکانیکی hnc1 نسبت به سایر نمونه‌ها متفاوت باشد. اما به طور کلی سازه با هسته سرنیزه‌ای، ری‌اینترت و لانه زنبوری به ترتیب بیشترین به کمترین استحکام را از خود نشان داده‌اند. شکل ۷-ب نمودار منحنی‌های بدست آمده از آزمون خمش برای نمونه‌های با هسته ۱۵ میلی‌متری است. روند مشابه شکل ۷-الف در این نمودارها نیز مشاهده می‌شود. شکل ۷-ج برای نمونه‌ها با هسته ۲۰ میلی‌متری رسم شده است. نتایج تست خمش برای سازه‌های با ضخامت هسته ۲۰ میلی‌متر در شکل ۷-ج آمده است. همانگونه که در منحنی‌های شکل ۷ مشاهده می‌شود، در ناحیه الاستیک، نقطه تسلیم برای سازه‌های با هسته آگرتیک بالاتر از سازه با هسته غیرآگرتیک است. از مقایسه منحنی‌ها به وضوح دیده می‌شود که ساندویچ پنل‌های هسته آگرتیک از هسته لانه زنبوری در ابعاد یکسان، دارای استحکام بالاتری هستند. همچنین، هسته سرنیزه‌ای استحکام بالاتری نسبت به هسته ری‌اینترت دارد.

در نمودارهای شکل ۷ پرش در منحنی‌ها مشاهده می‌شود که مربوط به پدیده تخریب پیش‌رونده^۱ است. به این معنی که ابتدا صدمه موضعی در ناحیه کوچکی از سازه رخ می‌دهد و این صدمه موضعی، به بخش‌های دیگری از سازه گسترش یافته و در نهایت به خرابی کلی سازه، منتهی می‌شود. در ادامه، مقایسه ساندویچ پنل‌های با هندسه هسته یکسان و با ضخامت‌های متفاوت ارائه شده است. در شکل ۸ نمودارهای مقایسه‌ای میان ساندویچ پنل‌های با هسته لانه زنبوری، ری‌اینترت و سرنیزه‌ای با ضخامت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متری آمده است.

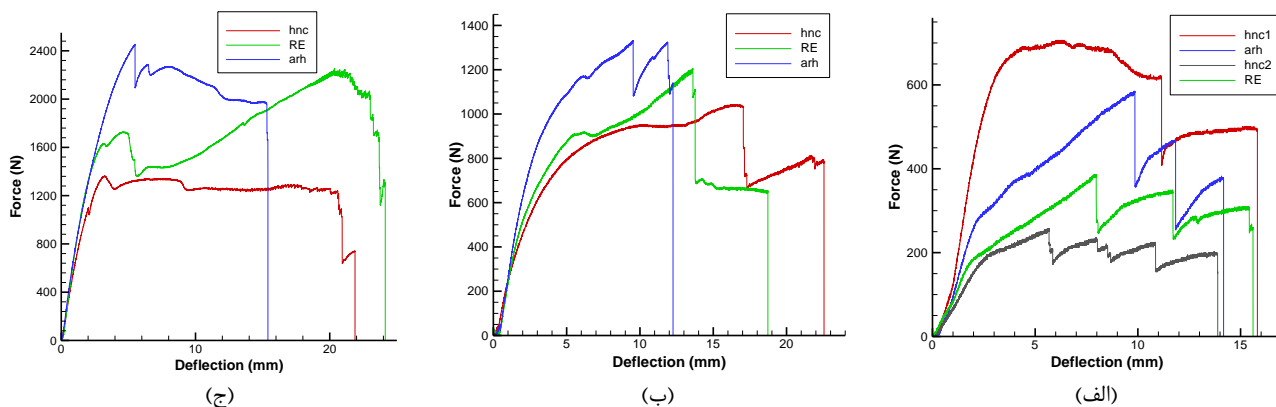
برای محاسبه مقدار تنش رویه‌ها و برش در هسته ساندویچ پنل، از روابط استاندارد ASTM C393-00 استفاده شده است. به منظور محاسبه تنش در رویه‌ها و هسته به ترتیب از رابطه ۱ و ۲ استفاده می‌شود [۲۶]:

$$\tau = \frac{P}{(d+c)b} \quad (1)$$

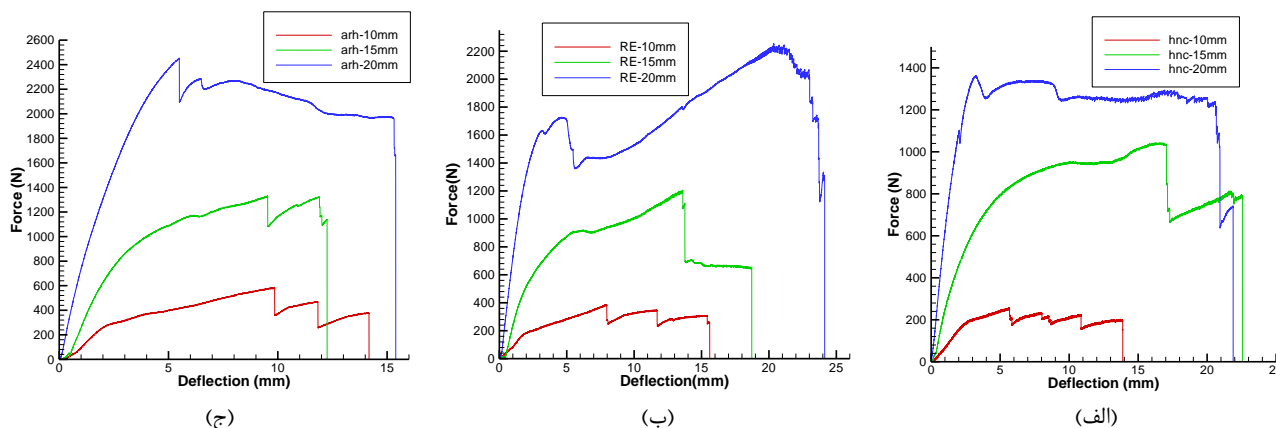
$$\sigma = \frac{PL}{4t(d+c)b} \quad (2)$$

¹ Progressive Collapse

که در این روابط σ تنش در رویه، t ضخامت رویه، L طول دهانه سازه، τ تنش برشی هسته، d ضخامت ساندویچ پنل، P نیروی سنبه، C ضخامت هسته و b پهنا (عرض) سازه است. در جدول ۴ مقادیر تنش در رویه‌ها، برش در هسته و همچنین جابجایی در محل بیشینه تنش ارائه شده است.



شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی ساندویچ پنل‌های با هسته (الف) ۱۰ میلی‌متری، (ب) ۱۵ میلی‌متری، (ج) ۲۰ میلی‌متری



شکل ۸ نمودار مقایسه‌ای ساندویچ پنل‌های با هسته (الف) لانه زنبوری، (ب) ری‌اینترت و (ج) سرنیزه‌ای

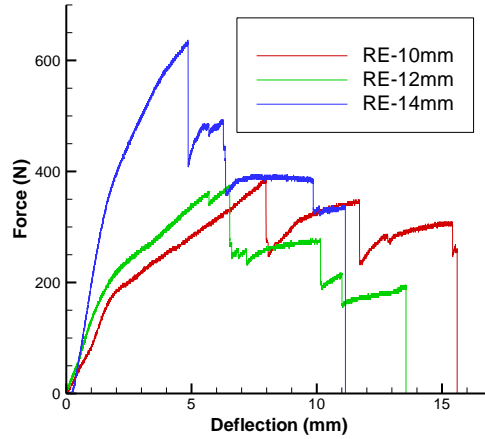
جدول ۴ مقادیر تنش در رویه‌ها، برش در هسته و همچنین جابجایی در محل بیشینه تنش

نمونه	لانه زنبوری	لانه زنبوری	لانه زنبوری	ری‌اینترت	ری‌اینترت	ری‌اینترت	سرنیزه‌ای	سرنیزه‌ای	سرنیزه‌ای
σ (MPa)	۸/۲۹۳	۱۲/۹۱۹	۱۹/۱۹۲	۲۳/۳۶۹	۲۸/۱۲۵	۳۰/۴۵۶	۲۳/۰۲۰	۴۰/۳۴۱	۴۳/۰۶۶
τ (MPa)	۰/۲۰۷	۰/۳۲۳	۰/۴۷۹	۰/۵۸۴	۰/۷۰۳	۰/۷۶۱	۰/۵۷۵	۱/۰۰۸	۱/۰۷۶
δ (mm)	۵/۶۷۴	۷/۹۶۴	۹/۸۵۲	۱۶/۸۸۰	۱۳/۶۰۰	۹/۵۲۹	۳/۲۸۷	۲۰/۳۵۷	۵/۴۹۰

در تحلیل دیگری، سازه‌های با هسته ری‌اینترت با وزن یکسان و ابعاد سلولی متفاوت، مورد آزمون خمش و سپس مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۹ نمودارهای به‌دست آمده از این آزمون ارائه شده است. در جدول ۵ مقادیر تنش در رویه‌ها، برش در هسته‌ها و همچنین جابجایی در محل بیشینه تنش در ساندویچ پنل‌های با هسته ری‌اینترت ارائه شده است.

آزمون خمش نشان داد که نمونه‌های با ابعاد سلولی ۱۰ و ۱۲ میلی‌متری تفاوت استحکام قابل توجهی ندارند، که به دلیل نرم‌تر بودن ورق بالسا در نمونه ۱۲ میلی‌متری است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که در وزن ثابت، افزایش ابعاد سلولی هسته (طول اضلاع و ارتفاع) و کاهش چگالی هسته، موجب افزایش استحکام سازه می‌شود. در ادامه رفتار سازه‌ها تا نقطه شکست مورد بررسی قرار گرفته

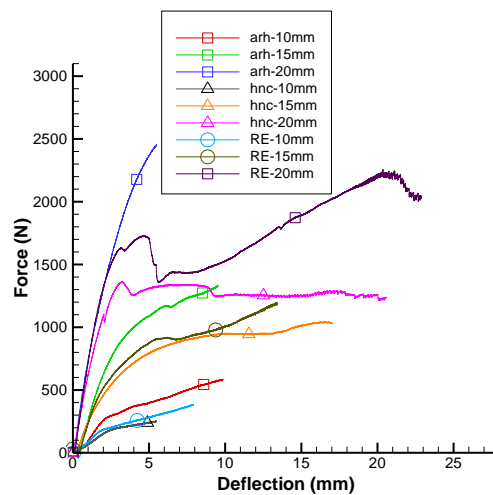
است. برای مقایسه و درک بهتر رفتار و خواص سازه‌ها، منحنی‌های تنش- کرنش آن‌ها تا نقطه شکست در یک نمودار تجمیع شده و در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌اند. این نمونه‌ها شامل سه هندسه مختلف با سه ضخامت متفاوت هستند. نمونه‌های با هسته سرنیزه‌ای، لانه زنبوری و ری‌اینترت هر یک با ضخامت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در نمودار مشخص شده است.



شکل ۹ نمودار مقایسه‌ای ساندویچ پنل‌های با هسته ری‌اینترت و ابعاد سلولی هسته متفاوت

جدول ۵ مقادیر تنش در رویه‌ها، برش در هسته و همچنین جابجایی در محل بیشینه تنش نمونه‌های ری‌اینترت

ضخامت جداره هسته	σ (MPa)	τ (MPa)	δ (mm)
۱۰	۱۲/۹۱۹	۰/۳۲۳	۷/۹۶
۱۲	۱۰/۶۸۹	۰/۲۶۷	۶/۵۰
۱۴	۱۷/۱۰۷	۰/۴۲۷	۴/۸۵



شکل ۱۰ نمودار نیرو- جابجایی ساندویچ پنل‌ها (تا نقطه شکست)

از آزمون‌های کشش و خمش و همچنین اطلاعات قابل استخراج از نتایج این آزمون‌ها مانند مدول الاستیسیته، تنش‌ها (نرمال و برشی)، میزان تغییر شکل، انرژی جذب شده بر واحد وزن و ظرفیت جذب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقدار انرژی جذب شده همان سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی است و با رابطه ۳ محاسبه می‌شود، همچنین، رابطه ۴ برای محاسبه انرژی جذب شده بر واحد وزن استفاده می‌شود [۲۶].

$$E_a = \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (3)$$

$$SEA = \frac{E_a}{W_m} \quad (4)$$

در جدول ۶ مقادیر انرژی‌ها تا نقطه شکست، برای سازه‌های ری‌اینترنت ارائه شده است. همچنین در جدول ۷، مقایسه انرژی جذب شده برای سازه‌های مختلف آمده است.

جدول ۶ مقادیر انرژی جذب شده بر واحد وزن و ظرفیت جذب انرژی پنل‌های ری‌اینترنت با ضخامت دیواره سلول متفاوت

ساندویچ پنل	ظرفیت جذب انرژی تا نقطه شکست (kJ)	انرژی جذب شده بر واحد وزن تا نقطه شکست (kJ/kg)	ظرفیت جذب انرژی تا جابه‌جایی ۵ میلی‌متر (kJ)	انرژی جذب شده بر واحد وزن تا جابه‌جایی ۵ میلی‌متر (kJ/kg)
ری‌اینترنت ۱۰ میلی‌متری	۳/۶۲	۸۱/۶۹	۰/۷۵۶	۱۷/۰۶
ری‌اینترنت ۱۲ میلی‌متری	۱/۶۱	۳۶/۳۴	۱/۰۷۵	۲۴/۲۶
ری‌اینترنت ۱۴ میلی‌متری	۱/۹۰	۴۲/۸۹	۱/۹۰۰	۴۲/۸۹

جدول ۷ مقادیر انرژی جذب شده بر واحد وزن و ظرفیت جذب انرژی

ساندویچ پنل	لانه زنبوری ری‌اینترنت ۱۰ م م	سرنیزه‌ای لانه زنبوری ۱۰ م م	لانه زنبوری ری‌اینترنت ۱۵ م م	سرنیزه‌ای لانه زنبوری ۱۵ م م	لانه زنبوری ری‌اینترنت ۲۰ م م	سرنیزه‌ای لانه زنبوری ۲۰ م م
ظرفیت جذب انرژی (kJ)	۰/۷۵۶	۰/۸۸۶	۲/۶۱۵	۲/۴۲۳	۳/۲۷۴	۴/۲۰۹
انرژی جذب شده بر واحد وزن (kJ/kg)	۲۷/۳۸	۱۹/۹۸	۳۹/۸	۶۰/۵	۳۹/۳	۶۹/۲۹

بر اساس مقادیر جدول ۶ و ۷، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش ابعاد سلولی هسته و کاهش چگالی آن، ظرفیت جذب انرژی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این موضوع به‌ویژه در نمونه‌های با هسته ری‌اینترنت و سرنیزه‌ای با ضخامت‌های مختلف مشهود است، جایی که ظرفیت جذب انرژی در نمونه‌های با ابعاد بزرگ‌تر و چگالی کمتر بیشتر شده است. همچنین، استفاده از هندسه‌های آگرتیک (ری‌اینترنت و سرنیزه‌ای) نسبت به ساختارهای غیر آگرتیک (لانه زنبوری) عملکرد بهتری در جذب انرژی نشان داده است. این یافته‌ها نشان‌دهنده برتری سازه‌های آگرتیک در کاربردهایی است که نیاز به جذب انرژی بالا دارند. ظرفیت جذب انرژی بالاتر سازه‌های آگرتیک در مقایسه با سازه لانه زنبوری، در پژوهش‌های دیگری همچون مطالعه نجفی و همکاران [۱۳]، نیز گزارش شده است. از طرفی، نتایج ارائه‌شده در جداول ۵ تا ۷ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت هسته یا دیواره سلول، لزوماً منجر به بهبود خطی یا یکنواخت در خواص مکانیکی نمی‌شود. به عنوان مثال، در جدول ۵، اگرچه تنش برشی و تنش نرمال در ضخامت‌های بالاتر (۱۲ و ۱۴ میلی‌متر) نسبت به ضخامت ۱۰ میلی‌متر افزایش یافته‌اند، اما مقدار جابجایی نیز تغییرات نامنظمی نشان می‌دهد که بیانگر رفتار پیچیده ماده در برابر بارگذاری است. در جدول ۶ نیز ظرفیت جذب انرژی تا نقطه شکست و تا جابجایی ۵ میلی‌متر تفاوت محسوسی ندارد، به‌ویژه برای ضخامت‌های ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر، که به‌رغم افزایش ضخامت، مقدار انرژی جذب‌شده تنها اندکی تغییر کرده است. جدول ۷ نیز همین روند را تأیید می‌کند؛ جایی که تغییرات ظرفیت جذب انرژی و انرژی جذب‌شده بر واحد وزن در برخی موارد (مانند لانه زنبوری ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر) بسیار محدود یا حتی کاهشی بوده است. این رفتار غیرمنظم را می‌توان تا حد زیادی به ویژگی‌های ذاتی چوب بالسا نسبت داد، چوب به‌عنوان یک ماده طبیعی دارای ناهمگنی در ساختار داخلی است که می‌تواند از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر در یک ورق، خواص مکانیکی متفاوتی از خود نشان دهد. این موضوع باعث می‌شود که تغییر ضخامت یا هندسه، لزوماً منجر به یک روند مشخص و قابل پیش‌بینی در بهبود عملکرد مکانیکی نشود.

۴- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، توسعه هندسه‌های آگرتیک بهبود چشمگیری در خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌ها، از جمله افزایش سفتی و استحکام، ایجاد کرده است. با این حال، بسیاری از این سازه‌ها دارای هسته‌هایی از مواد نفتی یا معدنی هستند که اثرات نامطلوبی بر محیط زیست دارند. در این پژوهش، با هدف ارائه راهکاری پایدار، ساندویچ پنبلی با هسته آگرتیک زیست‌تخریب‌پذیر از جنس پلی‌لاکتیک اسید (PLA) و رویه‌های چوب بالسا طراحی و بررسی شده است. برای مقایسه عملکرد سازه‌های آگرتیک و غیرآگرتیک، سه هندسه شامل دو نوع هسته آگرتیک (ری‌اینترنت و سرنیزه‌ای) و یک هسته غیرآگرتیک (لانه‌زنبوری) بررسی شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که هندسه آگرتیک، به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد مکانیکی خود، نسبت به هسته‌های غیرآگرتیک، استحکام و ظرفیت جذب انرژی بیشتری دارد. این یافته‌ها تأیید می‌کنند که سازه‌های آگرتیک، به دلیل رفتار الاستیک و قابلیت توزیع بار، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای مهندسی مانند سازه‌های مقاوم در برابر ضربه و جاذب انرژی هستند. علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی، بهره‌گیری از مواد زیست‌تخریب‌پذیر همچون PLA در هسته‌ها و چوب بالسا در رویه‌ها، به کاهش اثرات زیست‌محیطی این سازه‌ها و کاهش وزن کلی آن‌ها کمک کرده است. بررسی نتایج آزمون‌های کشش و خمش نشان می‌دهد که سختی ورق بالسا تأثیر مستقیمی بر استحکام نهایی سازه دارد و استفاده از ورق‌های سخت‌تر، عملکرد مکانیکی مطلوب‌تری به همراه دارد. همچنین، با استفاده از روش چاپ سه‌بعدی، امکان تولید آسان انواع هندسه‌های لایه میانی فراهم شده و اتصال چسبی موجب بهبود فرایند ساخت ساندویچ پنل‌ها شده است. ارزیابی خواص مکانیکی این سازه با آزمون‌های خمش چهارنقطه‌ای و کشش تأیید می‌کند که هسته‌های آگرتیک، نسبت به هسته‌های لانه‌زنبوری، عملکرد بهتری در استحکام و جذب انرژی دارند.

References

- [1] Tsai SN, Tsai SL. Flexure-after-impact behaviors of green composite sandwich beams with natural fiber facesheets and balsa cores. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2025 Jan;27(1):51-70. doi: 10.1177/10996362241287416
- [2] Grima JN, Oliveri L, Attard D, Ellul B, Gatt R, Cicala G, Recca G. Hexagonal honeycombs with zero Poisson's ratios and enhanced stiffness. *Advanced Engineering Materials*. 2010 Sep;12(9):855-62. doi: 10.1002/adem.201000140
- [3] Wadley HN, Dharmasena KP, O'Masta MR, Wetzel JJ. Impact response of aluminum corrugated core sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*. 2013 Dec 1;62:114-28. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.06.005
- [4] Bianchi M, Scarpa FL, Smith CW. Stiffness and energy dissipation in polyurethane auxetic foams. *Journal of Materials Science*. 2008 Sep;43(17):5851-60. doi: 10.1007/s10853-008-2841-5
- [5] Gibson IJ, Ashby MF. The mechanics of three-dimensional cellular materials. *Proceedings of the royal society of London. A. Mathematical and physical sciences*. 1982 Jul 8;382(1782):43-59. doi: 10.1098/rspa.1982.0088
- [6] Mir M, Ali MN, Sami J, Ansari U. Review of mechanics and applications of auxetic structures. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014;2014(1):753496. doi: 10.1155/2014/753496
- [7] Evans KE, Alderson A. Auxetic materials: functional materials and structures from lateral thinking!. *Advanced materials*. 2000 May;12(9):617-28. doi: 10.1002/(SICI)1521-4095(200005)12:9<617::AID-ADMA617>3.0.CO;2-3
- [8] Xiao D, Dong Z, Li Y, Wu W, Fang D. Compression behavior of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: experiment and finite element analysis. *Materials Science and Engineering: A*. 2019 Jun 5;758:163-71. doi: 10.1016/j.msea.2019.04.116
- [9] Ingrole A, Hao A, Liang R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Materials & Design*. 2017 Mar 5;117:72-83. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.067
- [10] Shahrjerdi A. Experimental Study of Mechanical Properties on the Sandwich Panel with Auxetic Foam Core and Carbon Fiber. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 Feb 10;20(3):587-98. [In Persian]
- [11] Shokri Rad M, Hatami H, Alipouri R, Farokhi Nejad A, Omidinasab F. Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures. *Mechanics & Industry*. 2019;20(3):302. doi: 10.1051/meca/2019019
- [12] Alomarah A, Masood SH, Ruan D. Out-of-plane and in-plane compression of additively manufactured auxetic structures. *Aerospace science and technology*. 2020 Nov 1;106:106107. doi: 10.1016/j.ast.2020.106107
- [13] Najafi M, Ahmadi H, Liaghat GH. Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption in Auxetic Structures under Quasi-static Loading. *Modares mechanical engineering*. 2020 Feb 1;20(2):415-24. doi: 10.1001.1.10275940.1398.20.2.19.8 [In Persian]

- [14] Habib FN, Iovenitti P, Masood SH, Nikzad M. Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology. *Materials & Design*. 2018 Oct 5;155:86-98. doi: [10.1016/j.matdes.2018.05.059](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.059)
- [15] Li T, Wang L. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Composite Structures*. 2017 Sep 1;175:46-57. doi: [10.1016/j.compstruct.2017.05.001](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.001)
- [16] Mousavi SA, Shokrollahi H, Sabouri H. Flexural behavior assessment of an eco-friendly thermoplastic composite sandwich panel with recyclable core and faces. *Journal of Solid Mechanics*. 2024 Nov 30;16(4):449-66. doi: [10.60664/jsm.2024.1130323](https://doi.org/10.60664/jsm.2024.1130323)
- [17] Peliński K, Smardzewski J. Bending behavior of lightweight wood-based sandwich beams with auxetic cellular core. *Polymers*. 2020 Jul 31;12(8):1723. doi: [10.3390/polym12081723](https://doi.org/10.3390/polym12081723)
- [18] Sarvestani HY, Akbarzadeh AH, Niknam H, Hermenean K. 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. *Composite Structures*. 2018 Sep 15;200:886-909. doi: [10.1016/j.compstruct.2018.04.002](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.002)
- [19] Box F, Johnson CG, Pihler-Puzović D. Hard auxetic metamaterials. *Extreme Mechanics Letters*. 2020 Oct 1;40:100980. doi: [10.1016/j.eml.2020.100980](https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100980)
- [20] Dong Z, Li Y, Zhao T, Wu W, Xiao D, Liang J. Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb. *Materials & Design*. 2019 Nov 15;182:108036. doi: [10.1016/j.matdes.2019.108036](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108036)
- [21] Fujita K, He J. A preliminary design study of honeycomb sandwich construction for space utilization. In: 12th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference; 2008 Sep 10-12; Victoria, BC, Canada. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2008. p. 5982. doi: [10.2514/6.2008-5982](https://doi.org/10.2514/6.2008-5982)
- [22] Rezaayat HR, Toozandehjani H, Zakeri A. Investigating the energy absorption of sandwich panel with aluminum core and skin under Quasi-static loading: A numerical and experimental study. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024;11(1):61-75. doi: [10.22034/ijme.2024.434159.1900](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.434159.1900) [In Persian]
- [23] Hasanzadeh R. Designing and manufacturing a novel polymeric hybrid auxetic structure using 3D printing method by combining arrow-head and missing rib structures. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Jan 20;11(11):67-76. doi: [10.22034/ijme.2024.487862.2025](https://doi.org/10.22034/ijme.2024.487862.2025) [In Persian]
- [24] Smardzewski J, Wojciechowski KW. Auxetic effect of irregularly corrugated cores of wood-based cosinecomb panels. *Thin-Walled Structures*. 2025 May 1;210:112989. doi: [10.1016/j.tws.2025.112989](https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.112989)
- [25] Park EB, Jeong YC, Kang K. A novel auxetic sandwich panel for use in structural applications: Fabrication and parametric study. *Materials Today Communications*. 2023 Mar 1;34:105383. doi: [10.1016/j.mtcomm.2023.105383](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105383)
- [26] Astm C. 393, Standard Test. Method for flexural properties of sandwich constructions. *American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards*: West Conshohocken, PA, USA. 2000;30:32.