



## بررسی استحکام خمشی و رفتار ضربه سرعت پایین سازه‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی بازالت/اپوکسی و هسته چوب‌پنبه

هادی رزقی ملکی<sup>1\*</sup>، پویا پرونده<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران  
 \* بناب، صندوق پستی 55513-95133، [hrezghimaleki@ubonab.ac.ir](mailto:hrezghimaleki@ubonab.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله:
سازه‌های کامپوزیتی ساندویچی به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تحقیق به بررسی عملکرد سازه‌های ساندویچی با رویه بازالت/اپوکسی و هسته چوب‌پنبه در برابر بارهای خمشی و ضربه سرعت پایین پرداخته است. هدف اصلی تحقیق، تحلیل رفتار خمشی و ضربه‌ای این سازه‌ها و ارزیابی اثر ترکیب رویه مصنوعی و هسته طبیعی در ساختار ساندویچی است. الیاف بازالت به‌عنوان تقویت‌کننده رویه و ورق چوب‌پنبه به‌عنوان هسته برای ساخت نمونه‌ها استفاده شدند. نمونه‌ها با روش لایه‌چینی دستی تهیه شده و پس از لایه‌چینی، نمونه‌ها تحت فشار و دمای مشخصی آماده شدند. از آزمون‌های خمش سه‌نقطه‌ای و سقوط آزاد برای بررسی رفتار خمشی و ضربه سرعت پایین سازه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که سازه‌ها در مراحل اولیه مقاومت بالایی در برابر بارهای خمشی دارند اما با افزایش بار، آسیب‌های غیر قابل برگشتی مانند ترک‌ها و تغییر شکل‌های دائمی مشاهده شد. در آزمون ضربه، رفتار سازه‌ها تحت سطوح مختلف انرژی ضربه‌ای بررسی گردید. در سطح انرژی پایین، سازه‌ها مقدار زیادی از انرژی ضربه را جذب و مقداری از آن را به‌صورت انرژی الاستیک برگشت داد؛ اما با افزایش انرژی ضربه، تمام انرژی جذب و آسیب‌هایی مانند فرورفتگی، شکست الیاف و جدا شدن رویه از هسته اتفاق افتاد. نتایج نشان داد که ترکیب بازالت با چوب‌پنبه باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی و رفتار قابل قبول مقاومت به ضربه و خمشی می‌شود.	دریافت: 1403/12/24 پذیرش: 1404/02/22
	<b>کلیدواژگان</b> سازه ساندویچی، چوب‌پنبه، بازالت، ضربه سرعت پایین، خمش سه نقطه

## Study of the Flexural Strength and Low-Velocity Impact Behavior of Sandwich Structures with Basalt/Epoxy Face Sheets and a Cork Core

Hadi Rezghi Maleki<sup>1\*</sup>, Pooya Parvande<sup>2</sup>

1- Faculty of Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 55513-95133, [hrezghimaleki@ubonab.ac.ir](mailto:hrezghimaleki@ubonab.ac.ir)

### Keywords

Sandwich Structure,  
 Cork,  
 Basalt,  
 Low-Velocity Impact,  
 Three-Point Bending

### Abstract

Sandwich composite structures are widely used across various industries. This study investigates the performance of sandwich structures with basalt/epoxy face sheets and a cork core under flexural and low-velocity impact loading. The primary objective of the research is to analyze the flexural and impact behavior of these structures and to evaluate the effect of combining a synthetic face sheet with a natural core in a sandwich configuration. Basalt fibers were used as reinforcement in the face sheets, and the cork sheet served as the core material for specimen fabrication. The samples were prepared using the hand lay-up method and were cured under specific pressure and temperature conditions. Three-point bending and drop weight impact tests were conducted to evaluate the structures' flexural and low-velocity impact behavior. The results showed that the structures exhibited high resistance to flexural loads at early stages; however, irreversible damages such as cracks and permanent deformations were observed as the load increased. The impact test examined the structural behavior under various impact energy levels. The structures absorbed much of the impact energy at low energy level and returned some of it elastically. However, as the impact energy increased, all the energy was absorbed, leading to damage such as indentation, fiber failure, and face sheet/core debonding. The findings indicate that combining basalt with a cork enhances the mechanical properties and provides acceptable impact and flexural resistance performance.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Rezghi Maleki, H., Parvande, P., "Study of the Flexural Strength and Low-Velocity Impact Behavior of Sandwich Structures with Basalt/Epoxy Face Sheets and a Cork Core," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 4, pp. 2634-2644, 2025.  
<https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2055945.1917>

## 1- مقدمه

استفاده از سازه‌های سبک وزن برای کاهش هزینه‌های تولید، همیشه مورد توجه مهندسان طراح بوده است [1, 2]. سازه‌های ساندویچی، نمونه‌ای از سازه‌های سبک وزن هستند که کارایی بالای آن‌ها باعث گسترش و استفاده بیشتر از آن‌ها در بخش‌های مختلف شده است [3-6]. ساندویچ پانل‌ها ساختاری متشکل از دو لایه بیرونی نازک و محکم به نام رویه یا پوسته هستند که به یک هسته داخلی سبک وزن و ضخیم متصل می‌شوند. این رویه‌ها معمولاً از مواد کامپوزیتی ساخته می‌شوند در حالی که هسته‌ها اغلب از فوم یا ساختارهای شبکه‌ای در ابعاد و شکل‌های مختلف هستند که از مواد مختلف ساخته می‌شوند [7]. ساندویچ پانل‌ها به دلیل مقاومت به وزن عالی، دوام بالا و خواص عایق‌بندی مناسب در صنایع مختلفی مانند هوافضا، دریایی، خودروسازی، عمرانی و حمل و نقل به‌طور گسترده استفاده می‌شوند [8-12]. سازه‌های مهندسی در زمان استفاده تحت بارهای متنوعی قرار می‌گیرند. در این میان، سازه‌های ساندویچی استفاده شده در صنایع مختلف در معرض آسیب‌های ناشی از بارهای ضربه‌ای قرار دارند [13,14]. این آسیب‌ها ممکن است به دلیل سقوط ابزار در حین عملیات تعمیر و نگهداری، برخورد پرندگان در طول پرواز و سایر عوامل به وجود بیایند. ضربات سرعت پایین می‌توانند باعث آسیب‌های قابل توجهی شوند که منجر به کاهش استحکام سازه می‌گردند. این نوع آسیب‌ها ممکن است در بازرسی‌های بصری قابل مشاهده نباشند [15-17].

نوع و جنس رویه و هسته از عوامل مهم در دستیابی به ویژگی‌های مناسب برای ساختارهای ساندویچی هستند. انواع اصلی هسته‌های ساندویچی شامل انواع فوم‌ها، ساختارهای شبکه‌ای، بالسا، چوب پنبه و غیره می‌شوند [18-24]. مشکلات متعددی در زمینه سازه‌های ساندویچی وجود دارند که یکی از اصلی‌ترین آن‌ها مربوط به مواد مصنوعی است که برای تولید این نوع سازه‌ها استفاده می‌شود. پلی‌وینیل کلراید<sup>۱</sup>، پلی‌اورتان<sup>۲</sup>، پلی‌استایرن<sup>۳</sup> و پلی‌آمید<sup>۴</sup> فوم‌های سنتی هستند که به عنوان مواد اصلی هسته استفاده می‌شوند در حالی که طبق داده‌های ارائه شده در سال 2019 توسط AVK<sup>5</sup>، این مواد بخش عمده‌ای از تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت‌های پلیمری را تشکیل می‌دهند [25]. با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با آلودگی‌ها و مشکلات دفع زباله‌ها، بسیاری از کشورها مقررات خاصی برای کاهش آلودگی وضع کرده‌اند. یکی از راه‌های مقابله با این مشکلات، جایگزینی مواد مصنوعی با مواد طبیعی است که بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر را افزایش داده و رد پای کربن را کاهش می‌دهد. در این زمینه، چوب پنبه متراکم یا چوب پنبه با ذرات چسبیده به هم به‌عنوان یک جایگزین زیست‌سازگار به جای فوم‌های پلیمری رایج شناخته شده است [26,27]. مشکل اساسی دیگری که سازه‌های ساندویچی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و از گسترش آن‌ها در برخی از زمینه‌های صنعتی جلوگیری می‌کند حساسیت زیاد به آسیب ضربه است که می‌تواند به شدت بر یکپارچگی سازه کامپوزیتی تأثیر بگذارد و باعث کاهش قابل توجه قابلیت تحمل بار سازه شود [28]. لذا لازم است در این خصوص نیز مطالعات، بررسی‌ها و تمهیداتی انجام گیرد.

چوب پنبه محصول پوست درخت بلوط چوب پنبه‌ای<sup>۶</sup> است که عمدتاً در کشورهای غربی مدیترانه‌ای مانند پرتغال، اسپانیا، ایتالیا و شمال آفریقا رشد می‌کند [29-31]. صفحات چوب پنبه از دانه‌های چوب پنبه ساخته می‌شوند

که بر اساس اندازه آن‌ها انتخاب شده و از طریق یک چسب پلیمری مثل پلی‌اورتان به هم متصل می‌شوند [30]. هسته چوب پنبه‌ای، به‌ویژه در فرم متراکم آن به‌عنوان یک جایگزین برای فوم‌های مصنوعی در ساختارهای ساندویچی مورد توجه قرار گرفته است [32]. این ماده مزایای زیادی از جمله تجزیه‌پذیری زیستی، چگالی کم و ویژگی‌های مکانیکی خوب دارد. با این حال، چالش اصلی در استفاده از چوب پنبه، سازگاری بین دانه‌های چوب پنبه و چسب پلیمری است که می‌تواند تحت شرایط خاصی منجر به شکست زودهنگام ساختار شود. مطالعات نشان داده‌اند که چوب پنبه متراکم به‌عنوان هسته در مقایسه با هسته‌های مصنوعی سنتی مانند فوم‌های پلی‌وینیل کلراید مقاومت ضربه‌ای کمتری دارد [31,33].

الیاف بازالت یکی از الیاف تقویت‌کننده در مواد کامپوزیتی بوده و منبع اصلی آن سنگ‌های آتشفشانی می‌باشد. ویژگی‌های مکانیکی الیاف بازالت نزدیک به الیاف شیشه بوده و در برخی موارد، الیاف بازالت خواص بهتری دارد و فرایند تولید آن مشابه تولید الیاف شیشه است [34]. استفاده از الیاف بازالت مزایایی از جمله کاهش مصرف انرژی و مواد شیمیایی در فرایند تولید، کاهش خطرات برای سلامت انسان و بازیافت آسان الیاف در پایان چرخه زندگی کامپوزیت‌ها دارد. به دلیل دمای ذوب بالاتر، الیاف بازالت می‌توانند با تجزیه کردن ماتریس پلیمری بازیابی شوند و از طریق عملیات شیمیایی سطحی، بخشی از ویژگی‌های مکانیکی خود را بازگردانند [34-36]. حتی بازیافت‌پذیری الیاف بازالت برای کامپوزیت‌های ترموپلاستیک رشته‌ای خرد شده نیز بالاتر است. در واقع، در نتیجه فرآیند بازیافت، الیاف بازالت کاهش طول بسیار کمتری نسبت به الیاف شیشه دارند که باعث می‌شود ویژگی‌های مکانیکی قطعه بازیافتی بالاتر باشد [37]. بازالت به‌عنوان یک جایگزین عالی برای شیشه در تولید کامپوزیت‌های زیست‌سازگار تر شناخته شده است اما هنگامی که با الیاف گیاهی مقایسه می‌شود هنوز مشکلاتی مانند عدم تجزیه‌پذیری دارد و چگالی آن در مقایسه با سایر الیاف بالا بوده که باعث می‌شود وزن کلی کامپوزیت تقویت شده با این الیاف نسبتاً بیشتر باشد.

پژوهش‌های مختلفی در خصوص رفتار ضربه سرعت پایین انواع سازه‌های کامپوزیتی صورت گرفته ولی درباره رفتار ضربه‌ای سازه‌های بازالت/چوب پنبه مطالعاتی انجام نیافته است. گومز و همکاران [38] رفتار ضربه‌ای پانل‌های ساندویچی با هسته‌های چوب پنبه متراکم و فوم پلی اتیلن ترفتالات<sup>۷</sup> و پوسته‌های تقویت شده با الیاف کربن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که هسته فوم پلی اتیلن ترفتالات نسبت به چوب پنبه متراکم انرژی بیشتری جذب می‌کند. آسیب‌های پس از ضربه نشان داد که لایه لایه شدن و شکست پوسته‌ها در سرعت‌های مختلف، تأثیر زیادی بر عملکرد سازه دارند. همچنین، پانل‌ها با هسته چوب پنبه نسبت به فوم پلی اتیلن ترفتالات عملکرد بهتری در جلوگیری از لایه لایه شدن نشان دادند و لایه لایه شدن پوسته پایینی تحت تأثیر سرعت ضربه و نفوذ پوسته جلویی بود. در پژوهشی دیگر گومز و همکاران [39] به تحلیل رفتار ساختار ساندویچی با هسته چوب پنبه متراکم تحت بار ضربه‌ای با سرعت‌های زیرسرعت نفوذ پرداختند. مدل اجزای محدود برای شبیه‌سازی پدیده ضربه استفاده شد و نفوذ پوسته بالایی، هسته و همچنین جابجایی‌های عرضی پانل پیش‌بینی شد. فرآیند ضربه در سه فاز بررسی شد که شامل شکست لایه‌ها، جذب انرژی و تغییر شکل رویه‌ها بود. نتایج نشان داد که انرژی جذب‌شده در ابتدا از طریق شکست و انحراف هسته و رویه بالایی بود و

<sup>5</sup> Allgemeiner Verband der Kunststoffverarbeitenden Industrie e.V

<sup>6</sup> Quercus suber L.

<sup>7</sup> Polyethylene Terephthalate Foam (PET)

<sup>1</sup> Polyvinyl chloride (PVC)

<sup>2</sup> Polyurethane (PU)

<sup>3</sup> Polystyrene (PS)

<sup>4</sup> Polyamide (PA)

سازه‌های ساندویچی با هسته چوب پنبه و رویه بازالت/اپوکسی تحت بارهای خمشی و ضربه سرعت پایین هدف اصلی این تحقیق است. در این مطالعه، سازه‌های ساندویچی تحت آزمون‌های خمشی و ضربه سرعت پایین با انرژی‌های ضربه مختلف ارزیابی می‌شوند. تأثیر ترکیب مواد طبیعی و مصنوعی در ساختار ساندویچی و واکنش آن‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از بارهای ضربه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نمودار نیرو - جابه‌جایی در آزمون خمش و نمودارهای نیرو - زمان، نیرو - جابه‌جایی، انرژی - زمان و نحوه شکست نمونه‌ها در آزمون ضربه مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

## 2- مواد اولیه

از الیاف بازالت به صورت تک‌جهته با دانسیته سطحی 300 گرم بر متر مربع برای تهیه نمونه‌ها استفاده شد. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این الیاف در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مشخصات الیاف بازالت

Table 1 Specifications of basalt fiber

نوع الیاف	چگالی الیاف (g/cm <sup>3</sup> )	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)
بازالت تک‌جهته	2.68	2200	90

رزین اپوکسی EPL1012 به همراه هاردنر EPH112 با نسبت ترکیب 100:15 به عنوان زمینه برای ساخت رویه‌های کامپوزیتی استفاده شد. مشخصات مکانیکی این رزین در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی رزین EPL1012

Table 2 Mechanical characteristics of EPL1012 resin

نوع رزین	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	مقاومت مدول (MPa)	مدول خمشی (GPa)
EPL1012	75	2.7	95	3.6

از چوب پنبه متراکم به عنوان هسته استفاده شد. در جدول 3 خواص فیزیکی و مکانیکی چوب پنبه متراکم مدل EP.CR.119.2-CR-216 LW ارائه شده است. ضخامت چوب پنبه استفاده شده 5 میلی‌متر بود.

جدول 3 مشخصات چوب پنبه

Table 3 Specifications of agglomerated cork

نوع هسته	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	مقاومت کششی (kPa)	فشرده‌گی (%)	بازیابی (%)
چوب پنبه	190-230	≥ 200	20-40	≤ 75

## 3- ساخت نمونه

رویه‌های کامپوزیتی نمونه ساندویچی با چینش 4 لایه به صورت متقاطع تک‌جهته (0/90 درجه) ساخته شدند که در شکل 1 شماتیک لایه‌چینی نشان داده شده است. فرآیند تولید رویه‌های کامپوزیتی به روش لایه‌چینی دستی انجام شد. در این روش، لایه‌های الیاف به صورت دستی بر روی سطح هسته قرار گرفتند و سپس هر لایه با رزین اپوکسی مناسب آغشته‌سازی شد. پس از اتمام لایه‌چینی، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در دمای محیط داخل دستگاه پرس با میزان فشار لازم قرار گرفتند تا اطمینان حاصل شود که رویه‌ها با هسته اتصال مناسبی برقرار کرده‌اند. برای تکمیل فرآیند ساخت، نمونه‌ها به مدت 6 ساعت در دمای 60 درجه سلسیوس داخل کوره حرارتی قرار گرفتند تا رزین

در فازهای بعدی با افزایش آسیب‌های مربوط به چسبندگی و تغییر شکل پلاستیکی، فرآیند جذب انرژی ادامه یافت.

ملک‌زاده و همکاران [40] یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی ورق‌های ساندویچی با صفحات فوقانی و تحتانی از جنس الیاف فلزی تحت بار ضربه‌ای سرعت پایین ارائه دادند. نتایج تحقیق نشان داد که در این سازه‌ها، افزایش مقاومت به ضربه مستقل از سرعت و جرم ضربه‌زننده است. علاوه بر این، کاهش ضخامت صفحات در سازه‌های ساندویچی باعث می‌شود که منحنی تغییرات نیروی برخورد ماکزیمم به‌طور قابل توجهی به حالت خطی نزدیک‌تر شود. سرجی و همکاران [32] در پژوهشی تأثیر دمای عملیاتی بر عملکرد سازه‌های ساندویچی با هسته چوب پنبه متراکم و رویه با الیاف هیبریدی کتان/بازالت را بررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش دما باعث افزایش شکنندگی هسته‌ها می‌شود و چوب پنبه متراکم به دلیل ضعف در سازگاری چسب پلیمری با دانه‌های چوب پنبه، عملکرد کمتری در جذب انرژی دارد. سازه‌های ساندویچی با هسته چوب پنبه و الیاف هیبریدی کتان/بازالت عملکرد بهتری در جذب انرژی ضربه نسبت به فوم‌های پلی‌وینیل کلراید داشتند اما نمونه‌ها با هسته چوب پنبه نسبت به فوم‌های پلی‌وینیل کلراید عملکرد خمشی ضعیف‌تری نشان دادند. در نهایت، سازه‌های ساندویچی با هسته چوب پنبه متراکم گزینه‌ای مناسب برای ساختارهای ساندویچی با مقاومت ضربه‌ای بهتر و سازگاری زیست‌محیطی بالاتر تشخیص داده شدند. قاجار و رصاف [41] اثر شکل ضربه‌زننده بر نیروی برخورد، زمان برخورد، جابه‌جایی، انرژی جذب شده و میزان آسیب به چندلایه‌های کامپوزیتی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضربه‌زننده تحت بیشترین نیروی برخورد و کمترین زمان برخورد را دارد در حالی که ضربه‌زننده مخروطی بیشترین جابه‌جایی و انرژی جذب شده را ایجاد کرد. ضربه‌زننده مخروطی نفوذ بیشتری داشت و بیشترین آسیب را به قطعه وارد کرد در حالی که ضربه‌زننده تخت تنها آسیب‌های سطحی ایجاد کرد. تغییرات دما نیز تأثیراتی بر نیروی برخورد و جابه‌جایی داشت به‌طوری که با افزایش دما، نیروی برخورد کاهش و جابه‌جایی افزایش یافت. تقی پور و همکاران [42] به بررسی تجربی و عددی تأثیر روش‌های مختلف پرکردن هسته‌های موجدار دوزنقه‌ای با فوم پلی اورتان سخت پرداخته و نشان دادند که حضور فوم در ساختار مشبک می‌تواند خواص ضربه‌پذیری را به طور چشمگیری بهبود بخشد. حیدری شاهملکی و زین‌الدینی [43] پنل‌هایی با هسته‌های مختلف از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف پنبه ساختند. پنج الگوی هسته شامل هسته موجی دو طرفه، یک طرفه با بارگذاری عرضی، کمان رو به بالا، کمان رو به پایین و یک طرفه با بارگذاری طولی بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییر الگوی هسته تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی ساندویچ پنل‌ها دارد. پنل‌ها با هسته دو طرفه عملکرد بهتری به‌ویژه در راستای عرضی و طولی کمان رو به بالا در مقایسه با هسته یک طرفه داشتند، همچنین، وابستگی خواص به راستای قرارگیری هسته در نوع موجی یک طرفه وجود داشت که با استفاده از هسته موجی دو طرفه این مشکل رفع می‌شد. معصومی‌اصل و رحیمی [44] رفتار خمشی پنل‌های ساندویچی با هسته‌های ایزوگرید و مربعی تحت بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ساندویچ پنل با هسته ایزوگرید از نظر سفتی خمشی مخصوص و بار بیشینه مخصوص نسبت به هسته مربعی عملکرد بهتری دارد. نتایج تجربی و عددی به ترتیب نشان دادند که ساندویچ پنل با هسته ایزوگرید 12 درصد سفتی بیشتری و 10 درصد بار بیشینه بیشتری نسبت به هسته مربعی دارد.

باتوجه به گسترش کاربرد سازه‌های ساندویچی و وجود خلأ پژوهشی در زمینه سازه‌های ساندویچی با هسته مواد طبیعی و تجزیه‌پذیر، بررسی عملکرد

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_g} \quad (2)$$

همچنین مدول کششی (E) از شیب بخش الاستیک منحنی تنش - کرنش به دست آمد.

#### 2-4- آزمون خمش سه نقطه

آزمون خمش سه نقطه برای نمونه‌های ساندویچی به وسیله استاندارد ASTM D7250 انجام گرفت [46]. این آزمون یکی از روش‌های استاندارد برای اندازه‌گیری رفتار خمشی مواد ساندویچی است. در این آزمون، یک نمونه مستطیلی از جنس مورد نظر بر روی دو پشتیبان قرار می‌گیرد و نیروی خارجی به صورت یکنواخت در وسط نمونه اعمال می‌شود. شکل 3 نمونه ساندویچی تحت بار خمشی سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد. این بارگذاری باعث ایجاد خمیدگی در نمونه شده و نتایج آن برای محاسبه مدول الاستیک خمشی و تحلیل رفتار ماده تحت بارگذاری استفاده می‌شود.

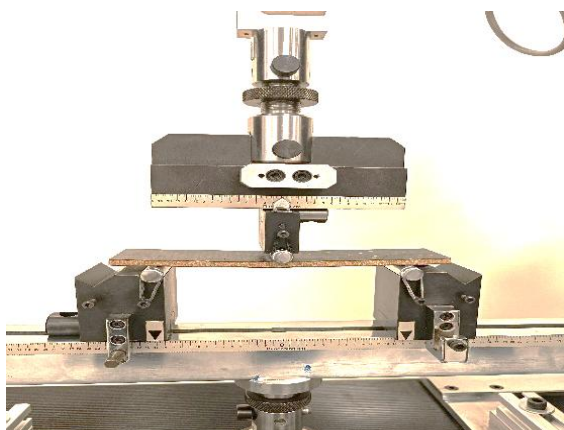


Fig. 3 The sandwich sample under 3-point bending load

شکل 3 نمونه ساندویچی تحت بار خمش 3 نقطه‌ای

برای انجام آزمون، ابتدا نمونه‌ها با ابعاد  $200 \times 50 \times 6.2$  میلی‌متر برش داده شدند. طول نمونه باید به گونه‌ای انتخاب شود که نسبت طول به ضخامت بیشتر از 16 باشد تا شرایط خمشی به درستی شبیه‌سازی شود. در این آزمون، فاصله بین دو تکیه‌گاه برابر با 150 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین ضخامت و عرض نمونه مطابق با استاندارد و هدف آزمایش تعیین شدند. دو پشتیبان مربوط به قسمت پایین در هر دو انتهای نمونه قرار گرفته و نیروی بارگذاری به طور عمودی در وسط نمونه اعمال شد. این نیرو معمولاً با استفاده از یک سیلندر هیدرولیک یا سیستم مکانیکی قابل کنترل اعمال می‌شود. در طی آزمایش، نیروی اعمال شده به نمونه به طور پیوسته افزایش می‌یابد و در هر مرحله، تغییر شکل یا انحراف نمونه در نقطه وسط با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق ثبت می‌شود. میزان تغییر شکل و نیروی اعمال شده در طول آزمون به طور دقیق ثبت می‌شوند تا منحنی نیرو-انحراف به دست آید. سرعت اعمال بار در این آزمون معمولاً برابر با 4 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم می‌شود تا از نرخ کرنش استاندارد اطمینان حاصل شود و نتایج آزمون دقت کافی داشته باشد. پس از انجام آزمون و ثبت داده‌ها، محاسبات لازم برای تعیین تنش خمشی و مدول خمشی انجام شد. تنش، کرنش و مدول خمشی با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند [46]:

اپوکسی به طور کامل پخته شده و خواص مکانیکی نمونه‌ها به طور چشمگیری تقویت شود. کسر حجمی الیاف در رویه‌های بازالت/اپوکسی 54% تعیین شد. نمونه‌ها در ابعاد  $250 \times 250$  میلی‌متر مربع و با ضخامت 6 میلی‌متر تهیه شده و سپس توسط دستگاه برش مطابق استاندارد در اندازه‌های مشخصی بریده شدند.

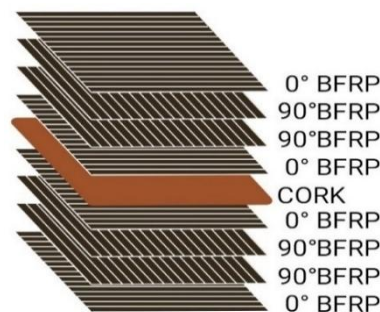


Fig. 1 Schematic of the lay-up of the basalt/cork sandwich structure

شکل 1 شماتیک لایه‌چینی سازه ساندویچی بازالت/چوب پنبه

#### 4- روش‌های آزمون

##### 4-1- آزمون کشش پوسته‌های کامپوزیتی

آزمون کشش برای ارزیابی خواص کششی رویه‌های کامپوزیتی پنل ساندویچی با زمینه پلیمری و تقویت شده با الیاف، بر اساس استاندارد ASTM D3039 انجام شد [45]. این آزمون‌ها بر روی نمونه‌هایی با ابعاد مشخص و در شرایط کنترل شده شامل دما و رطوبت مناسب، اجرا گردید.



Fig. 2 The sandwich sample under tensile load

شکل 2 نمونه ساندویچی تحت بار کششی

جهت انجام آزمون، تعداد پنج عدد نمونه با طول 250 میلی‌متر و عرض 25 میلی‌متر به دقت برش داده شدند. برای جلوگیری از آسیب به نواحی اتصال نمونه و جلوگیری از تمرکز تنش، از تب‌های شیشه/اپوکسی استفاده شد. تب‌ها با چسب مخصوصی به دو انتهای نمونه متصل شده و فشار اعمالی از فک‌های پنوماتیک به طور یکنواخت توزیع شد تا از تأثیر منفی آن بر نتایج جلوگیری شود. در شکل 2، نمایی از نمونه کشش مشاهده می‌شود. آزمون با استفاده از دستگاه آزمون کشش مکانیکی که دارای قابلیت کنترل سرعت بارگذاری و ثبت دقیق داده‌ها است، انجام شد. کرنش نمونه با استفاده از اکستنسومتر با طول مبنای 50 میلی‌متر ثبت شد. آزمون در دمای 23 درجه سانتی‌گراد با انحراف  $\pm 2$  درجه و رطوبت نسبی 50% با انحراف  $\pm 5$  انجام گردید. سرعت بارگذاری برابر با 2 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد تا نرخ کرنش استاندارد حفظ گردد. تنش کششی ( $\sigma$ ) و کرنش کششی ( $\varepsilon$ ) با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند:

### 5- نتایج و بحث

#### 5-1- خواص کششی رویه‌های بازالت/اپوکسی

شکل 5 نمودار تنش-کرنش حاصل از آزمون کشش را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون، استحکام کششی نهایی این کامپوزیت برابر با 485 مگاپاسکال بدست آمد که نشان‌دهنده ظرفیت بالای این ماده در تحمل نیروهای کششی می‌باشد. همچنین، مدول الاستیک رویه 23 گیگاپاسکال به‌دست آمد که حاکی از سفتی بالای رویه کامپوزیتی است. مطابق شکل 5 در بخش الاستیک نمودار تنش-کرنش، رفتار ماده خطی بوده و تنش و کرنش متناسب با هم افزایش یافته‌اند. شیب این بخش که بیانگر مدول یانگ است نشان می‌دهد که ماده در برابر تغییر شکل‌های الاستیک مقاومت بالایی داشته و سفتی مکانیکی مطلوبی دارد. کرنش در رویه بازالت/اپوکسی معادل 0.0226 بدست آمد که این مقدار نشان‌دهنده رفتار ترد این کامپوزیت است. این میزان کرنش نشانگر آن است که بازالت/اپوکسی تغییر شکل کمتری دارد و در مقابل بارهای کششی شکست ناگهانی و تردی دارد.

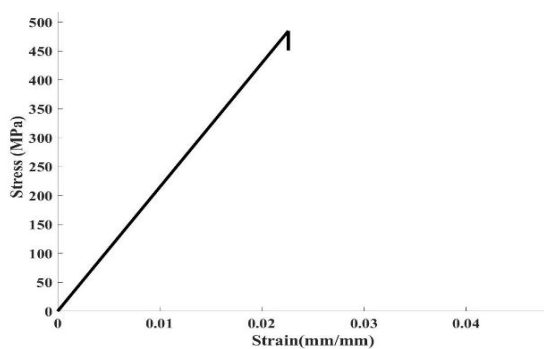


Fig. 5 Tensile properties of the basalt/epoxy face sheet

شکل 5 خواص کششی رویه بازالت/اپوکسی

#### 5-2- خواص خمشی نمونه ساندویچی

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی و جدول 4 خواص خمشی نمونه را تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهند. رفتار خمشی نمونه ساندویچی بازالت چوب پنبه را می‌توان در سه مرحله اصلی توصیف کرد. در ابتدا، ماده تحت تأثیر نیروی اعمال‌شده، به‌طور خطی افزایش جابجایی را تجربه می‌کند که نشان از رفتار الاستیک دارد. این بخش که در قسمت اولیه نمودار شکل 5 دیده می‌شود نشان‌دهنده این است که ماده در برابر خمش بدون تغییر شکل دائمی مقاومت می‌کند و پس از برداشتن بار، به حالت اولیه باز می‌گردد.

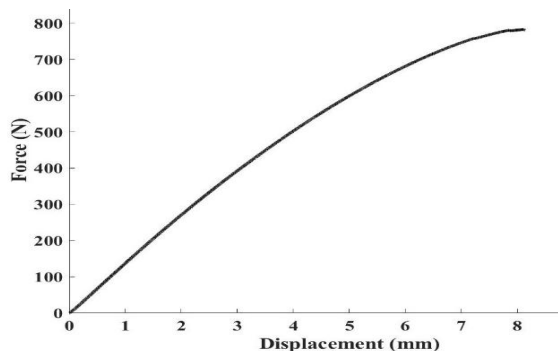


Fig. 6 Force-displacement curve of basalt/cork sandwich panel under flexural test

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی پنل ساندویچی بازالت/چوب پنبه تحت آزمون خمش

$$\sigma_f = P \frac{3S}{2bh^2} \quad (3)$$

$$E_f = \frac{S^3 \frac{P}{D}}{4bh^3} \quad (4)$$

$$\varepsilon_f = D \frac{6h}{S^2} \quad (5)$$

#### 4-3- آزمون ضربه سرعت پایین

آزمون ضربه سرعت پایین به‌منظور ارزیابی مقاومت کامپوزیت‌های ساندویچی بازالت/چوب پنبه مطابق با استاندارد ASTM D7136 انجام شد [47]. در این آزمون، نمونه‌ها تحت بارگذاری دینامیکی ناشی از سقوط وزنه قرار گرفته و پاسخ مکانیکی آن‌ها ثبت گردید. دستگاه مورد استفاده شامل مکانیزم وزنه آزاد، نوک ضربه‌زن نیم کروی به قطر 16 میلی‌متر، لودسل پیزوالکتریک برای ثبت نیروی برخورد، فیکسچر مخصوص جهت نگهداشتن نمونه و سیستم بلند کننده مغناطیسی بود. شکل 4 قسمت‌های مختلف آزمون شامل ضربه‌زننده، لودسل، فیکسچر و نمونه ساندویچی را نشان می‌دهد. وزن ضربه‌زن در تمامی آزمایش‌ها برابر 5.75 کیلوگرم در نظر گرفته شد و انرژی ضربه با تغییر ارتفاع سقوط تنظیم گردید. برای بررسی رفتار کامپوزیت‌ها، سه سطح انرژی 11.4 ژول، 17.1 ژول و 22.8 ژول در نظر گرفته شد و داده‌های حاصل از برخورد شامل نیرو و زمان توسط سیستم جمع‌آوری داده‌ها با نرخ نمونه‌برداری 20 کیلوهرتز ثبت گردید. سپس سرعت لحظه‌ای، جابجایی نوک ضربه‌زن و میزان انرژی جذب شده توسط روابط زیر محاسبه گردید [47].

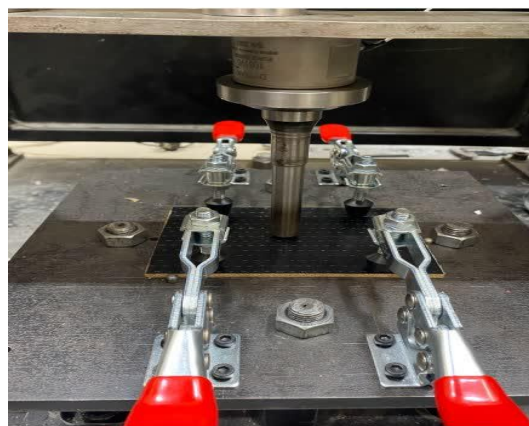


Fig. 4 Low-velocity impact testing of the sandwich sample

شکل 4 آزمون ضربه سرعت پایین نمونه ساندویچی

سرعت لحظه‌ای نوک ضربه‌زن با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (6)$$

جابجایی نوک ضربه‌زن از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (7)$$

همچنین میزان انرژی جذب‌شده توسط نمونه بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_a(t) = \frac{m(v_i^2 - (v(t))^2)}{2} + mg\delta(t) \quad (8)$$

ضربه می‌توان گفت که قله‌های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب نمایانگر آسیب‌های رویه بالایی، فاصله بین رویه بالایی و هسته، خود هسته و فاصله بین هسته و رویه پایینی هستند. به عبارت دیگر، آسیب ضربه‌زننده در این سطح انرژی از بالا شروع شده و در هسته یا رویه پایینی متوقف می‌شود. تغییر افقی در انحراف بین دو قله به دلیل تغییر شکل و فرورفتگی هسته است. عدم تقارن مشاهده‌شده در منحنی‌ها به عنوان شواهدی از آسیب نسبتاً قابل ملاحظه به نمونه است. پس از افزایش خطی نیرو که مربوط به تغییر شکل الاستیک ساختار است، یک سری از نوسانات نیرو نمایان می‌شود. این بی‌نظمی‌ها در سطوح انرژی بالاتر به وضوح مشاهده می‌شوند و می‌توان آن‌ها را به مکانیسم‌های آسیب‌زا نسبت داد. قله اول نمودارها در سطوح انرژی 17.1 ژول و 22.8 ژول به شکست الیاف بازالت و ترک خوردگی رزین مربوط می‌شوند. قله‌های دوم و سوم به جداشدن رویه از هسته و فرورفتگی پلاستیکی هسته مربوط می‌شوند. به طور پیوسته، پس از این قله‌ها، کاهش شیب مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده کاهش سفتی ساختار است. با این حال، باید اشاره شود که برخی از بی‌نظمی‌ها در منحنی ممکن است به دلیل ارتعاشات مواد یا دستگاه باشد.

در نمودار نیرو - زمان، زمان ضربه‌زننده نشان دهنده میزان زمان برخورد ضربه‌زننده با نمونه مورد ارزیابی می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح انرژی، زمان برخورد افزایش پیدا می‌کند. افزایش زمان برخورد حاکی از آن است که نمونه بیشتر در معرض برخورد بوده و احتمال وجود آمدن آسیب در نمونه بیشتر است.

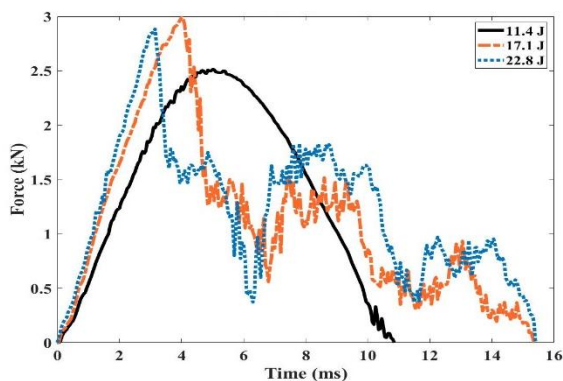


Fig. 7 Force-time diagram of the basalt/cork sandwich sample  
شکل 7 نمودار نیرو - زمان نمونه ساندویچی بازالت/چوب پنبه

پس از تفسیر نمودارهای نیرو - زمان، منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی می‌توانند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های بصری برای درک واکنش نمونه کامپوزیتی به بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین کمک کنند. یک منحنی نیرو - جابه‌جایی که شامل بخش‌های صعودی (بارگذاری) و نزولی (بازگشتی) است می‌تواند به دودسته منحنی باز و منحنی بسته تقسیم شود. معمولاً وقتی انرژی ضربه از سطوح پایین به سطوح بالا افزایش می‌یابد نوع منحنی از نوع بسته به نوع باز تغییر پیدا می‌کند. بر اساس قسمت بخش نزولی، سه نوع منحنی مختلف وجود دارد که حالات بازگشتی، نفوذ و سوراخ کردن را نمایان می‌کند. هر یک از این حالات در محدوده‌ای خاص از سطح انرژی ضربه برای یک کامپوزیت رخ می‌دهد. این وضعیت‌ها در سازه‌های ساندویچی برای رویه‌های بالایی و پایینی، قسمت داخلی رویه‌ها و هسته رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال، ضربه‌زننده ممکن است تنها از ورق بالایی بازگردد یا به ماده هسته‌ای نفوذ کند و یا هر دو را سوراخ کند. برای درک بهتر، منحنی نیرو - جابه‌جایی سه نمونه که در سه سطح

با افزایش نیرو، این روند تغییر می‌کند و رابطه بین جابه‌جایی و نیرو از حالت خطی خارج می‌شود. این تغییر تدریجی در شیب منحنی، نشانه‌ای از ورود ماده به ناحیه‌ای است که در آن برگشت‌پذیری دیگر مشاهده نمی‌شود. داده‌های جدول 4 نشان می‌دهند که در جابجایی 8.11 میلی‌متر، حداکثر نیروی 783 نیوتن به ماده اعمال شده است که نشان از نقطه اوج توانایی تحمل بار می‌باشد. در این نقطه، ماده هنوز تحت تنش قرار دارد اما نشانه‌هایی از تغییرات قابل‌بازگشت در ساختار آن دیده نمی‌شود.

جدول 4 خواص مکانیکی نمونه ساندویچی بازالت/چوب پنبه اپوکسی در آزمایش خمش

Table 4 Mechanical properties of the basalt/cork sandwich sample under flexural test

نمونه	نیرو (N)	جابه‌جایی (mm)	تنش (Mpa)	کرنش (mm/mm)	مدول خمشی (Gpa)
بازالت/چوب پنبه	783	8.11	92	0.0134	6.685

پس از عبور از این مرحله، ماده دیگر قادر به تحمل نیروی بیشتری نیست و نمودار نیرو-جابه‌جایی نشانه‌هایی از کاهش نیرو را ثبت می‌کند. این افت نیرو نشان‌دهنده آن است که نمونه وارد مرحله‌ای شده که در آن مقاومت ساختاری کاهش یافته است. این رفتار می‌تواند به دلیل آسیب‌های داخلی، آغاز ترک‌های ریز و کاهش انسجام بین‌لایه‌ای در کامپوزیت باشد. در جدول 4 میزان بیشینه استحکام خمشی 92 مگاپاسکال و کرنش خمشی 0.0134 گزارش شده است که حاکی از آن است نمونه قبل از رسیدن به شکست نهایی، تغییر شکل قابل‌توجهی را تجربه کرده است. سازه‌های ساندویچی به مانند تیرهای آی-شکل رفتار می‌کنند. در سازه‌های ساندویچی رویه‌ها مانند بال تیر و هسته مثل جان تیر رفتار می‌کنند. بال‌ها به دلیل فاصله از محور خنثی، نقش بیشتری در تحمل خمش دارند. بال‌ها در تحمل ممان خمشی نقش مهمی را ایفا می‌کنند در حالیکه جان بارهای برشی و کمی خمش را تحمل می‌کنند. ساختار چوب‌پنبه‌ای هسته، نقش کمی در تحمل خمش ایفا می‌کند در حالیکه رویه‌های تقویت شده با الیاف بازالت نقش اساسی در تحمل خمش دارند و باعث افزایش استحکام و سفتی خمشی می‌شوند. انتخاب نوع الیاف پوسته و جهت چینش الیاف نقش مهمی در تحمل بازهای خمشی دارد.

### 3-5- پاسخ ضربه

شکل 7 نمودار نیرو-زمان برای سه سطح مختلف انرژی ضربه را نشان می‌دهد. نمودار نیرو-زمان در سطح انرژی 11.4 ژول به شکل متقارن می‌باشد که نشان‌دهنده تغییرات الاستیک با میزان آسیب کم به نمونه است. در این حالت، نیرو به‌طور نسبتاً یکنواخت در طول زمان افزایش می‌یابد و سپس به تدریج کاهش می‌یابد، بدون اینکه نوسانات غیرطبیعی یا افت‌های ناگهانی در منحنی مشاهده شود. این رفتار معمولاً نشان‌دهنده آن است که آسیب دائمی یا شکست قابل ملاحظه در ساختار نمونه رخ نداده است. این نوع نمودار معمولاً در سطوح پایین انرژی ضربه‌ای دیده می‌شود که ماده هنوز در محدوده الاستیک رفتار می‌کند و از آسیب‌های قابل ملاحظه مانند ترک خوردگی رزین، شکست الیاف، لایه لایه شدن و جداشدن رویه از هسته خبری نیست. اما در سطوح انرژی 17.1 ژول و 22.8 ژول به وضوح دیده می‌شود که منحنی نیرو - زمان بسیار متفاوت از آن چیزی است که در سطح پایین انرژی مشاهده شد و در چند نقطه شاهد افزایش و افت نیرو هستیم. به طور خلاصه برای این سطوح از انرژی

و حتی تمام آن را جذب می‌کنند. پس از رسیدن به سطح مشخصی از انرژی، منحنی وارد مرحله‌ای پایدار می‌شود که نشان‌دهنده گسترش آسیب‌های داخلی در ساختار ماده است. این مرحله، به‌ویژه در انرژی‌های بالاتر، نشان‌دهنده شروع فرآیندهای آسیب‌زایی مانند ترک خوردگی و لایه لایه شدن است که در نتیجه‌ی جذب انرژی زیاد رخ می‌دهد. در این مرحله، انرژی ضربه دیگر صرف تغییرات الاستیک نمی‌شود، بلکه به‌طور کامل برای ایجاد و گسترش آسیب‌های داخلی مصرف می‌شود. میزان انرژی الاستیک خیلی کم یا عدم مشاهده انرژی الاستیک در نمونه‌ها در سطوح بالاتر انرژی ضربه نشان می‌دهد که بخش عظیمی از انرژی ضربه صرف ایجاد ترک‌ها، شکست الیاف، تورفتگی هسته و سایر آسیب‌ها شده است. به عبارت دیگر، در این سطوح انرژی، ماده دیگر قادر به بازگشت به حالت اولیه خود نیست و تمام انرژی ضربه به صورت آسیب‌های ساختاری و تغییرات دائمی در ماده ذخیره شده است. همچنین، مدت زمانی که برای جذب انرژی لازم است با افزایش سطح انرژی ضربه بیشتر می‌شود که نشان می‌دهد انرژی ضربه فرصت بیشتری برای ایجاد و گسترش آسیب در ساختار ماده فراهم کرده است. به‌طور کلی می‌توان گفت که نمونه‌ها با جذب انرژی بیشتر دچار آسیب‌های بیشتری می‌شوند. نبود بازگشت الاستیک در سطوح بالاتر انرژی ضربه‌ای به‌وضوح نشان می‌دهد که تمامی انرژی جذب‌شده صرف ایجاد و توسعه آسیب‌های داخلی، شکست‌های ساختاری و تغییر شکل هسته شده است. این نتیجه نشان‌دهنده تأثیر بالای انرژی ضربه در تغییرات دائمی و جدی در ماده است که موجب آسیب‌های قابل توجهی به ساختار می‌شود.

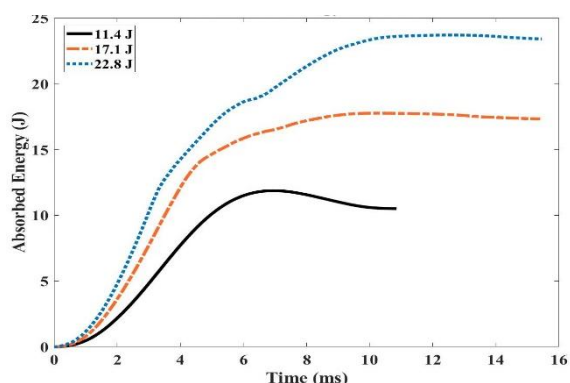


Fig. 9 Absorbed energy - time diagram of the basalt/cork sandwich sample

شکل 9 نمودار انرژی جذب شده - زمان نمونه ساندویچی بازالت/چوب پنبه

شکل‌های 10 تا 12 شکل مربوط به آسیب سطح نمونه‌ها و نمای برش-یافته جانبی از محل ضربه را در سطوح مختلف انرژی نشان می‌دهد. بدلیل ماهیت ساندویچی نمونه و خواص الیاف بازالت و چوب پنبه در محل برخورد هر سه نمونه شاهد فرورفتگی هستیم در حالیکه در چندلایه‌های کامپوزیتی، آسیب‌ها معمولاً بصورت فرورفتگی نبوده و به شکل ترک خوردگی ماتریس و شکست الیاف مشاهده می‌شوند.

مطابق نماهای بالا و ماکرو نشان داده شده در شکل 10، نمونه ساندویچی بازالت چوب‌پنبه که در انرژی 11.4 ژول تحت تأثیر ضربه قرار گرفته است ترک‌های ماتریسی و شکست الیاف را تجربه نمی‌کند و تنها آسیب قابل مشاهده در نمونه یک فرورفتگی کوچک در محل برخورد ضربه است. نمای برش خورده شکل 10-ج نیز نشان می‌دهد که در این سطح انرژی، آسیب‌های ایجادشده بسیار محدود و تنها در ناحیه مربوط به محل ضربه یک تغییر شکل کوچک قابل مشاهده است و آسیب‌های مثل پدیده لایه‌لایه شدن و یا جدا شدن رویه

انرژی 11.4 ژول، 17.1 ژول و 22.8 ژول تحت ضربه قرار گرفته‌اند، در شکل 8 نشان داده شده است. در هیچ کدام از منحنی‌ها پدیده سوراخ‌شدن اتفاق نیفتاده است ولی پدیده بازگشت و نفوذ را شاهد هستیم. در سطح انرژی 11.4 ژول، ضربه‌زن پس از برخورد با رویه بالایی برگشت‌خورده و در منحنی مربوطه که یک منحنی کاملاً بسته است این موضوع واضح است و شکل معمولی یک ضربه با بازگشت الاستیک را نشان می‌دهد. هر چند تورفتگی جزئی نمونه در این سطح انرژی رخ داده است. هنگامی که سطح انرژی ضربه‌ای افزایش می‌یابد، ضربه‌زن تا اندازه‌ای به پوسته بالایی و هسته نفوذ کرده و سپس با یک بازگشت کمتر، متوقف می‌شود. در این حالت ترک‌های مشخصی در رویه بالایی قابل مشاهده است و تورفتگی نمونه بیشتر از حالت قبل است. شکل منحنی و بیشتر شدن میزان جابه‌جایی نسبت به منحنی اول این موضوع را تأیید می‌کند. در اینجا، اولین و دومین قله به ترتیب نمایانگر آسیب‌های رخ داده در ورق‌های بالایی و هسته هستند که ممکن است به‌صورت شکست الیاف و تغییر شکل هسته مشاهده شود. در منحنی با بیشترین سطح انرژی ضربه، شاهد بیشترین جابه‌جایی هستیم و از طرفی پدیده بازگشتی در این منحنی کمتر است. این موضوع موید نفوذ بیشتر و بازگشت کمتر ضربه‌زننده از سطح نمونه است که باعث آسیب بیشتر و تورفتگی قابل‌ملاحظه در نمونه شده است. علاوه بر این، مساحت محصور شده توسط منحنی با افزایش انرژی ضربه‌ای اعمال شده گسترش می‌یابد. بایستی اشاره شود که مساحت زیر منحنی نیرو - جابه‌جایی، به‌عنوان انرژی جذب‌شده در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که تمام منحنی‌ها به‌صورت بسته هستند هیچ آسیبی در رویه پایینی نمونه‌ها در سطوح مختلف انرژی مشاهده نشد. شکل بسته منحنی به نام حالت بازگشت الاستیک شناخته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، ضربه‌زننده از پوسته بالایی باز می‌گردد.

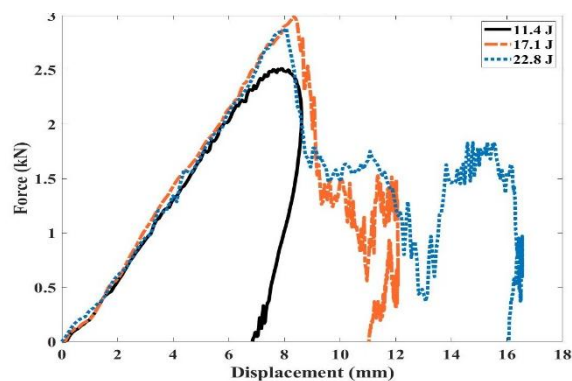
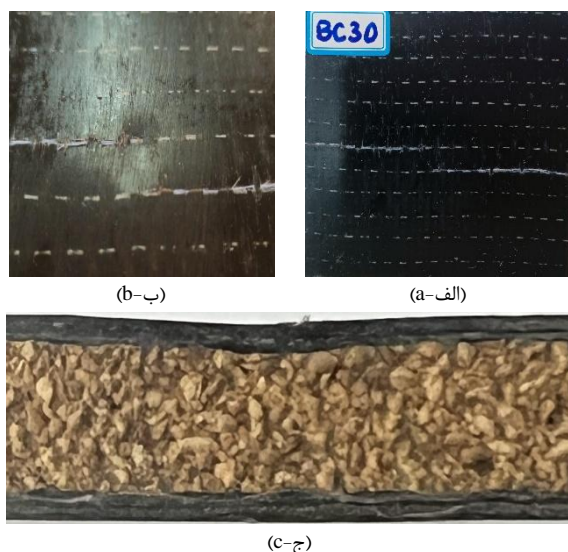


Fig. 8 Force-displacement diagram of the basalt/cork sandwich sample

شکل 8 نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه ساندویچی بازالت/چوب پنبه

شکل 9 روند جذب انرژی ضربه و گسترش آسیب در ساختار ساندویچی بازالت-چوب‌پنبه را به‌طور کامل نشان می‌دهد. برای نمونه ساندویچی بازالت/چوب‌پنبه در سطح انرژی ضربه‌ای 11.4 ژول، مشاهده می‌شود که انرژی کمتری نسبت به سطوح بالاتر جذب شده است. در این سطح انرژی، منحنی انرژی-زمان نشان می‌دهد که نمونه دچار بازگشت الاستیک شده است که این بازگشت به معنی بازگشت بخشی از انرژی جذب‌شده به منبع ضربه است. وجود این بازگشت الاستیک نشان می‌دهد که نمونه توانسته است در این سطح از انرژی تا حدی به وضعیت اولیه خود بازگردد. به عبارت دیگر، ماده هنوز تا حدی قادر به بازیابی خود است و به‌طور کامل دچار تغییرات دائمی و آسیب‌های وسیع نشده است. با افزایش انرژی ضربه‌ای به سطوح بالاتر، نمونه‌ها اکثر انرژی

از هسته در نمونه مشاهده نمی‌شود. در این نما، رویه بالایی و قسمت بالایی هسته که بصورت مستقیم تحت تأثیر ضربه‌زنده بوده تغییر شکل اندکی را تجربه کرده و هیچ‌گونه آسیب قابل ملاحظه مثل ترک خوردگی وسیع در زمینه، شکست الیاف، لایه لایه شدن یا جدا شدن رویه از هسته دیده نمی‌شود. البته این موضوع قابل انتظار بود چراکه نمودار نیرو-زمان متناظر با این سطح انرژی دارای شکل متقارن بوده که نشان‌دهنده پاسخ الاستیک ماده و توانایی آن در جذب انرژی ضربه بدون ایجاد آسیب ساختاری گسترده بود. این نتایج بیانگر آن هستند که ساختار نمونه به دلیل رفتار الاستیک آن در سطح انرژی پایین، توانسته است تا حدی بازگشت ارتجاعی داشته باشد و گسترش آسیب‌ها به طور کامل صورت نگیرد. این ویژگی باعث شده که آسیب‌ها محدود شده و مناطق آسیب‌دیده به میزان زیادی کاهش یابند. به عبارت دیگر، توانایی بازگشت به حالت اولیه پس از ضربه و مهار گسترش آسیب‌ها، از شدت آسیب‌ها کاسته و به حفظ یکپارچگی ساختاری نمونه کمک کرده است.



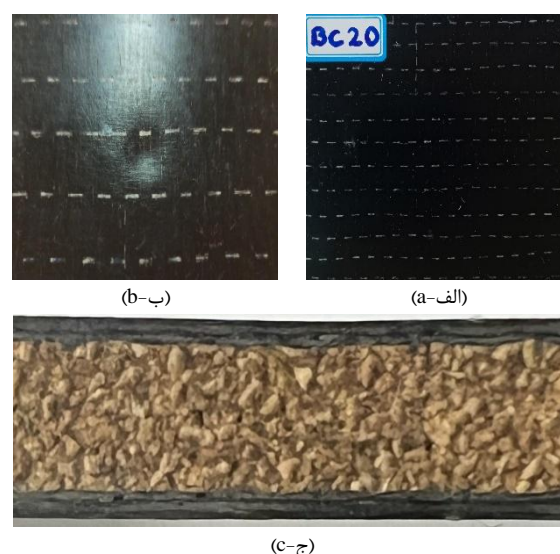
**Fig. 11** The damaged sample under impact energy of 17.1J: a) top view, b) macro view, c) section view

شکل 11 نمونه آسیب دیده تحت انرژی ضربه 17.1 ژول (الف) نمای بالا (ب) نمای ماکرو (ج) نمای جانبی برش خورده

در شکل 12، انرژی ضربه به 22.1 ژول افزایش یافته است و این تغییر باعث ایجاد آسیب‌های قابل توجه‌تری در نمونه شده است. با افزایش انرژی ضربه، فرورفتگی‌های بزرگتری در سطح نمونه ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر ضربه بر ساختار ساندویچی است. این سطح از انرژی ضربه به وضوح نشان‌دهنده ترک‌های عمیق‌تر در ماتریس و شکستگی‌های جدی‌تر در الیاف است که به‌طور واضح در سطح رویه مشاهده می‌شوند. این آسیب‌ها علاوه بر اینکه در رویه بالا مشاهده می‌شوند ممکن است در داخل هسته و لایه‌های داخلی نیز مشاهده شوند. برای بررسی این موضوع بایستی نمای برش خورده جانبی نمونه را داشته باشیم.

شکل 12-ج نمای جانبی برش خورده نمونه در سطح انرژی 22.8 ژول را نشان می‌دهد. در این نما، شکست و گسیختگی واضحی از الیاف بازالت در محل ضربه مشاهده می‌شود و میزان تغییر شکل و تورفتگی نمونه به مراتب بیشتر از دو حالت قبلی است. علاوه بر این، نشانه‌هایی از جدا شدن رویه از هسته خفیف در نزدیکی محل ضربه خورده قابل مشاهده است که نشان‌دهنده گسترش آسیب در ساختار کامپوزیتی است. این میزان از تخریب و تورفتگی، حاکی از ناتوانی ماده در تحمل انرژی ضربه بالا بدون ایجاد شکست سازه‌ای است و تأکید می‌کند که افزایش انرژی ضربه منجر به تخریب گسترده‌تر و کاهش چشمگیر در یکپارچگی مکانیکی نمونه می‌شود. نتایج شکل 12 نیز با تحلیل نمودارهای انجام گرفته در بخش قبلی همخوانی دارد.

از هسته در نمونه مشاهده نمی‌شود. در این نما، رویه بالایی و قسمت بالایی هسته که بصورت مستقیم تحت تأثیر ضربه‌زنده بوده تغییر شکل اندکی را تجربه کرده و هیچ‌گونه آسیب قابل ملاحظه مثل ترک خوردگی وسیع در زمینه، شکست الیاف، لایه لایه شدن یا جدا شدن رویه از هسته دیده نمی‌شود. البته این موضوع قابل انتظار بود چراکه نمودار نیرو-زمان متناظر با این سطح انرژی دارای شکل متقارن بوده که نشان‌دهنده پاسخ الاستیک ماده و توانایی آن در جذب انرژی ضربه بدون ایجاد آسیب ساختاری گسترده بود. این نتایج بیانگر آن هستند که ساختار نمونه به دلیل رفتار الاستیک آن در سطح انرژی پایین، توانسته است تا حدی بازگشت ارتجاعی داشته باشد و گسترش آسیب‌ها به طور کامل صورت نگیرد. این ویژگی باعث شده که آسیب‌ها محدود شده و مناطق آسیب‌دیده به میزان زیادی کاهش یابند. به عبارت دیگر، توانایی بازگشت به حالت اولیه پس از ضربه و مهار گسترش آسیب‌ها، از شدت آسیب‌ها کاسته و به حفظ یکپارچگی ساختاری نمونه کمک کرده است.



**Fig. 10** The damaged sample under impact energy of 11.4J: a) top view, b) macro view, c) section view

شکل 10 نمونه آسیب دیده تحت انرژی ضربه 11.4 ژول (الف) نمای بالا (ب) نمای ماکرو (ج) نمای جانبی برش خورده

در نمای بالا و ماکرو شکل 11، میزان فرو رفتگی در نمونه تحت تأثیر ضربه با انرژی 17.1 ژول به‌طور قابل توجهی بیشتر از حالت قبلی است. این نمونه به وضوح نشان‌دهنده ترک‌های ماتریسی و شکستگی‌های الیافی در رویه سطحی نمونه است که بر اثر ضربه به سطح ماده ایجاد شده و به‌طور واضح قابل مشاهده است. ترک‌های ماتریسی به دلیل تغییر شکل و گسیختگی پیوندها در ساختار ماتریس به وجود آمده‌اند و شکستگی‌های الیافی نیز در نتیجه نیروهای وارده بیشتر در سطح الیاف رخ داده‌اند. علاوه بر آسیب‌های سطحی، تغییر شکل هسته نیز در این سطح انرژی به مراتب بیشتر شده است که می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات ساختاری قابل توجهی در بخش‌های داخلی هسته است. این آسیب‌ها موجب گسترش ترک‌ها و جدا شدن بین رویه و هسته شده و یکپارچگی ساختار ساندویچی را تهدید می‌کند. بنابراین، این سطح از انرژی باعث بروز آسیب‌های قابل توجهی در رویه بالایی و هسته شده است که منجر به کاهش استحکام کلی نمونه و افزایش آسیب‌های داخلی آن می‌شود. در شکل 11-ج که مربوط به نمای برش خورده جانبی می‌باشد، آسیب‌هایی مثل لایه‌لایه شدن، جدا شدن رویه از هسته و آسیب هسته می‌تواند مشاهده شود. در این

نشد. این موضوع نشان‌دهنده افزایش آسیب‌ها و گسترش خرابی‌ها در ساختار ساندویچی بود.

#### 7- فهرست علائم

$E$	مدول یانگ ( $Nm^{-2}$ )
$P$	نیرو ( $Nm^{-2}$ )
$A_0$	سطح مقطع اولیه ( $m^2$ )
$S$	فاصله تکیه‌گاه‌ها ( $mm$ )
$b$	عرض مقطع نمونه ( $mm$ )
$h$	ارتفاع نمونه ( $mm$ )
$m$	جرم ضربه زن ( $kg$ )
$F(t)$	نیروی تماس ( $kN$ )
$V_0$	سرعت اولیه ( $m/s$ )
$V(t)$	سرعت لحظه‌ای ( $m/s$ )
$L$	طول ( $mm$ )
$D$	جابه‌جایی ( $mm$ )
$g$	شتاب جاذبه زمین ( $m/s^2$ )
$t$	زمان ( $s$ )
$E_a(t)$	انرژی جذب شده ( $J$ )
علائم یونانی	
$\sigma$	تنش ( $Nm^{-2}$ )
$\varepsilon$	کرنش
$\Delta$	تغییرات
زیرنویس‌ها	
$f$	خمشی
$g$	گیج

#### 8- مراجع

- [1] Plocher, J., Panesar, A., "Review on Design and Structural Optimisation in Additive Manufacturing: Towards Next-Generation Lightweight Structures" Materials & Design, Vol. 183, pp. 108164, 2019.
- [2] Rezghi Maleki, H., Parvande, P., "Comparison of Mechanical Properties and Low Velocity Impact Behavior of Basalt/Epoxy and Basalt/Vinyl Ester Composites" Journal of Science and Technology of Composites, pp. -, 2025.
- [3] Castanie, B., Bouvet, C., Ginot, M., "Review of Composite Sandwich Structure in Aeronautic Applications" Composites Part C: Open Access, Vol. 1, pp. 100004, 2020.
- [4] Birman, V., Kardomateas, G. A., "Review of Current Trends in Research and Applications of Sandwich Structures" Composites Part B: Engineering, Vol. 142, pp. 2.2018, 240-21
- [5] Khodaei, M., Safarabadi, M., Haghighi-Yazdi, M., Farzannia, M. A., "On the Ballistic Impact Behavior of Foam-Filled Honeycomb Core/Composite Skin Sandwich Panels" Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 45, No. 5, pp. 244, 2023.
- [6] Hosseinkhani, M., Ghavami, H., Haghighi-Yazdi, M., Mosavi Mashhadi, M., Safarabadi, M., "Investigation of Viscoelastic Properties in Composite Sandwich Panels Subjected to Low-Velocity Impact: Experimental and Numerical Approaches" Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 25, No. 4, pp. 478-498, 2023.

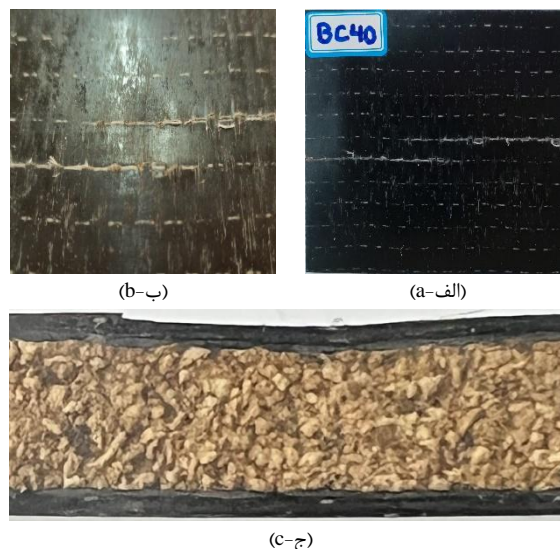


Fig. 12 The damaged sample under impact energy of 22.8J: a) top view, b) macro view, c) section view

شکل 12 نمونه آسیب دیده تحت انرژی ضربه 22.8 ژول (الف) نمای بالا (ب) نمای ماکرو (ج) نمای جانبی برش خورده

#### 6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار نمونه‌های ساندویچی با رویه بازالت/اپوکسی و هسته چوب‌پنبه تحت آزمون‌های خمشی و ضربه سرعت پایین بررسی و نتایج زیر به دست آمد:

- در آزمایش‌های خمشی سه‌نقطه، سازه ساندویچی بازالت/چوب‌پنبه ابتدا مقاومت الاستیک خوبی در برابر بارگذاری خمشی نشان داد و قادر بود انرژی زیادی را بدون آسیب‌های جدی جذب کند. با افزایش بار، سازه وارد مرحله‌ای تغییرات غیرقابل‌بازگشت در ساختار شد و مقاومت خمشی به تدریج کاهش یافت. ساختار چوب‌پنبه‌ای هسته، نقش کمی در تحمل خمشی ایفا می‌کند درحالی‌که رویه‌های تقویت شده با الیاف بازالت نقش اساسی در تحمل خمشی دارند و باعث افزایش استحکام و سفتی خمشی می‌شوند.

- در آزمایش ضربه‌ای با انرژی‌های مختلف، منحنی نیرو - زمان در سطح انرژی 11.4 ژول دارای شکل متقارن و بدون نوسانات چشمگیر بود که نشان‌دهنده ایجاد آسیب‌های جزئی در نمونه بود. با افزایش انرژی به 17.1 و 22.8 ژول، منحنی نیرو-زمان عدم نوسانات شدیدی را تجربه کرد که این تغییرات به دلیل آسیب‌هایی قابل ملاحظه مانند ترک زمینه، شکست الیاف، جدا شدن رویه از هسته و تورفتگی نمونه حاصل شد. این آسیب‌ها باعث کاهش سفتی ساختار و گسترش خرابی‌ها در لایه‌ها گردید.

- در انرژی‌های مختلف ضربه، منحنی نیرو - جابه‌جایی در سطح انرژی 11.4 ژول به‌طور تقریباً خطی بود که نشان‌دهنده بازگشت الاستیک و آسیب کمتر ساختار بود. در سطوح بالاتر انرژی، یعنی 17.1 و 22.8 ژول، منحنی نیرو-جابه‌جایی تغییرات غیرالاستیک نشان داد. در این سطوح، ساختار دچار آسیب‌هایی مانند ترک‌های سطحی و تغییرات در هسته و رویه‌ها شد که با افزایش انرژی ضربه، این آسیب‌ها تشدید شده و به کاهش سفتی ساختار و گسترش آسیب‌ها بین لایه‌ها و پوسته منجر گردید.

- برای منحنی انرژی - زمان در سطح انرژی 11.4 ژول دو قسمت انرژی جذب شده و انرژی الاستیک بوضوح مشاهده گردید ولی با افزایش انرژی به 17.1 و 22.8 ژول، انرژی جذب شده افزایش یافته و انرژی الاستیک مشاهده

- of Balsa Wood Core Sandwich Composite Beam Exposed to Fire" Processes, Vol. 8, No. 1, pp. 103, 2020.
- [23] Sargianis, J., Kim, H.-i., Suhr, J., "Natural Cork Agglomerate Employed as an Environmentally Friendly Solution for Quiet Sandwich Composites" Scientific reports, Vol. 2, No. 1, pp. 403, 2012.
- [24] Alavi Nia, A., Ranjbarzadeh, H., Kazemi, M., "An Empirical Study on Ballistic Resistance of Sandwich Targets with Aluminum Facesheets and Composite Core" Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 14, No. 6, pp. 1085-1105, 2017.
- [25] Witten, E., Mathes, V., "The Market for Glass Fibre Reinforced Plastics (Grp) in 2020" AVK: Berlin, Germany, 2020.
- [26] Sergi, C., Boria, S., Sarasini, F., Russo, P., Vitiello, L., Barbero, E., Sanchez-Saez, S., Tirillò, J., "Experimental and Finite Element Analysis of the Impact Response of Agglomerated Cork and Its Intraply Hybrid Flax/Basalt Sandwich Structures" Composite Structures, Vol. 272, pp. 114210, 2021.
- [27] Montazeri, A., Safarabadi, M., "A Comparative Study on Adding Chopped Kenaf Fibers to the Core of Glass/Epoxy Laminates under Quasi-Static Indentation: Experimental and Numerical Approaches" Journal of Composite Materials, Vol. 56, No. 25, pp. 3821-3833, 2022.
- [28] Chai, G. B., Zhu, S., "A Review of Low-Velocity Impact on Sandwich Structures" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 225, No. 4, pp. 207-230, 2011.
- [29] Silva, S. P., Sabino, M. A., Fernandes, E. M., Correló, V. M., Boesel, L. F., Reis, R. L., "Cork: Properties, Capabilities and Applications" International materials reviews, Vol. 50, No. 6, pp. 345-365, 2005.
- [30] Knapic, S., Oliveira, V., Machado, J. S., Pereira, H., "Cork as a Building Material: A Review" European Journal of Wood and Wood Products, Vol. 74, pp. 775-791, 2016.
- [31] Pereira, H., "The Rationale Behind Cork Properties: A Review of Structure and Chemistry" BioResources, Vol. 10, No. 3, 2015.
- [32] Sergi, C., Sarasini, F., Russo, P., Vitiello, L., Barbero, E., Sanchez-Saez, S., Tirillò, J., "Effect of Temperature on the Low-Velocity Impact Response of Environmentally Friendly Cork Sandwich Structures" Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 24, No. 2, pp. 1099-1121, 2022.
- [33] Jardin, R., Fernandes, F., Pereira, A., de Sousa, R. A., "Static and Dynamic Mechanical Response of Different Cork Agglomerates" Materials & Design, Vol. 68, pp. 121-126, 2015.
- [34] Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., Valenza, A., "A Review on Basalt Fibre and Its Composites" Composites Part B: Engineering, Vol. 74, pp. 74-94, 2015.
- [35] Lilli, M., Sarasini, F., Fausto, L. D., González, C., Fernández, A., Lopes, C. S., Tirillò, J., "Chemical Regeneration of Thermally Conditioned Basalt Fibres" Applied Sciences, Vol. 10, No. 19, pp. 6674, 2020.
- [36] Azizi, H., Eslami-Farsani, R., "The Effect of Modified Zirconia Nanoparticles on the Mechanical Response of Basalt Fibers- Epoxy Composite under Tensile Loading" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 2, pp. 891-896, 2020.
- [37] Ralph, C., Lemoine, P., Archer, E., Mcilhagger, A., "Mechanical Properties of Short Basalt Fibre Reinforced Polypropylene and the Effect of Fibre Sizing on Adhesion" Composites Part B: Engineering, Vol. 176, pp. 107260, 2019.
- [38] Gomez, A., Sanchez-Saez, S., Barbero, E., "Experimental Analysis of the Impact Behaviour of Sandwich Panels with Sustainable Cores" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 166, pp. 107383, 2023.
- [7] Morán, J., Casaburo, A., Petrone, G., Francucci, G., Stocchi, A., "Sub-Critical Damage Study of Aluminium Honeycomb and CfRP Sandwich Panels Subjected to Impact" Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 26, No. 8, pp. 1614-1638, 2024.
- [8] Karsandik, Y., Sabuncuoglu, B., Yildirim, B., Silberschmidt, V. V., "Impact Behavior of Sandwich Composites for Aviation Applications: A Review" Composite Structures, Vol. 314, pp. 116941, 2023.
- [9] Sutherland, L., "A Review of Impact Testing on Marine Composite Materials: Part I—Marine Impacts on Marine Composites" Composite Structures, Vol. 188, pp. 197-208, 2018.
- [10] Amran, Y. M., El-Zeadani, M., Lee, Y. H., Lee, Y. Y., Murali, G., Feduik, R., "Design Innovation, Efficiency and Applications of Structural Insulated Panels: A Review" in Proceeding of Elsevier, pp. 1358-1379.
- [11] Ma, Q., Rejab, M., Siregar, J., Guan, Z., "A Review of the Recent Trends on Core Structures and Impact Response of Sandwich Panels" Journal of Composite Materials, Vol. 55, No. 18, pp. 2513-2555, 2021.
- [12] Mohammadi, I., Haghghi-Yazdi, M., Safarabadi, M., Yousefi, A., "Crashworthiness Analysis of a Composite Guardrail under Impact Loading" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 237, No. 7, pp. 1651-1664, 2023.
- [13] Sharei, A., Safarabadi, M., Mashhadi, M. M., Solut, R. S., Haghghi-Yazdi, M., "Experimental and Numerical Investigation of Low Velocity Impact on Hybrid Short-Fiber Reinforced Foam Core Sandwich Panel" Journal of Composite Materials, Vol. 55, No. 29, pp. 4375-4385, 2021.
- [14] Hoseinlghab, S., Farahani, M., Safarabadi, M., Jalali, S., "Comparison and Identification of Efficient Nanoparticles to Improve the Impact Resistance of Glass/Epoxy Laminates: Experimental and Numerical Approaches" Mechanics of Advanced Materials and Structures, Vol. 30, No. 4, pp. 694-709, 2023.
- [15] Wang, J., Waas, A. M., Wang, H., "Experimental and Numerical Study on the Low-Velocity Impact Behavior of Foam-Core Sandwich Panels" Composite Structures, Vol. 96, pp. 298-311, 2013.
- [16] Amirashjaee, K., Fakhreddini-Najafabadi, S., Taheri-Behrooz, F., "Numerical and Experimental Study of Carbon / Epoxy Composite Laminate Response to Low Velocity Impact" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1461-1472, 2021.
- [17] Torabizadeh, M. A., "Experimental Study of the Effect of Impact Shape and Skin Layout on the Behavior of Aluminum Foam Core Sandwich Panels at Low Velocity Impact Load" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1153-1162, 2021.
- [18] Bragagnolo, G., Crocombe, A., Ogin, S., Mohagheghian, I., Sordon, A., Meeks, G., Santoni, C., "Investigation of Skin-Core Debonding in Sandwich Structures with Foam Cores" Materials & Design, Vol. 186, pp. 108312, 2020.
- [19] Mouritz, A., "Review of Z-Pinned Laminates and Sandwich Composites" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 139, pp. 106128, 2020.
- [20] Rong, Y., Liu, J., Luo, W., He, W., "Effects of Geometric Configurations of Corrugated Cores on the Local Impact and Planar Compression of Sandwich Panels" Composites Part B: Engineering, Vol. 152, pp. 324-335, 2018.
- [21] Yang, W., Xiong, J., Feng, L.-J., Pei, C., Wu, L.-Z., "Fabrication and Mechanical Properties of Three-Dimensional Enhanced Lattice Truss Sandwich Structures" Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 22, No. 5, pp. 1594-1611, 2020.
- [22] Tran Van, L., Legrand, V., Casari, P., Sankaran, R., Show, P. L., Berenjian, A., Lay, C.-H., "Hygro-Thermo-Mechanical Responses

- [39] Gomez, A., Barbero, E., Sanchez-Saez, S., "Modelling of Carbon/Epoxy Sandwich Panels with Agglomerated Cork Core Subjected to Impact Loads" International Journal of Impact Engineering, Vol. 159, pp. 104047, 2022.
- [40] Malekzadeh, F. K., Zolghadr, N., "Analytical Modeling to Predict Dynamic Response of Fiber-Metal Laminated Panel Subjected to Low Velocity Impact" In Persian, Journal of Science and Technology of Composites 2018.
- [41] Ghajar, R., Rassaf, A., "Effect of Impactor Shape and Temperature on the Behavior of E-Glass/Epoxy Composite Laminates" Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 10, 2015.
- [42] Taghipoor, H., Fard, K. M., "Experimental and Numerical Study of Energy Absorption in Foam Filled Trapezoidal Core Sandwich Panels Subjected to Quasi-Static Loading" Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 565-574, 2019.
- [43] Heidari-shahmaleki, E., Zeinedini, A., "Application of Cotton/Epoxy Laminated Composites to Fabricate the Uni-and Bi-Directional Cosine Corrugated Cores Sandwich Panels" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 2, pp. 863-872, 2020.
- [44] Masoumiasl, S., Rahimi, G. H., "Experimental and Numerical Investigation of Effect of Shape of Ribs on Flexural Behavior of Curved Composite Sandwich Panels with Lattice Core", 2019.
- [45] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of Astm Standard, 06.04, D 3039m-08, 2017 . .
- [46] Astm D7250/D7250m-20 Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness .
- [47] Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, Annual Book of Astm Standard, 06.04, D D7136m-20, 2020 . .