



## مقایسه خواص مکانیکی و رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر

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

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

چکیده	اطلاعات مقاله:
<p>امروزه سازه‌های کامپوزیتی به دلیل خواص منحصر به فردشان، به طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به کاربرد کامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی و رفتار ضربه این مواد بایستی مورد ارزیابی دقیق قرار گیرند. در پژوهش حاضر، رفتار کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت آزمون‌های ضربه، کشش و خمش بررسی شد. نمونه‌ها با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی به همراه تکنیک پرس گرم ساخته شدند و آزمون‌های استاندارد مکانیکی بر روی آن‌ها انجام گرفت. نتایج نشان داد که کامپوزیت زمینه اپوکسی به دلیل سازگاری بهتر با الیاف بازالت، در آزمون‌های کشش و خمش عملکرد بهتری نسبت به کامپوزیت زمینه وینیل استر داشت. در آزمون ضربه، نمونه بازالت/اپوکسی انرژی بیشتری جذب کرد اما تمامی انرژی جذب شده صرف گسترش آسیب‌های پیچیده داخلی مانند ترک خوردگی ماتریسی، لایه‌لایه شدن و شکست الیاف شد. در مقابل، نمونه بازالت/وینیل استر با جذب انرژی کمتر و مدت زمان ضربه طولانی‌تر در سطوح بالای انرژی، آسیب‌های متفاوتی را تجربه کرد. همچنین در سطح انرژی پایین، در نمونه بازالت/وینیل استر انرژی الاستیک مشاهده شد که این موضوع نشان‌دهنده توانایی محدود این کامپوزیت در بازگشت به حالت اولیه است. این پژوهش اهمیت انتخاب ماتریس مناسب در بهبود عملکرد ضربه‌ای و مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با بازالت را برجسته می‌کند.</p>	<p>دریافت: 1403/10/27 پذیرش: 1403/12/29</p> <p style="text-align: center;"><b>کلیدواژگان</b></p> <p>خواص مکانیکی، ضربه سرعت پایین، بازالت، اپوکسی، وینیل استر</p>

## Comparison of mechanical properties and low velocity impact behavior of basalt/epoxy and basalt/vinyl ester composites

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

1- Department of Mechanical Engineering, 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

Mechanical Properties, Low Velocity Impact, Basalt, Epoxy, Vinyl ester

### Abstract

Nowadays, composite structures are widely used in various industries due to their unique properties. Considering the applications of composites, it is essential to carefully evaluate their mechanical properties and impact behavior. In this study, the behavior of basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites was tested under impact, tensile, and flexural tests. The samples were fabricated using the hand lay-up method with a hot press technique, and standard mechanical tests were conducted on them. The results showed that the epoxy matrix composite, due to its better compatibility with basalt fibers, performed better in tensile and flexural tests compared to the vinyl ester matrix composite. In the impact test, the basalt/epoxy sample absorbed more energy; however, all the absorbed energy was utilized in the propagation of complex internal damages such as matrix cracking, delamination, and fiber breakage. In contrast, the basalt/vinyl ester sample, with lower energy absorption and a longer impact time at higher energy levels, experienced different damages. Additionally, at lower energy levels, elastic energy was observed in the basalt/vinyl ester sample, indicating its limited ability to return to its original state. This study highlights the importance of selecting an appropriate matrix to enhance the impact and mechanical performance of basalt-reinforced composites.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Rezghi Maleki, H., Parvande, P., "Comparison of mechanical properties and low velocity impact behavior of basalt/epoxy and basalt/vinyl ester composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 4, pp. 2584-2596, 2025.  
<https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2049775.1910>

## 1- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مواد مرکب به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی، وزن کم و عملکرد عالی در برابر شرایط محیطی گوناگون، مورد توجه صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و دریایی قرار گرفته‌اند [1]. این مواد به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن و قابلیت طراحی انعطاف‌پذیر، انتخابی ایده‌آل برای کاربردهایی هستند که به کاهش وزن و افزایش کارایی سازه نیاز دارند [2]. استفاده از مواد مرکب در بخش‌های مختلف صنایع، از تولید بدنه هواپیما و قطعات خودرو تا ساخت تجهیزات دریایی و پل‌های پیشرفته انقلابی در روش‌های مهندسی و طراحی ایجاد کرده است. این انقلاب به‌طور عمده به دلیل خواص استثنایی این مواد مانند مقاومت بالا در برابر خستگی، خوردگی و تغییرات حرارتی است که امکان استفاده از آن‌ها در شرایط محیطی چالش‌برانگیز را فراهم کرده است [3-6]. با وجود این مزایا، یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از مواد مرکب، درک رفتار آن‌ها در برابر بارگذاری‌های دینامیکی و تحلیل مکانیزم‌های شکست تحت شرایط واقعی است. به دلیل ماهیت چندفازی این مواد و تفاوت در خواص مکانیکی اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها، پیش‌بینی رفتار شکست تحت تنش‌های دینامیکی پیچیده‌تر از مواد سنتی مانند فلزات است [7]. بررسی و تحلیل دقیق رفتار این مواد تحت بارگذاری‌های ناگهانی و متمرکز به طراحان این امکان را می‌دهد که سازه‌هایی با عملکرد بهتر و عمر مفید بالاتر طراحی کنند. الیاف بازالت به عنوان یکی از مواد تقویت‌کننده پرکاربرد، به دلیل خواصی چون استحکام کششی مناسب، مقاومت حرارتی و پایداری شیمیایی عالی، جایگاه ویژه‌ای در توسعه مواد مرکب پیدا کرده است. این الیاف که از سنگ‌های آذرین تولید می‌شوند به دلیل عملکرد مناسب در شرایط سخت و مقاومت در برابر خوردگی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [8]. این ترکیب، علاوه بر ارائه خواصی چون استحکام مکانیکی بالا و پایداری دمایی، امکان طراحی سازه‌های پیشرفته و سبک‌تر را فراهم می‌آورد [9]. الیاف بازالت به دلیل چگالی کمتر نسبت به فلزات و مقاومت بالا در برابر عوامل محیطی مانند رطوبت و تشعشع حرارتی، به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل در کاربردهای مهندسی شناخته می‌شود. با این حال، رفتار کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و ضربه‌ای همچنان نیازمند مطالعه بیشتری است. به ویژه، در شرایط سقوط آزاد که در آن سازه‌ها تحت تنش‌های شدید و ناگهانی قرار می‌گیرند، بررسی دقیق پارامترهایی چون میزان جذب انرژی، مکانیزم‌های شروع و گسترش ترک و مقاومت نهایی ضروری است. در این نوع بارگذاری، شناخت رفتار پلاستیک موضعی، توزیع تنش در نواحی مختلف ماده و چگونگی پاسخ ماده به تغییرات سریع نیرو به ارائه راهکارهایی برای طراحی بهینه و افزایش ایمنی کمک می‌کند. سقوط آزاد به عنوان یک سناریوی بارگذاری دینامیکی رایج، چالش‌های مهمی برای طراحی سازه‌های کامپوزیتی ایجاد می‌کند [10]. در این نوع بارگذاری، سازه‌های کامپوزیتی تحت تاثیر نیروهای لحظه‌ای و شدید قرار می‌گیرند که می‌تواند منجر به ایجاد آسیب‌های موضعی یا گسترش ترک‌ها شود. تحلیل رفتار شکست و میزان جذب انرژی در این شرایط، نه تنها به پیشگیری از خرابی‌های ناگهانی کمک می‌کند بلکه راهنمایی برای بهینه‌سازی طراحی این سازه‌ها فراهم می‌کند. در چنین شرایطی، خواصی مانند استحکام ضربه‌ای، تغییر شکل‌های پلاستیک موضعی و قابلیت جذب انرژی از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی در زمینه رفتار چندلایه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف تحت تاثیر ضربه انجام شده است. فوند و همکاران [11] در مطالعات تجربی خود بر روی کامپوزیت‌های تقویت شده با

الیاف کربن گزارش کردند که ضربات متعدد باعث کاهش نیروی ضربه و افزایش مدت زمان ضربه می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر ضربات مکرر بر روی کاهش تدریجی نیروی ضربه و تغییر در مدت زمان برخورد بود. آموزو و همکاران [12] نیز تأثیر ضربات متعدد را بر لایه‌های کامپوزیت با توالی‌های مختلف چینش مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که لایه‌های شبه همسانگرد مقاومت بهتری در برابر آسیب حاصل از ضربه دارند. این تحقیق بر اهمیت انتخاب صحیح توالی چینش لایه‌ها در بهبود ویژگی‌های مقاومتی کامپوزیت‌ها در برابر ضربه تأکید می‌کند. لی و همکاران [13] رفتار ضربه با سرعت پایین و رفتار فشاری بعد از ضربه را بر روی کامپوزیت‌های مختلف و رزین اپوکسی ضد آتش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که الیاف شیشه‌ای می‌تواند حالت آسیب ضربه‌ای لایه‌ها را تغییر دهد و به‌طور مؤثری مقاومت در برابر ضربه و استحکام فشاری پس از ضربه لایه‌ها را بهبود بخشد. وو و همکاران [14] به مطالعه مکانیزم‌های آسیب سیلندرهای کامپوزیتی تحت ضربه با ضربه‌زن‌های تخت، نیم‌کره‌ای و مخروطی پرداختند. نتایج نشان داد که نوع ضربه‌زن تأثیر مستقیمی بر نوع آسیب، شتاب حداکثر و انرژی جذب‌شده دارد؛ به‌طوری‌که ضربه‌زن تخت بیشترین انرژی و ضربه‌زن مخروطی کمترین انرژی را جذب کردند. علاوه بر این، مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی فرآیند ضربه انجام شد که با نتایج آزمایش‌ها تطابق قابل‌توجهی داشت. بررسی توزیع تنش نشان داد که حالت فشار اولیه و سپس ضربه برای سیلندر خطرناک‌تر از حالت ضربه اولیه و سپس فشار است. عظیم‌پور و همکاران [15] به بررسی رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت پرداختند. نتایج بررسی نشان داد که کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت نسبت به کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن عملکرد بهتری در برابر ضربه داشته و نفوذ در انرژی‌های بالاتری رخ می‌دهد. این عملکرد بهتر به سختی بالا و مقاومت ضربه‌ای مناسب الیاف بازالت نسبت داده شد درحالی‌که شکنندگی و ضعف الیاف کربن منجر به عملکرد ضعیف‌تر کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن شد. مطالعه بلانک-وانه [16] درباره تأثیر ضربه و فشرده‌سازی پس از ضربه بر روی نمونه‌های کامپوزیتی نشان داد که پرکننده‌ها ظرفیت باربری را افزایش داده و تحمل آسیب را بهبود می‌بخشند. طاهری و یانوس [17] در پژوهش خود عملکرد مکانیکی شش نوع کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف (شیشه E، کولار و بازالت) و رزین‌های اپوکسی و الیوم را بررسی کردند و دریافتند که کامپوزیت‌های مبتنی بر الیوم در پاسخ‌های کششی، برشی و ضربه‌ای (سرعت پایین و بالا) عملکرد بهتری نسبت به اپوکسی داشتند. به‌ویژه کامپوزیت بازالت-الیوم با قابلیت بازیافت و دوستدار محیط‌زیست، ظرفیت جذب انرژی و حد بالستیک بالاتری را نشان داد. شکست کامپوزیت‌های الیوم به‌طور کلی با تغییر شکل پلاستیک همراه بود، درحالی‌که اپوکسی شکست‌های شکننده‌تری را نشان داد. پاک‌نژاد و همکاران [18] اثرات ضربه با بار کم و سرعت پایین بر روی یک ورق کامپوزیتی با تکیه‌گاه تمام‌گیردار را با استفاده از روش گالریکین مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان داد که نسبت سرعت به جرم ضربه‌زننده تأثیر بیشتری بر نیروی تماس، کاهش خیز ورق و مدت زمان اثر ضربه دارد. همچنین نتایج نشان داد که برای ضربه‌زننده با جرم کم، تغییر زاویه چیدمان الیاف تأثیر زیادی بر نیروی تماس و خیز ندارد در حالی‌که برای ضربه‌زننده با جرم زیاد، تغییرات در مقدار خیز قابل توجه است. قاجار و رصاف [19] اثر شکل ضربه‌زننده بر نیروی برخورد، زمان برخورد، جابجایی، انرژی جذب‌شده و میزان آسیب به قطعه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضربه‌زننده تخت بیشترین نیروی برخورد و کمترین زمان برخورد را دارد در حالی‌که ضربه‌زننده مخروطی بیشترین جابجایی و انرژی جذب‌شده را ایجاد می‌کند. ضربه‌زننده مخروطی

کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت با چینش تعداد 14 لایه به صورت متقاطع تک‌جهته (0/90 درجه) ساخته شدند. فرآیند تولید کامپوزیت‌ها به روش لایه‌چینی دستی انجام شد. در این روش، لایه‌های الیاف به صورت دستی بر روی سطح قالب قرار گرفته و سپس هر لایه با رزین مناسب آغشته سازی می‌شد. پس از اتمام لایه‌چینی، نمونه‌ها به مدت 24 ساعت در دمای محیط داخل دستگاه پرس قرار گرفتند تا اطمینان حاصل شود که رزین به طور یکنواخت در بین لایه‌ها پخش شده باشند. برای تکمیل فرآیند ساخت کامپوزیت‌ها، پخت رزین‌ها در دماهای مشخصی انجام گرفت. نمونه‌های بازالت اپوکسی به مدت 6 ساعت در دمای 60 درجه سلسیوس تحت حرارت قرار گرفتند تا رزین اپوکسی به طور کامل پخته شده و خواص مکانیکی کامپوزیت به طور چشمگیری تقویت شود. از سوی دیگر، نمونه‌های بازالت وینیل استر به مدت 2 ساعت در دمای 120 درجه سلسیوس تحت فرآیند پخت قرار گرفتند. این شرایط دمایی باعث تسریع واکنش‌های پخت رزین و بهبود استحکام و مقاومت شیمیایی کامپوزیت‌ها شد. نمونه‌ها در ابعاد 250×250 میلی‌متر مربع و با ضخامت نزدیک به 3 میلی‌متر ساخته شده و سپس توسط دستگاه برش مطابق استاندارد در اندازه‌های مشخصی بریده شدند. کسر حجمی الیاف برای نمونه بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر به ترتیب 54% و 45% دست آمد. دلیل این موضوع به نوع رزین‌های استفاده شده مربوط می‌شود. علیرغم استفاده از دو قالب یکسان، در نمونه ساخته شده با رزین اپوکسی به خاطر گرانشی پایین این رزین در مقایسه با رزین وینیل استر و بیرون آمدن رزین اضافی تحت فشار دستگاه پرس، ضخامت کمتری حاصل گردید و این موضوع باعث تفاوت در نسبت حجمی الیاف گردید.

## 2-2- آزمون کشش

برای تعیین خواص کششی مواد مرکب با زمینه پلیمری و تقویت‌شده با الیاف، آزمون‌های کشش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM D3039 انجام شد [21]. این آزمون‌ها بر روی نمونه‌هایی با ابعاد مشخص و شرایط استاندارد، شامل دما و رطوبت کنترل‌شده، انجام گرفتند. تعداد 5 نمونه یا برش دقیق آماده شدند و ابعاد آن‌ها شامل طول 250 میلی‌متر و عرض 25 میلی‌متر بود. به منظور جلوگیری از آسیب به محل اتصال نمونه و پیشگیری از ایجاد تمرکز تنش، از تب‌های شیشه/اپوکسی استفاده شد. این تب‌ها به دو انتهای نمونه با چسب مقاوم متصل شدند تا فشار ناشی از فک‌های پنوماتیک به صورت یکنواخت توزیع شود و از تاثیر منفی آن بر نتایج جلوگیری گردد. این اقدام به کاهش خطای اندازه‌گیری و افزایش دقت آزمون کمک می‌کند. شکل 1 نمایی از نمونه داخل فک دستگاه آزمون کشش را نشان می‌دهد.

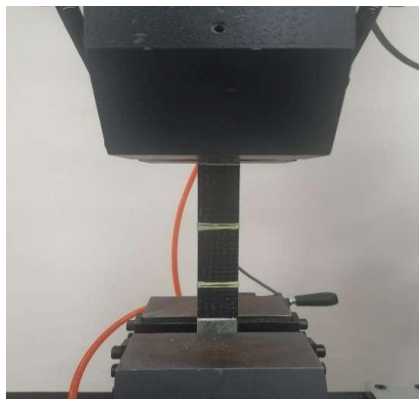


Fig. 1 Specimen prepared for tensile testing.

شکل 1 نمونه آماده برای آزمون کشش.

بیشترین نفوذ و آسیب به قطعه را وارد کرد در حالی که ضربه‌زنده تخت تنها آسیب‌های سطحی ایجاد کرد. تغییرات دما نیز تأثیراتی بر نیروی برخورد و جابجایی داشت به طوری که با افزایش دما، نیروی برخورد کاهش و جابجایی افزایش یافت. میرزایی و تقی پور [20] در مطالعه‌ای تجربی بر روی صفحات کامپوزیتی لایه‌ای تحت ضربه سرعت پایین به عنوان سیستم‌های جاذب انرژی، دریافتند که افزایش تعداد لایه‌ها از 5 به 10 موجب افزایش 55 درصدی استحکام اولیه شده و میزان جذب انرژی ویژه ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد، به طوری که نمونه 10 لایه 92 درصد افزایش جذب انرژی ویژه را نسبت به نمونه 5 لایه نشان می‌دهد. در کامپوزیت‌های هیبریدی شیشه/کنف، لایه لایه شدن به دلیل تمرکز تنش و شکست الیاف و ماتریس از مکانیزم‌های اصلی جذب انرژی بودند. استفاده از آرایش مناسب لایه‌ها و تغییر در جنس کامپوزیت موجب بهبود 51 درصدی جذب انرژی و کاهش شکست ترد الیاف کنف شد. نمونه 10 لایه توانست 75 درصد انرژی ضربه را جذب کند.

این تحقیق با هدف بررسی خواص مکانیکی و تحلیل رفتار شکست و مقایسه قابلیت جذب انرژی در کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر تحت ضربه سرعت پایین انجام شده است. این مطالعه شامل دو بخش اصلی است: ابتدا آزمون‌های کشش و خمش برای ارزیابی خواص مکانیکی اساسی کامپوزیت‌ها صورت می‌گیرد تا تأثیر نوع رزین و تقویت‌کننده بر رفتار مکانیکی مواد مشخص شود. در مرحله بعد، آزمون ضربه با استفاده از دستگاه سقوط آزاد انجام می‌شود. در این آزمون، پارامترهای کلیدی مانند نیرو - زمان، نیرو - جابجایی و انرژی - زمان اندازه‌گیری و بررسی می‌شوند. همچنین، شکست نمونه‌ها تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرند تا مکانیزم‌های آسیب شناسایی شوند.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- مواد و روش ساخت

برای ساخت نمونه‌ها، از الیاف بازالت به صورت تک‌جهته و با دانسیته سطحی 300 گرم بر متر مربع استفاده شد. مشخصات الیاف بازالت مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مشخصات الیاف بازالت

Table 1 Basalt fiber specifications

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

در این پژوهش از دو نوع رزین به عنوان زمینه استفاده شده است. رزین نوع اول، رزین اپوکسی EPL1012 به همراه هاردنر EPH112 با نسبت ترکیب 100:15 بود. رزین نوع دوم، رزین وینیل استر MFE711 بود که با افزودن 2 درصد پراکسید به عنوان کاتالیزور و 1 درصد کبالت به عنوان شتاب‌دهنده در دمای 25 درجه سلسیوس استفاده شد. مشخصات رزین‌های مورد استفاده در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی رزین‌های EPL1012 و MFE711

Table 2 Mechanical characteristics of EPL1012 and MFE711 resins

نوع رزین	مقاومت کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)
EPL1012	75	2.7	95	3.6
MFE711	80	3.7	120	3.8

در این فرمول‌ها،  $P$  بار اعمال شده،  $L$  طول دهانه،  $b$  عرض نمونه،  $d$  عمق نمونه و  $D$  تغییر شکل مرکز دهانه است. مدول خمشی نیز از شیب خط مستقیم در بخش الاستیک منحنی تنش - کرنش محاسبه شد.

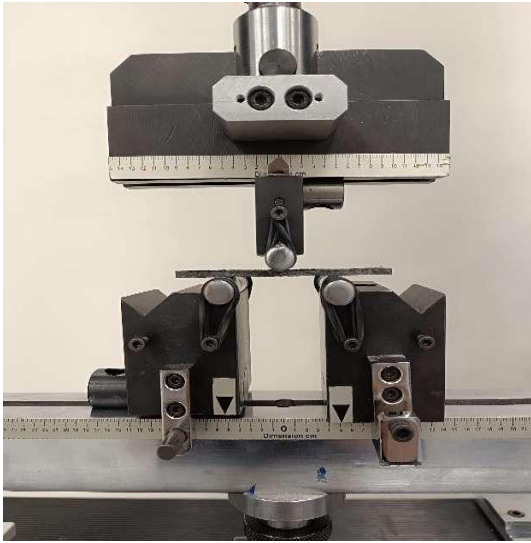


Fig. 2 Three-point bending test setup.

شکل 2 آزمون خمش با بارگذاری سه نقطه‌ای

#### 4-2- آزمون ضربه سرعت پایین

برای ارزیابی رفتار ضربه‌ای نمونه‌های کامپوزیتی، آزمون ضربه سرعت پایین طبق استاندارد ASTM D7136 انجام شد [23]. این آزمون‌ها با استفاده از دستگاه آزمون ضربه وزنه‌ای شامل مکانیزم وزنه آزاد، نوک ضربه‌زن نیم‌کروی به قطر 16 میلی‌متر، لودسل پیزوالکتریک، فیکسچر مخصوص و سیستم بلندکننده مغناطیسی صورت گرفت.

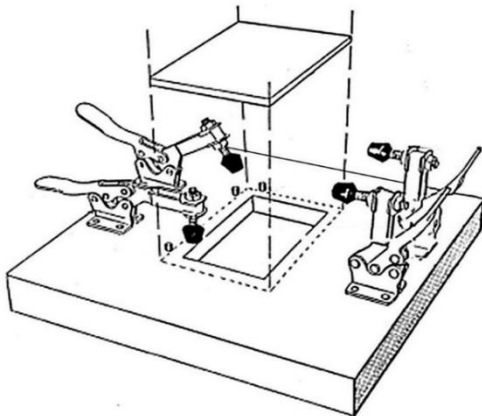


Fig. 3 Steel fixture for low-velocity impact testing with the specimen, designed according to ASTM D7136 [23].

شکل 3 فیکسچر فولادی آزمون ضربه وزنه‌ای همراه با نمونه مطابق با استاندارد ASTM D7136

تعداد 3 نمونه برای هر آزمون با ابعاد استاندارد آماده شدند. فیکسچر ضربه از جنس فولاد طراحی شده و دارای حفره‌ای به ابعاد  $125 \times 75$  میلی‌متر مربع بود (عکس 3). لودسل با ظرفیت حداکثر 222 کیلو نیوتن برای ثبت پاسخ نیرو-زمان در طول برخورد استفاده شد و به سیستم جمع‌آوری داده‌ها متصل بود که با نرخ نمونه‌برداری 20 کیلوهرتز داده‌برداری می‌کرد. انرژی ضربه با

آزمون‌ها با استفاده از دستگاه آزمون کشش مکانیکی با قابلیت کنترل سرعت بارگذاری و ثبت دقیق داده‌ها انجام شد. گیره‌های دستگاه به گونه‌ای تنظیم شدند که از لغزش نمونه جلوگیری کرده و توزیع بار یکنواختی را تضمین کنند. کرنش نمونه با استفاده از اکستنسومتر با طول مبنا 50 میلی‌متر ثبت شد. آزمون‌ها در دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $50 \pm 5\%$  انجام شدند. سرعت بارگذاری برابر با 2 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد تا نرخ کرنش استاندارد حفظ شود. بارگذاری تک‌محوری به صورت یکنواخت و با سرعت ثابت اعمال شد و نیروی اعمال شده و تغییر طول نمونه‌ها به صورت پیوسته ثبت شدند. آزمون تا رسیدن به شکست نمونه ادامه یافت. تنش کششی ( $\sigma$ ) و کرنش کششی ( $\epsilon$ ) با استفاده از معادلات استاندارد محاسبه شدند:

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

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

در این فرمول‌ها،  $P$  بار اعمال شده،  $A_0$  سطح مقطع نمونه،  $\Delta L$  تغییر طول و  $L_g$  طول مبنای اکستنسومتر است. مدول کششی ( $M$ ) از شیب بخش الاستیک منحنی تنش-کرنش محاسبه شد.

#### 3-2- آزمون خمش

برای تعیین خواص خمشی نمونه‌ها، آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM D790 انجام شد [22]. این آزمون‌ها بر روی نمونه‌هایی با ابعاد مشخص و شرایط استاندارد، شامل دما و رطوبت کنترل شده، انجام گرفتند. تعداد و ابعاد نمونه‌های برش یافته جهت انجام آزمون به ترتیب برابر با 5 عدد و با اندازه  $127 \times 12.7$  میلی‌متر بود. نسبت طول دهانه به عمق نمونه‌ها برابر با 16:1 انتخاب شد. آزمون‌ها با استفاده از دستگاه آزمون مکانیکی مجهز به بارگذاری سه نقطه‌ای (شکل 2) انجام شد. شعاع بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها برابر با  $5 \pm 0.01$  میلی‌متر بود. دستگاه باید قادر به اندازه‌گیری تغییر شکل نمونه با دقت بالا و کاهش تغییر شکل سیستم به کمتر از 1% تغییر شکل کل باشد. آزمون‌ها در دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $50 \pm 5\%$  انجام شدند و نمونه‌ها پیش از آزمون به مدت حداقل 40 ساعت در شرایط ذکر شده برای تعادل‌سازی نگهداری شدند. نمونه‌ها به صورت صاف روی تکیه‌گاه‌ها قرار گرفتند و بارگذاری از طریق یک نقطه در مرکز نمونه انجام شد. سرعت بارگذاری برابر با 2 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. بارگذاری ادامه یافت تا نمونه به نقطه شکست برسد یا کرنش در سطح خارجی نمونه به 5% برسد. تغییر شکل و نیروی اعمال شده به صورت پیوسته ثبت شدند. تنش خمشی ( $\sigma_f$ ) و کرنش خمشی ( $\epsilon_f$ ) با استفاده از معادلات استاندارد محاسبه شدند [22]:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4)$$

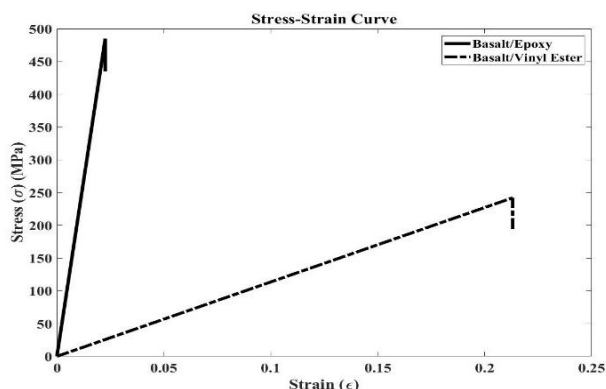


Fig. 4 Tensile properties of basalt/epoxy and basalt/vinyl ester

شکل 4 خواص کششی دو ماده بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر

در ادامه، کرنش کششی در بازالت/اپوکسی معادل 0.0226 میلی/میلی‌متر است که این مقدار نشان‌دهنده رفتار تردتر این کامپوزیت است. به عبارت دیگر، بازالت/اپوکسی کمتر تغییر شکل می‌دهد و در مقابل بارهای کششی مقاوم‌تر است، اما با این حال، به دلیل سفتی بیشتر، تمایل به شکست ناگهانی و شکننده دارد. از سوی دیگر، کرنش کششی در بازالت/وینیل استر برابر 0.2131 میلی/میلی‌متر است که به مراتب بیشتر از بازالت/اپوکسی است. این موضوع نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالاتر بازالت/وینیل استر و توانایی آن در تغییر شکل بیشتر قبل از شکست است. بدین ترتیب، بازالت/وینیل استر می‌تواند به اندازه بیشتر تغییر شکل دهد و برای کاربردهایی که نیاز به انعطاف‌پذیری بیشتر دارند، مناسب‌تر است. نتایج حاصله برای مدول کششی نشان می‌دهد که بازالت/اپوکسی دارای مدول 23 گیگاپاسکال است که به طور چشمگیری بالاتر از مدول کششی بازالت/وینیل به میزان 10.74 گیگاپاسکال استر است. این موضوع در شکل 4 از مقایسه شیب منطقه الاستیک دو نمونه به وضوح مشخص است. این تفاوت بیانگر این است که بازالت/اپوکسی سفت‌تر است و در برابر تغییر شکل الاستیک مقاومت بیشتری نشان می‌دهد. این ویژگی در مواقعی که مواد باید تغییر شکل کمتری در برابر بارگذاری کششی داشته باشند، اهمیت دارد. در مقابل، بازالت/وینیل استر به دلیل داشتن مدول کششی پایین‌تر، رفتار انعطاف‌پذیرتری دارد که این ویژگی می‌تواند در کاربردهایی که به انعطاف بیشتر نیاز دارند، مفید واقع شود. به طور کلی، داده‌ها نشان می‌دهند که بازالت/اپوکسی برای کاربردهایی که نیاز به استحکام کششی و سفتی بالا دارند، گزینه مناسبی است، در حالیکه بازالت/وینیل استر به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر و کرنش بالاتر، ممکن است برای کاربردهایی که نیاز به تغییر شکل زیاد دارند یا در شرایطی که جذب انرژی و تغییر شکل‌های قابل توجه مهم است، مناسب‌تر باشد.

برای تحلیل دقیق‌تر خواص کششی کامپوزیت‌ها و ارتباط بین ویژگی‌های مختلف، جدول 3 به عنوان جدول پراکندگی داده‌ها ارائه شده است. در این جدول، نتایج مربوط به آزمون‌های کششی هر دو نمونه بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر به صورت تفصیلی و در قالب مقادیر مربوط به مقاومت کششی ارائه گردیده است. این داده‌ها کمک می‌کنند تا تفاوت‌های موجود در رفتار مکانیکی این دو کامپوزیت به طور واضح‌تری بررسی و تحلیل شوند.

تغییر ارتفاع سقوط وزنه تنظیم شد، در حالی که وزن ضربه‌زن ثابت و برابر با 5.75 کیلوگرم بود. برای این آزمایش‌ها، سه سطح انرژی شامل 22.56 ژول، 33.84 ژول و 45.12 ژول با تنظیم دقیق ارتفاع سقوط وزنه ایجاد شدند. داده‌های حاصل از آزمون شامل نیرو، جابه‌جایی و سرعت نوک ضربه‌زن برای تحلیل رفتار مواد در برابر برخورد و ارزیابی مقاومت آن‌ها در برابر آسیب‌های ناشی از ضربه استفاده شدند. روابط مربوط به محاسبات سرعت نوک ضربه‌زن، جابجایی آن و میزان انرژی جذب شده در زیر آمده است [23]:  
سرعت لحظه‌ای نوک ضربه‌زن  $v(t)$  از رابطه زیر محاسبه شد:

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (5)$$

که در آن  $v_i$  سرعت اولیه ضربه‌زن،  $g$  شتاب گرانش زمین،  $F(t)$  نیروی تماس و  $m$  جرم ضربه‌زن است.

جابه‌جایی نوک ضربه‌زن  $\delta(t)$  نیز بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (6)$$

که در آن  $\delta_i$  جابه‌جایی اولیه ضربه‌زن است.

برای تعیین میزان انرژی جذب‌شده  $E_a(t)$  توسط نمونه در زمان  $t$ ، از رابطه زیر استفاده شد:

$$E_a(t) = \frac{m(v_i^2 - (v(t))^2)}{2} + mg\delta(t) \quad (7)$$

این رابطه،  $E_a(t)$  انرژی جذب‌شده،  $m$  جرم ضربه‌زن و  $\delta(t)$  جابه‌جایی نوک ضربه‌زن است. این روش‌ها امکان ارزیابی دقیق خواص مکانیکی مواد مرکب در شرایط بارگذاری دینامیکی را فراهم کرده و داده‌های حاصل برای تحلیل رفتار ضربه‌ای و بهینه‌سازی طراحی مواد و سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- آزمون کشش

نتایج آزمون کشش برای دو کامپوزیت بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر در شکل 4 آورده شده است. طبق داده‌های موجود، بازالت/اپوکسی دارای مقاومت کششی 485 مگاپاسکال است، در حالی که بازالت/وینیل استر مقاومت کششی کمتری با مقدار 242 مگاپاسکال نشان می‌دهد. دلیل اصلی این موضوع به نسبت حجمی الیاف در نمونه‌ها مربوط می‌شود. با توجه به نقش اصلی الیاف در تحمل بار، نمونه بازالت/اپوکسی با نسبت حجمی الیاف 54٪ قابلیت تحمل نیروهای کششی بهتری را نسبت به نمونه بازالت/وینیل استر با نسبت حجمی الیاف 45٪ دارد. از طرفی دیگر، نوع رزین استفاده شده به دلیل نحوه انتقال بار و چسبندگی کامل الیاف (سازگاری با الیاف) نقش اساسی در خواص مکانیکی ایفا می‌کند. اپوکسی در مقایسه با وینیل استر چسبندگی بهتری با الیاف برقرار می‌کند. این موضوع باعث می‌شود که در کامپوزیت بازالت/وینیل استر، انتقال تنش از زمینه به الیاف به خوبی نمونه بازالت/اپوکسی انجام نشود که منجر به کاهش استحکام مکانیکی این نمونه می‌شود.

نحوه شکست نمونه بازالت/اپوکسی به‌طور معمول شکننده و ناگهانی بوده که با آزاد شدن سریع انرژی همراه است. این موضوع ناشی از سفتی بالاتر و رفتار ترد این ماده است. در حالی که بازالت/وینیل استر به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر، شکست تدریجی‌تری نشان داد و در طول آزمایش تغییر شکل بیشتری را از خود بروز داد.

نتایج خواص خمشی کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر در جدول 4 آورده شده است. این داده‌ها شامل ویژگی‌های مربوط به مقاومت خمشی، کرنش خمشی و مدول خمشی برای 5 نمونه مختلف است که تفاوت‌های بارز در عملکرد این دو کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی را نشان می‌دهند.

**جدول 4** فراوانی داده‌های آزمون خمشی برای کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و

بازالت/وینیل استر

**Table 4** Flexural test data frequency of basalt/epoxy and basalt/vinyl ester composites

ویژگی	بازالت/اپوکسی	بازالت/وینیل استر
تنش (MPa)	401, 385, 365, 345, 328	301, 287, 274, 260, 247
کرنش (mm/mm)	0.0286, 0.0275, 0.026, 0.0245, 0.0234	0.0385, 0.0375, 0.035, 0.033, 0.0315
مدول (GPa)	16.29, 15.30, 14.81, 14.02, 13.33	13.86, 13.05, 12.6, 11.75, 11.34

### 3-3- ضربه سرعت پایین

شکل 6 رفتار نیرو-زمان را برای کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر تحت ضربه سرعت پایین با انرژی 22.56 ژول نشان می‌دهد. این نمودار نحوه گسترش آسیب در این دو نوع کامپوزیت را برجسته می‌کند. در ضربات با سطوح انرژی پایین‌تر، نمودار نیرو-زمان معمولاً متقارن است که نشان‌دهنده پاسخ الاستیک و آسیب حداقلی در کامپوزیت است اما با افزایش سطح انرژی ضربه، نمودار غیرمتقارن‌تر شده و نوسانات بیشتری را نشان می‌دهد. این نوسانات به دلیل گسترش آسیب‌هایی مانند لایه‌لایه شدن، ترک خوردگی و شکست الیاف رخ می‌دهد. در این نمودار نیروی پیک برای نمونه بازالت/اپوکسی 3.22 کیلو نیوتن و برای بازالت/وینیل استر 3.17 کیلو نیوتن می‌باشد. نیروی پیک بالاتر در نمونه بازالت/اپوکسی نشان‌دهنده سفتی الاستیک بیشتر این نمونه است. این خواص باعث می‌شود تا نمونه بازالت/اپوکسی در برابر نیروی حاصل از ضربه مقاومت بیشتری داشته باشد. با این حال، نیروی پیک بالاتر لزوماً به معنای آسیب در نمونه نیست. رفتار نوسانی و غیرمتقارن نمونه بازالت/اپوکسی پس از پیک نیرو، نشان‌دهنده وجود آسیب در این نمونه است. همچنین مدت زمان ضربه بیشتر در نمونه بازالت/اپوکسی نسبت به نمونه بازالت/وینیل استر، احتمال ایجاد آسیب‌های بیشتر را نشان می‌دهد. در نمونه بازالت/اپوکسی، رفتار زیگزاگی پس از پیک نیرو، نشان‌دهنده آسیب‌هایی مانند ترک خوردگی، لایه‌لایه شدن و شکست الیاف است که این آسیب‌ها به‌صورت تدریجی انرژی ضربه را جذب می‌کنند. در مقابل، بازالت/وینیل استر رفتار متفاوتی پس از پیک نیرو نشان می‌دهد که بیانگر گسترش سریع‌تر اما ساده‌تر آسیب‌ها در این نمونه است. همچنین از شکل نمودار مشخص است که بخشی از انرژی جذب شده و بخشی از آن بصورت الاستیک باقی‌مانده است. این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب کامپوزیت باید بر اساس شرایط ضربه و نیازهای عملکردی خاص انجام شود.

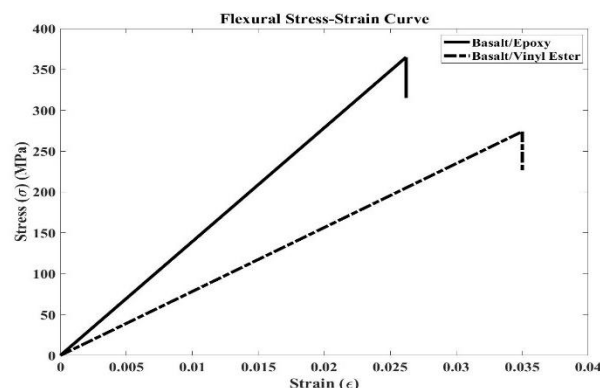
**جدول 3** فراوانی داده‌های آزمون کشش برای کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر

**Table 3** Tensile test data frequency of basalt/epoxy and basalt/vinyl ester composites

ویژگی	بازالت/اپوکسی	بازالت/وینیل استر
تنش (MPa)	533, 510, 485, 460, 436	266, 255, 242, 230, 218
کرنش (mm/mm)	0.0249, 0.0237, 0.0226, 0.0215, 0.0203	0.2344, 0.224, 0.2131, 0.199, 0.1918
مدول (GPa)	25.29, 24.48, 23.02, 21.50, 20.7	11.81, 11.32, 10.74, 9.90, 9.67

### 3-2- آزمون خمشی

نتایج خواص خمشی دو ماده بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر در شکل 5 آورده شده و تحلیل رفتار مکانیکی این دو ماده حاکی از تفاوت‌های بارز در عملکرد آن‌ها تحت بارگذاری خمشی است. تغییر شکل نمونه‌ها حین آزمون اندازه‌گیری و ثبت شد تا رفتار مکانیکی هر ماده به‌طور کامل تحلیل شود.



**Fig.5** Flexural properties of basalt/epoxy and basalt/vinyl ester

شکل 5 خواص خمشی دو ماده بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر

مطابق شکل 5، نمونه بازالت/اپوکسی دارای تنش خمشی 365 مگاپاسکال است که به‌طور قابل توجهی بیشتر از نمونه بازالت/وینیل استر با تنش خمشی 274 مگاپاسکال است. این نشان‌دهنده مقاومت بالاتر بازالت/اپوکسی در برابر بارگذاری خمشی است. بنابراین، در برابر بارهای خمشی، بازالت/اپوکسی از استحکام بیشتری برخوردار است و می‌تواند بار بیشتری را تحمل کند. این موضوع می‌تواند به نسبت حجمی بالای الیاف و سازگاری مناسب رزین اپوکسی با الیاف بازالت مربوط شود. از سوی دیگر، کرنش خمشی در بازالت/اپوکسی معادل 0.026 است در حالی که این مقدار در بازالت/وینیل استر 0.035 می‌باشد. این اختلاف نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بیشتر بازالت/وینیل استر است که بدلیل انعطاف‌پذیری رزین وینیل استر می‌باشد. به عبارت دیگر، بازالت/وینیل استر تحت بار خمشی تغییر شکل بیشتری را تجربه کرده و رفتار نرم‌تری نشان می‌دهد. علاوه بر این، مدول خمشی بازالت/اپوکسی برابر 25.29 گیگاپاسکال بوده که بیشتر از مدول نمونه بازالت/وینیل استر با مقدار 21.50 گیگاپاسکال می‌باشد. این نشان می‌دهد که بازالت/اپوکسی سفتی خمشی و تغییر شکل کمتری تحت بارگذاری خمشی دارد. در مقابل، بازالت/وینیل استر به دلیل مدول کمتر، نرم‌تر است و تغییر شکل بیشتری پیش از شکست دارد.

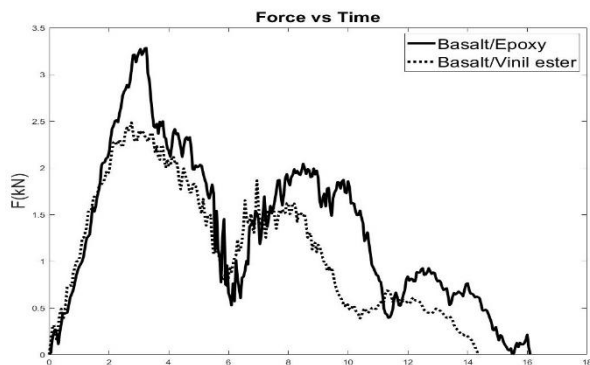


Fig. 7 Force-time diagram for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under impact energy of 33.84 Joules.

شکل 7 نمودار نیرو-زمان برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت ضربه با انرژی 33.84 ژول.

نوسانات پس از قله عمدتاً به دلیل گسترش آسیب در چندلایه و تخلیه انرژی قبل از بازگشت ضربه‌زننده اتفاق می‌افتد. در نمونه بازالت/وینیل استر، نیروی پیک حدود 2.7 کیلو نیوتن است. برخلاف نمونه بازالت/اپوکسی، رفتار این نمونه دارای نوسانات بزرگ با زیگزاگ‌های ریز است که نشان‌دهنده تفاوت در شکل آسیب‌ها است. این تفاوت به تاثیر نوع رزین مربوط می‌شود. نمونه‌های بازالت/وینیل استر، رفتار نرم‌تری نسبت به نمونه‌های بازالت/اپوکسی داشتند و این موضوع باعث تغییر در میزان قله نیرو، نوع و شکل آسیب‌ها شد.

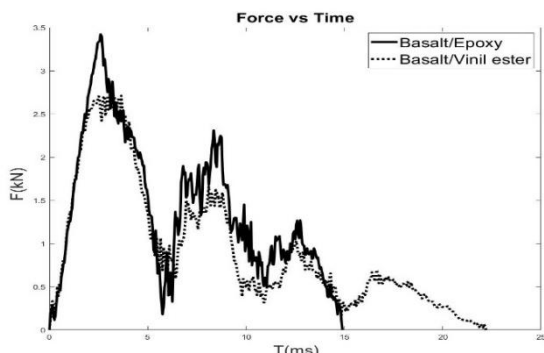


Fig. 8 Force-time diagram for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under impact energy of 45.12 Joules.

شکل 8 نمودار نیرو-زمان برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت ضربه با انرژی 45.12 ژول.

بطور کلی کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر تفاوت‌های قابل‌توجهی در رفتار ضربه و گسترش آسیب تحت سه سطح انرژی 22.56، 33.84 و 45.12 ژول نشان دادند. بازالت/اپوکسی در تمامی سطوح انرژی نیروی پیک بالاتری تجربه کرد که نشان‌دهنده مقاومت مکانیکی و سفتی الاستیک بیشتر این نمونه است. این خواص به نمونه بازالت/اپوکسی اجازه می‌دهد تا در برابر ضربه مقاومت بیشتری نشان دهد. با این حال، با افزایش سطح انرژی، رفتار زیگزاگی و نوسانات در نمونه بازالت/اپوکسی افزایش یافته و نشان‌دهنده گستردگی آسیب‌های داخلی مانند ترک‌خوردگی ماتریسی، جدایش بین‌لایه‌ای و شکست الیاف می‌باشد. نمونه بازالت/اپوکسی با وجود تحمل نیروی اولیه بیشتر، آسیب‌های داخلی شدیدتری را تجربه می‌کند که این موضوع به رزین اپوکسی و خاصیت ترد بودن نمونه مربوط می‌شود. در مقابل، بازالت/وینیل استر نیروی پیک کمتری تجربه کرد که بیانگر مقاومت مکانیکی پایین‌تر و

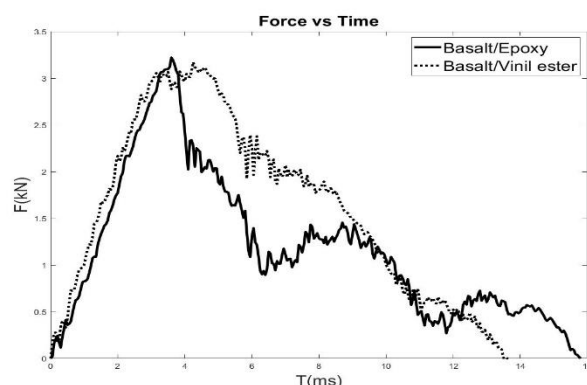


Fig. 6 Force-time diagram for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under impact energy of 22.56 Joules.

شکل 6 نمودار نیرو-زمان برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت ضربه با انرژی 22.56 ژول.

شکل 7 نشان‌دهنده رفتار نیرو-زمان کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر با انرژی 33.84 ژول است. بالا رفتن سطح انرژی ضربه، تأثیر قابل‌توجهی بر الگوی نمودار و گسترش آسیب در این دو نمونه داشته است. در بازالت/اپوکسی، نیروی پیک 3.2 کیلو نیوتن است. مطابق شکل، نیرو پس از رسیدن به پیک، افت ناگهانی بزرگی را تجربه می‌کند که این امر نشان‌دهنده شکست الیاف، لایه لایه شدن گسترده و آغاز پدیده نفوذ است. این موضوع به وضوح در شکل 18 نشان داده شده است. همچنین رفتار غیرمتقارن و زیگزاگی در نمودار مربوط به نمونه بازالت/اپوکسی بیانگر شدت آسیب‌های داخلی و گسترش پیچیده‌تر آن‌ها است. نوسانات بزرگ پس از پیک نیرو عمدتاً به دلیل گسترش آسیب در لایه‌های کامپوزیتی رخ می‌دهند. این ویژگی‌ها حاکی از آن است که نیروی اوج در این سطح انرژی برابر با نیروی آستانه آسیب عمده یا نیروی شکست لمینیت می‌باشد. در بازالت/وینیل استر، نیروی پیک 2.75 کیلو نیوتن است. شکل نمودار این نمونه و افت نیرو پس از قله، شبیه به نمونه بازالت/اپوکسی است با این تفاوت که پیک نیرو با نوسانات کمتری افت می‌کند. این رفتار نشان‌دهنده آسیب‌پذیری متفاوت این نمونه و گسترش ساده‌تر و منعطف‌تر آسیب‌ها است. در نمونه بازالت/وینیل استر، عدم وجود نوسانات قابل‌توجه پس از پیک نیرو نشان می‌دهد که آسیب‌ها در این ماده بیشتر با لایه‌لایه‌شدن غالب همراه است و الیاف کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. افزایش انرژی ضربه از 22.56 ژول به 33.84 ژول، زمان تماس را افزایش داده که این موضوع نشان می‌دهد شدت آسیب در هر دو کامپوزیت تشدید شده است. با این حال، در بازالت/اپوکسی، رفتار زیگزاگی و افت ناگهانی نیرو به دلیل سفتی الاستیک و خواص مکانیکی بالاتر این نمونه است. در مقابل، بازالت/وینیل استر به دلیل نوع ماتریس آن، آسیب‌ها را به شکلی دیگر تجربه می‌کند.

شکل 8، نمودار نیرو-زمان را برای کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر با سطح انرژی 45.12 ژول نمایش می‌دهد. این نمودار تأثیر سطح بالای انرژی ضربه‌زننده را بر گسترش آسیب‌ها و رفتار ضربه‌ای به‌وضوح نشان می‌دهد. با افزایش سطح انرژی ضربه به 45.12 ژول، نیروی قله و زمان تماس در هر دو کامپوزیت افزایش یافته است. در بازالت/اپوکسی، نیروی قله 3.4 کیلو نیوتن است و رفتار نوسانی شدیدی پس از قله نیرو مشاهده می‌شود. این نوسانات نشان‌دهنده گسترش آسیب‌های شدیدتر است. این رفتار زیگزاگی و افت‌های ناگهانی نیرو نشان می‌دهد که نیروی قله به نیروی آستانه آسیب عمده یا نیروی شکست لمینیت رسیده است.

این نمونه، توانایی محدود نمونه در بازگشت به حالت اولیه را نشان می‌دهد. به مانند بخش قبلی، طبیعت ترد اپوکسی باعث می‌شود که نمونه تهیه شده با این رزین، آسیب‌های دائمی بیشتری را تجربه کند و در بازگشت به حالت اولیه ناکام بماند. در مقابل، نمونه بازالت/وینیل استر جابجایی نهایی بیشتری (به میزان 25 میلی‌متر) دارد که بیانگر آسیب بیشتر در این نمونه است. عدم وجود بازگشت ارتجاعی در نمودار این نمونه نشان می‌دهد که بازالت/وینیل استر مانند شکل 9 قادر به بازگشت به حالت اولیه پس از ضربه نیست. این رفتار ناشی از بالا بودن سطح انرژی می‌باشد. وقتی مقدار انرژی از یک سطحی بالاتر می‌رود، در اثر ضربه، نمونه بصورت جدی آسیب می‌بیند و پدیده نفوذ و یا سوراخ شدن در نمونه اتفاق می‌افتد و در این حالت جنس رزین یا الیاف تاثیر آنچنانی در موضوع بازگشت الاستیک ندارند.

شکل 11 رفتار نیرو-جابجایی کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر را با انرژی 45.12 ژول نشان می‌دهد. در این سطح انرژی، هیچ‌کدام از نمونه‌ها بازگشت ارتجاعی نشان نمی‌دهند که بیانگر گسترش آسیب‌های عمده و کاهش توانایی بازگشت هر دو نمونه به حالت اولیه است. این رفتار نشان می‌دهد که انرژی ضربه عمدتاً صرف گسترش آسیب‌های داخلی شده و امکان بازیابی ارتجاعی از بین رفته است. نمونه بازالت/اپوکسی جابجایی نهایی 28.6 میلی‌متر را تجربه می‌کند که بیانگر آسیب‌های عمده در این نمونه است. با این حال، فقدان بازگشت ارتجاعی نشان‌دهنده این است که نمونه بازالت/اپوکسی بیشتر انرژی ضربه را جذب کرده و به صورت آسیب در ساختار خود بروز می‌دهد.

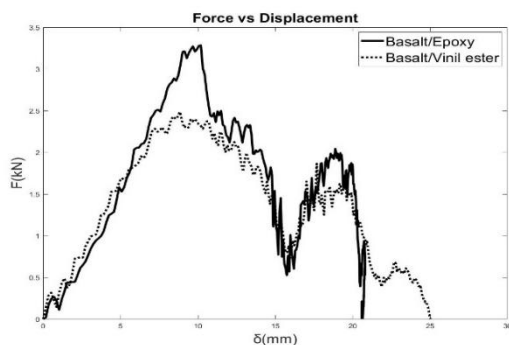


Fig. 10 Force-displacement diagram for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under impact energy of 33.84 Joules.

شکل 10 نمودار نیرو-جابجایی برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت ضربه با انرژی 33.84 ژول.

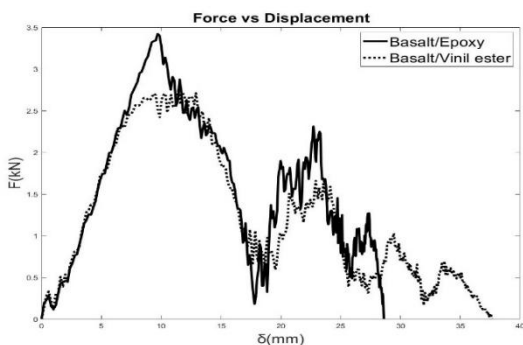


Fig. 11 Force-displacement diagram for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under impact energy of 45.12 Joules.

شکل 11 نمودار نیرو-جابجایی برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت ضربه با انرژی 45.12 ژول.

انعطاف‌پذیری بیشتر این نمونه در مقایسه با نمونه بازالت/اپوکسی است. نمودار بازالت/وینیل استر پس از پیک نیرو، رفتار متفاوتی نشان می‌دهد که ناشی از تفاوت شکل آسیب‌ها است. در این ماده، وجود نوسانات با زیگزاگ‌های ریز نشان‌دهنده تفاوت در نوع آسیب‌های داخلی است. نمونه بازالت/وینیل استر در انرژی‌های بالاتر تغییر شکل بیشتری را تجربه می‌کند. به طور کلی، بازالت/اپوکسی با نیروی پیک بالاتر، جذب انرژی بیشتر و مقاومت اولیه بهتر، برای کاربردهایی که نیاز به تحمل بارهای ضربه‌ای سنگین و کاهش تغییر شکل دارند، مناسب‌تر است، اما آسیب‌های پیچیده‌تر و گسترده‌تری در ساختار داخلی آن ایجاد می‌شود. در مقابل، بازالت/وینیل استر با انعطاف‌پذیری بیشتر، گسترش آسیب یکنواخت‌تر و تغییر شکل بالاتر، گزینه‌ای مناسب‌تر برای کاربردهایی است که در معرض نیروهای ضربه‌ای پایین‌تری قرار دارند.

شکل 9 رفتار نیرو-جابجایی کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر را تحت انرژی 22.56 ژول نشان می‌دهد. در بازالت/اپوکسی جابجایی حدود 14.5 میلی‌متر است که بیانگر آسیب بیشتر در این نمونه در مقایسه با نمونه بازالت/وینیل استر است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود بازگشت ارتجاعی یا ریباند در این نمونه بسیار کم است که نشان‌دهنده کاهش توانایی بازگشت نمونه با زمینه اپوکسی به حالت اولیه است. بیشتر انرژی ضربه در بازالت/اپوکسی صرف گسترش آسیب‌های داخلی مانند لایه‌لایه شدن و ترک خوردگی می‌شود. طبیعت ترد اپوکسی باعث می‌شود که نمونه تهیه شده با این رزین، آسیب‌های دائمی بیشتری را تجربه کند و در بازگشت به حالت اولیه ناکام بماند. در مقابل، برای نمونه بازالت/وینیل استر، جابجایی نهایی حدود 8.5 میلی‌متر است که نشان‌دهنده ویژگی متفاوت این نمونه در برابر گسترش آسیب است. این نمونه دارای بازگشت ارتجاعی قابل توجهی است که نشان‌دهنده توانایی بهتر آن در بازگشت به حالت اولیه پس از ضربه است. این رفتار ناشی از خاصیت انعطاف‌پذیری رزین وینیل استر است که امکان بازیابی انرژی ضربه را فراهم می‌کند و گسترش آسیب‌های داخلی را محدودتر می‌سازد. بنابراین در این سطح انرژی، بازالت/وینیل استر با جابجایی کمتر و بازگشت ارتجاعی بزرگ‌تر، نمونه‌ای است که بهتر می‌تواند تغییرات ناشی از ضربه را کنترل کرده و آسیب کمتری را تجربه کند.

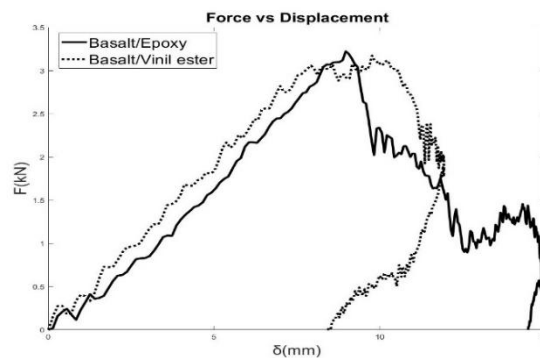


Fig. 9 Force-displacement diagram for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under impact energy of 22.56 Joules.

شکل 9 نمودار نیرو-جابجایی برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت ضربه با انرژی 22.56 ژول.

در شکل 10 رفتار نیرو-جابجایی کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر تحت انرژی 33.84 ژول مشاهده می‌شود. در نمونه بازالت/اپوکسی جابجایی نهایی 20.6 میلی‌متر است که نشان‌دهنده خاصیت این نمونه در برابر گسترش آسیب می‌باشد. بازگشت ارتجاعی مشاهده شده در

بازالت/اپوکسی پس از رسیدن به حداکثر انرژی وارد حالت پایدار می‌شود و هیچ‌گونه انرژی الاستیک در این ماده نیز مشاهده نمی‌شود. عدم وجود انرژی الاستیک نشان می‌دهد که تمامی انرژی جذب‌شده در این نمونه نیز صرف گسترش آسیب‌های داخلی مانند ترک‌ها و لایه‌لایه شدن شده است. در مقایسه، بازالت/اپوکسی به دلیل جذب انرژی بیشتر و مدت زمان طولانی‌تر برای جذب، مقاومت بالاتری در برابر ضربه اولیه دارد. با این حال، نبود بازگشت الاستیک در بازالت/اپوکسی نشان‌دهنده آن است که تمامی انرژی جذب‌شده صرف گسترش آسیب‌های پیچیده و گسترده‌تر در ساختار ماده شده است. در مقابل، بازالت/وینیل استر با جذب انرژی کمتر و مدت زمان کوتاه‌تر برای جذب، آسیب‌های یکنواخت‌تر و ساده‌تری را تجربه می‌کند، اما همانند نمونه بازالت/اپوکسی، تمامی انرژی جذب‌شده صرف ایجاد آسیب داخلی شده و بازگشتی وجود ندارد.

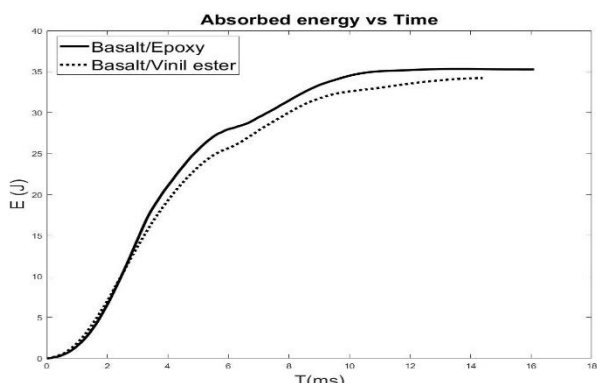


Fig. 13 Energy-time curves for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under a load of 33.84 joules.

شکل 13 نمودار انرژی جذب شده-زمان برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت بارگذاری با انرژی 33.84 ژول.

شکل 14 روند جذب انرژی ضربه و گسترش آسیب را در کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر با سطح انرژی 45.12 ژول نشان می‌دهد. در بازالت/اپوکسی، انرژی جذب‌شده به مقدار حدود 46.44 ژول می‌رسد و پس از این نقطه، نمودار وارد حالت پایدار می‌شود. این حالت پایدار نشان‌دهنده گسترش آسیب‌های داخلی و جذب کامل انرژی ضربه است. عدم وجود انرژی الاستیک حاکی از آن است که تمامی انرژی جذب‌شده صرف ایجاد ترک خوردگی، لایه‌لایه شدن و سایر آسیب‌های پیچیده در ساختار ماده شده است. در مقابل، بازالت/وینیل استر انرژی کمتری جذب کرده و مقدار آن به حدود 46.51 ژول می‌رسد. این ماده نیز پس از رسیدن به حداکثر انرژی، وارد حالت پایدار می‌شود. عدم وجود انرژی الاستیک در این نمونه نیز نشان می‌دهد که تمامی انرژی جذب‌شده صرف گسترش ترک‌ها و آسیب‌های داخلی شده است. در سطح انرژی 45.12 ژول، بازالت/اپوکسی به دلیل جذب سریع‌تر انرژی و مقاومت مکانیکی بالا، برای تحمل بارهای اولیه شدید مناسب‌تر است، اما گسترش آسیب در آن پیچیده‌تر است. بازالت/وینیل استر با جذب تدریجی‌تر انرژی و مدت زمان طولانی‌تر، برای شرایطی مناسب‌تر است که گسترش آسیب‌های ساده‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتری مورد نیاز باشد.

شکل‌های 15 تا 20 شکل مربوط به آسیب سطح نمونه‌ها را در سطوح مختلف انرژی از نمای بالا و جانبی برش خورده نشان می‌دهند. در نمونه بازالت/وینیل استر (شکل 15) با سطح انرژی 22.56 ژول، ترک‌های ماتریسی و لایه لایه شدن به صورت محدود مشاهده می‌شود. ساختار نمونه به دلیل رفتار رزین در سطح انرژی پایین، بازگشت ارتجاعی داشته و گسترش ترک‌ها تا حدی

مطابق شکل، جایجایی نهایی در نمونه بازالت/وینیل استر 37.6 میلی‌متر می‌باشد که نشان‌دهنده گسترش بیشتر آسیب در این نمونه است. وینیل استر، با ساختاری انعطاف‌پذیرتر اما مقاومت مکانیکی پایین‌تر، تحت این سطح انرژی دچار آسیب‌های گسترده‌تری مانند لایه‌لایه شدن شدید و ترک‌های بزرگ‌تر می‌شود. فقدان بازگشت ارتجاعی در این نمونه نیز نشان‌دهنده این است که انرژی ضربه به‌طور کامل صرف گسترش آسیب‌ها شده است.

شکل 12 روند جذب انرژی ضربه و گسترش آسیب در کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر را نشان می‌دهد. بازالت/اپوکسی انرژی جنبشی بیشتری را جذب کرده و به مقدار 23.41 ژول می‌رسد. پس از رسیدن به این مقدار، نمودار به یک حالت پایدار وارد می‌شود که نشان‌دهنده گسترش آسیب‌های داخلی در ساختار ماده است. عدم وجود انرژی الاستیک در نمودار اپوکسی حاکی از آن است که تمامی انرژی ضربه صرف ایجاد و گسترش ترک‌ها، لایه‌لایه شدن و سایر آسیب‌های داخلی شده است. همچنین، مدت زمان جذب انرژی در اپوکسی طولانی‌تر است که نشان می‌دهد انرژی ضربه فرصت بیشتری برای ایجاد آسیب داشته است. در مقابل، بازالت/وینیل استر انرژی کمتری جذب کرده و به مقدار 21.04 ژول می‌رسد. این ماده در نمودار یک بازگشت الاستیک کوچک را نشان می‌دهد که بیانگر بازگشت بخشی از انرژی جذب‌شده به منبع ضربه است. وجود بازگشت الاستیک نشان می‌دهد که وینیل استر تا حدی توانایی بازگشت به حالت اولیه پس از ضربه را دارد. در مقایسه کلی، بازالت/اپوکسی با جذب انرژی بیشتر، آسیب بیشتری می‌بیند. نبود انرژی الاستیک نشان می‌دهد که تمامی انرژی جذب‌شده صرف ایجاد و گسترش آسیب‌های داخلی شده است. بازالت/وینیل استر با جذب انرژی کمتر و وجود انرژی الاستیک، آسیب‌های کمتری را نسبت به نمونه بازالت/اپوکسی تجربه می‌کند و توانایی نسبی برای بازگشت به حالت اولیه دارد.

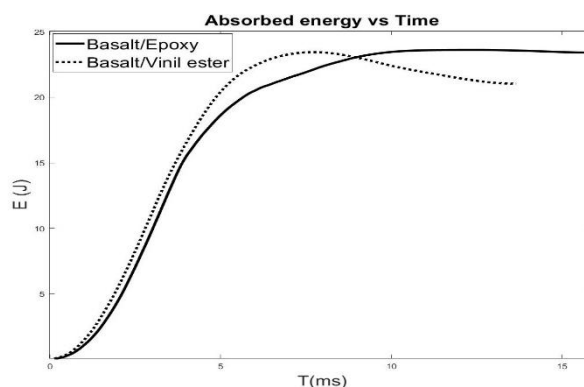
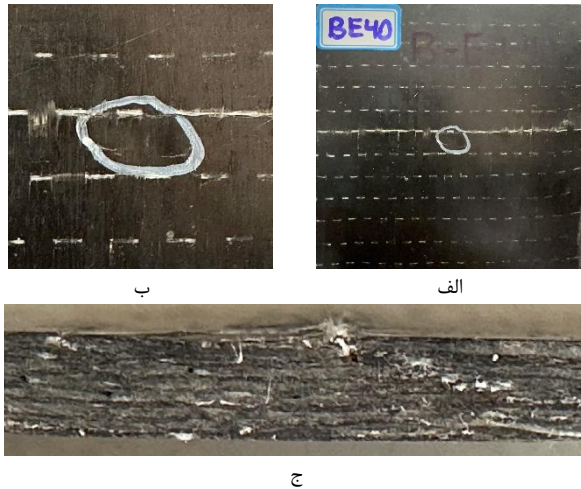


Fig. 12 Energy-time curves for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under a load of 22.56 joules.

شکل 12 نمودار انرژی جذب شده-زمان برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت بارگذاری با انرژی 22.56 ژول.

شکل 13 روند جذب انرژی ضربه و گسترش آسیب در کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر را تحت انرژی 33.84 ژول نشان می‌دهد. در بازالت/اپوکسی، انرژی جنبشی بیشتری جذب می‌شود و مقدار آن به 35.27 ژول می‌رسد. پس از رسیدن به این مقدار، نمودار وارد حالت پایدار می‌شود که نشان‌دهنده جذب کامل انرژی و گسترش آسیب‌های داخلی است. عدم وجود انرژی الاستیک در این ماده بیانگر آن است که تمامی انرژی جذب‌شده صرف گسترش آسیب‌های داخلی است. در مقابل، بازالت/وینیل استر انرژی کمتری جذب کرده و مقدار آن به 34.21 ژول می‌رسد. نمودار این نمونه نیز مانند نمونه

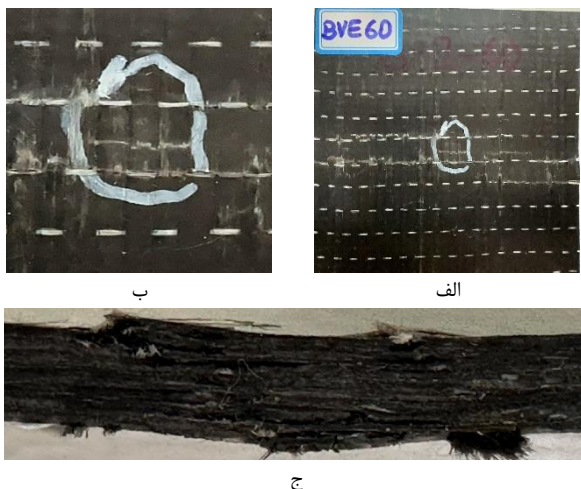
ماتریس وینیل استر در برابر این سطح انرژی از ضربه است. علاوه بر این با توجه به نمای جانبی برش خورده، لایه لایه شدن در این سطح انرژی به طور گسترده‌تر رخ داده و ساختار الیاف دچار شکست‌های جدی شده است. رفتار ماتریس وینیل استر در این شرایط توانایی مهار گسترش آسیب‌ها را نداشته است. این شکل‌ها گویای آسیب‌پذیری بیشتر بازالت/وینیل استر در برابر ضربات با انرژی بالاتر است.



**Fig. 16** Surface damage of the basalt/epoxy sample with an energy of 22.56 J: a) Front view. b) Close-up front view. c) Cross-sectional side view.

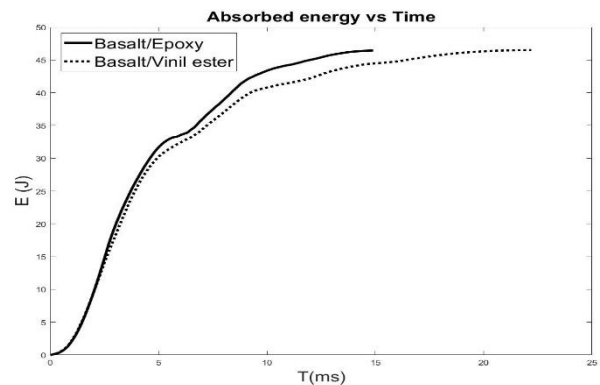
شکل 16 آسیب سطح نمونه بازالت/اپوکسی با انرژی 22.56 ژول: الف) نمای روبه‌رو. ب) نمای نزدیک از روبه‌رو. ج) نمای جانبی برش خورده محل ضربه.

مطابق شکل 18، نمونه بازالت/اپوکسی رفتار ترد تری در سطح انرژی 33.84 ژول از خود نشان داد. سطح این نمونه حاوی ترک‌های ماتریسی و شکستگی الیاف است. این رفتار حاکی از توانایی بالای ماتریس اپوکسی در جذب و توزیع انرژی ضربه است. در قسمت جانبی برش خورده آسیب‌های قابل توجهی همچون لایه لایه شدن و شکست الیاف قابل مشاهده است. این شکل صحت تفاسیر بیان شده در نمودارهای نیرو-زمان و انرژی-زمان را نشان می‌دهد.



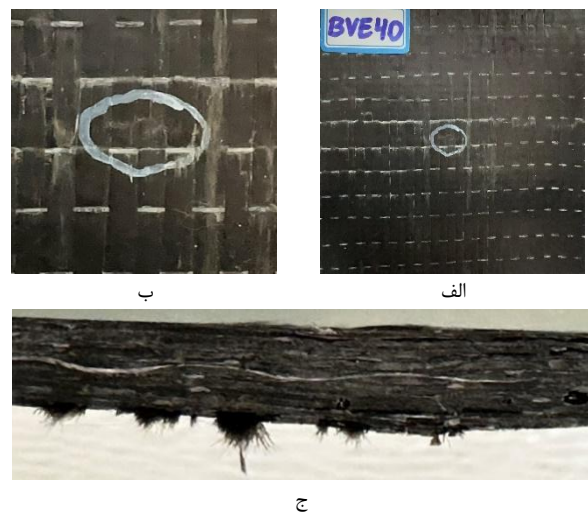
**Fig. 17** Surface damage of the basalt/vinyl ester sample with an energy of 33.84 J: a) Front view. b) Close-up front view. c) Cross-sectional side view.

و نه بصورت کامل مهار شده و این امر باعث کاهش مناطق آسیب‌دیده شده است. در نمای جانبی که بصورت برش خورده از محل ضربه نشان داده شده، لایه لایه شدن به وضوح مشخص است.



**Fig. 14** Energy-time curves for basalt/vinyl ester and basalt/epoxy composites under a load of 45.12 joules.

شکل 14 نمودار انرژی جذب شده-زمان برای کامپوزیت‌های بازالت/وینیل استر و بازالت/اپوکسی تحت بارگذاری با انرژی 45.12 ژول.



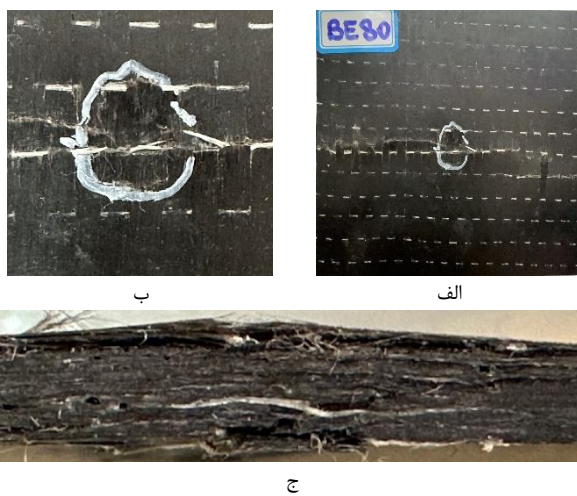
**Fig. 15** Surface damage of the basalt/vinyl ester sample with an energy of 22.56 J: a) Front view. b) Close-up front view. c) Cross-sectional side view.

شکل 15 آسیب سطح نمونه بازالت/وینیل استر با انرژی 22.56 ژول: الف) نمای روبه‌رو. ب) نمای نزدیک از روبه‌رو. ج) نمای جانبی برش خورده محل ضربه.

مطابق شکل 16، نمونه بازالت/اپوکسی آسیب نسبتاً بیشتری در برابر ضربه با سطح انرژی 22.56 ژول از خود نشان می‌دهد. ترک‌های ماتریسی این نمونه در سطح نمونه ظاهر شدند که گستردگی آن‌ها بیشتر از نمونه بازالت/وینیل استر است. در نمای جانبی برش خورده، لایه لایه شدن و ترک‌خوردگی ماتریس مشخص است. این موضوع نشان‌دهنده توانایی بالای رزین اپوکسی در جذب انرژی ضربه است که باعث گسترش بیشتر آسیب می‌شود.

مطابق شکل 17، نمونه بازالت/وینیل استر در سطح انرژی 33.84 ژول آسیب‌های گسترده‌تری نسبت به انرژی 22.56 ژول از خود نشان داد. در سطح این نمونه، ترک‌های ماتریسی به وضوح گسترش یافته و ساختار ماتریس به طور قابل توجهی دچار تغییرات شده است. این ترک‌ها نه تنها در نواحی سطحی بلکه در عمق ماده نیز قابل مشاهده هستند و نشانه‌ای از کاهش مقاومت

**شکل 19** آسیب سطح نمونه بازالت/وینیل استر با انرژی 45.12 ژول: الف) نمای روبه‌رو. ب) نمای نزدیک از روبه‌رو. ج) نمای جانبی برش خورده محل ضربه. همانطور که در شکل 20 نشان داده شده، نمونه بازالت/اپوکسی نیز در سطح بالای انرژی ضربه، دچار تخریب اساسی شده است. در سطح این نمونه، ترک‌های ماتریسی و شکستگی الیاف قابل مشاهده هستند که نشان می‌دهند ماتریس اپوکسی انرژی ضربه را به صورت مؤثرتری جذب و به دلیل بالا بودن سطح انرژی و عدم بازگشت الاستیک این انرژی را صرف تخریب نمونه کرده است. در نمای جانبی نمونه، آسیب‌ها به صورت لایه لایه شدن شدید و شکستگی الیاف مشاهده می‌شوند. این الگوی آسیب نشانگر آسیب‌های داخلی می‌باشند. در نمونه بازالت/اپوکسی نمونه به اندازه کافی آسیب دیده که نمودار انرژی - زمان نیز این موضوع را تأیید کرد ولی مقدار تغییر شکل در این نمونه به اندازه نمونه بازالت/وینیل استر نبود که این موضوع ماهیت و رفتار دو رزین اپوکسی و وینیل استر را مشخص می‌کند.



**Fig. 20** Surface damage of the basalt/epoxy sample with an energy of 45.12 J: a) Front view. b) Close-up front view. c) Cross-sectional side view.

**شکل 20** آسیب سطح نمونه بازالت/اپوکسی با انرژی 45.12 ژول: الف) نمای روبه‌رو. ب) نمای نزدیک از روبه‌رو. ج) نمای جانبی برش خورده محل ضربه.

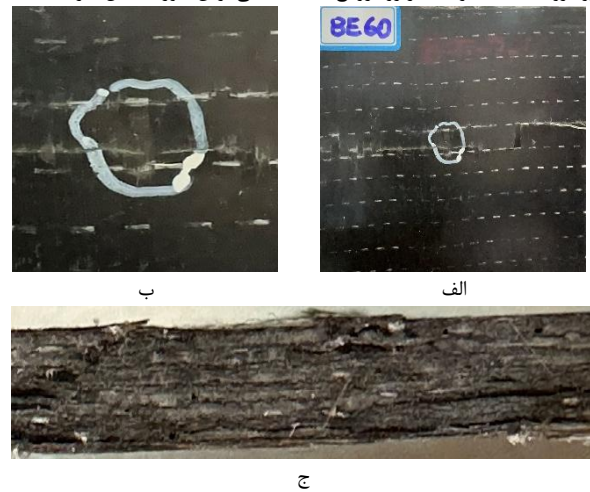
#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر تحت آزمون‌های کشش، خمش و ضربه سرعت پایین بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

- کسر حجمی الیاف در کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر به ترتیب 54٪ و 45٪ تعیین شد. این تفاوت به دلیل ویژگی‌های مختلف اپوکسی و وینیل استر، در فرآیند ساخت حاصل گردید. به دلیل گرانی‌تر رزین اپوکسی در مقایسه با رزین وینیل استر و خارج شدن بیشتر رزین اپوکسی از نمونه، مقدار کسر حجمی الیاف در نمونه بازالت/اپوکسی در شرایط یکسان بیشتر شد.

- کامپوزیت بازالت/اپوکسی استحکام کششی 485 مگاپاسکال و مدول 23 گیگاپاسکال را نشان داد که این موضوع می‌تواند به نسبت حجمی بالای الیاف و خواص رزین از جمله نحوه انتقال تنش و میزان سازگاری رزین با الیاف بازالت مربوط شود. در مقابل، استحکام کششی نمونه بازالت/وینیل استر 242 مگاپاسکال و مدول 10.74 بدست آمد ولی این نمونه دارای انعطاف‌پذیری بیشتری بود.

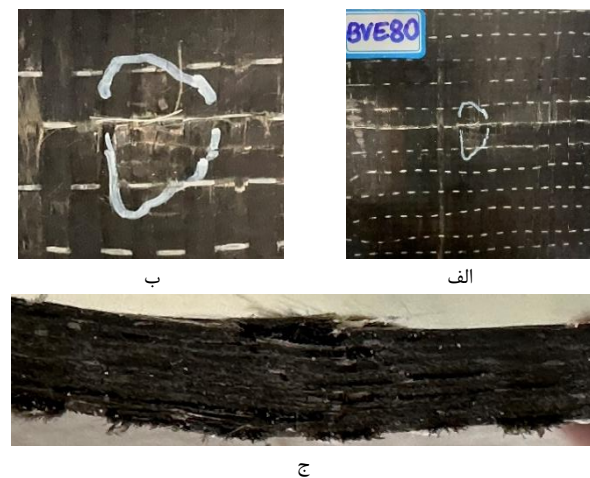
**شکل 17** آسیب سطح نمونه بازالت/وینیل استر با انرژی 33.84 ژول: الف) نمای روبه‌رو. ب) نمای نزدیک از روبه‌رو. ج) نمای جانبی برش خورده محل ضربه.



**Fig. 18** Surface damage of the basalt/epoxy with an energy of 33.84 J: a) Front view. b) Close-up front view. c) Cross-sectional side view.

**شکل 18** آسیب سطح نمونه بازالت/اپوکسی با انرژی 33.84 ژول: الف) نمای روبه‌رو. ب) نمای نزدیک از روبه‌رو. ج) نمای جانبی برش خورده محل ضربه.

مطابق شکل 19 در نمونه بازالت/وینیل استر، ترک‌های ماتریسی به صورت گسترده و عمیق در سطح نمونه قابل مشاهده هستند. این ترک‌ها در اثر ضربه با انرژی 45.12 ژول به نواحی بزرگ‌تری گسترش یافته و نشان‌دهنده ناتوانی ماتریس وینیل استر در جذب مؤثر انرژی ضربه و توزیع یکنواخت تنش‌های ناشی از آن است. در این نمونه، لایه لایه شدن در سطح به وضوح دیده می‌شود و این جدایش نه تنها به مناطق آسیب‌دیده محدود نمی‌ماند، بلکه به صورت پیوسته به نواحی مجاور سرایت کرده است. ساختار نمونه پس از ضربه، به دلیل رفتار انعطاف‌پذیر ماتریس وینیل استر دچار تغییر شکل و خمیده شده است. در نمای جانبی نمونه، لایه لایه شدن عمیق و ترک‌های بزرگ‌تری نیز قابل شناسایی هستند. این رفتار نشان‌دهنده انتقال نیروی ضربه به عمق ساختار و ضعف قابل توجه ماتریس در مدیریت اثرات ضربه است. در مجموع، تخریب گسترده و عمیق این نمونه بیانگر آن است که ماتریس وینیل استر در این سطح انرژی ضربه به طور کامل کارایی خود را از دست داده و ساختار ماده آسیب‌پذیر شده است. در این حالت تغییر شکل پلاستیکی قابل توجهی در نمونه ایجاد شد.



**Fig. 19** Surface damage of the basalt/vinyl ester sample with an energy of 45.12 J: a) Front view. b) Close-up front view. c) Cross-sectional side view.

$\delta_i$	جابه‌جایی اولیه جسم ( $m$ )
زیرنویس‌ها	
0	اولیه
$i$	مقدار اولیه
$a$	جذب شده
$f$	خمشی
$g$	گیج

## 6- مراجع

- [1] Taheri-Behrooz, F., Torabia, M., "Low-Velocity Impact Performance of the Carbon/Epoxy Plates Exposed to the Cyclic Temperature" *Steel and Composite Structures*, Vol. 48, No. 3, pp. 305-320, 2023.
- [2] Sadighi, M., Alderliesten, R., "Impact Fatigue, Multiple and Repeated Low-Velocity Impacts on Frp Composites: A Review" *Composite Structures*, Vol. 297, pp. 115962, 2022.
- [3] Mani, M., Thiyagu, M., Krishnan, P. K., "Review of the Effects of Low-Velocity Impact Events on Advanced Fiber-Reinforced Polymer Composite Structures" *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [4] Rojas-Sanchez, F., Waas, A. M., "Microscale Experimental Results and Their Implications for Mesoscale Modeling of Damage Initiation in Cross-Ply Fiber Reinforced Composites" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 257, pp. 110663, 2023.
- [5] Ma, B., Feng, Y., He, Y., Yang, F., Zhang, T., Fan, X., "Effects of Hygrothermal Environment on the Shear Behavior of Composite Stiffened Panels" *Composite Structures*, Vol. 258, pp. 113341, 2021.
- [6] Banik, A., Zhang, C., Panyathong, D., Tan, K., "Effect of Equienergetic Low-Velocity Impact on Cfrp with Surface Ice in Low Temperature Arctic Conditions" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 236, pp. 109850, 2022.
- [7] Katunin, A., Pawlak, S., Wronkiewicz-Katunin, A., Tutajewicz, D., "Damage Progression in Fibre Reinforced Polymer Composites Subjected to Low-Velocity Repeated Impact Loading" *Composite Structures*, Vol. 252, pp. 112735, 2020.
- [8] Maharshi, K., Patel, S., "Experimental and Numerical Analysis of Lightweight Hybrid Composites under Low Velocity Impact" *Applied Composite Materials*, pp. 1-20, 2024.
- [9] Azimpour-Shishevan, F., Mohtadi-Bonab, M., Akbulut, H., Rahmatinejad, B., "Low Velocity Impact Behavior of Twill Basalt/Epoxy Composites Modified by Graphene Nanoparticles" *Journal of Composite Materials*, Vol. 57, No. 8, pp. 1379-1394, 2023.
- [10] Ma, B., Cao, X., Feng, Y., Song, Y., Yang, F., Li, Y., Zhang, D., Wang, Y., He, Y., "A Comparative Study on the Low Velocity Impact Behavior of Ud, Woven, and Hybrid Ud/Woven Frp Composite Laminates" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 271, pp. 111133, 2024.
- [11] Found, M., Howard, I., "Single and Multiple Impact Behaviour of a Cfrp Laminate" *Composite structures*, Vol. 32, No. 1-4, pp. 159-163, 1995.
- [12] Ezeckiel Amouzou, A. S., Sicot, O., Chettah, A., Aivazzadeh, S., "Experimental Characterization of Composite Laminates under Low-Velocity Multi-Impact Loading" *Journal of composite materials*, Vol. 53, No. 17, pp. 2391-2.2019, 405
- [13] Lei, Z., Ma, J., Sun, W., Yin, B., Liew, K., "Low-Velocity Impact and Compression-after-Impact Behaviors of Twill Woven Carbon Fiber/Glass Fiber Hybrid Composite Laminates with Flame Retardant Epoxy Resin" *Composite Structures*, Vol. 32, 1pp. 117253, 2023.

- در آزمون خمشی، کامپوزیت بازالت/اپوکسی با استحکام خمشی 365 مگاپاسکال و مدول خمشی 14.81 گیگاپاسکال عملکرد بهتری داشت در حالیکه بازالت/وینیل استر با استحکام خمشی 274 مگاپاسکال و مدول خمشی 12.6 گیگاپاسکال تغییر شکل بیشتری را تحمل کرد.

- در آزمون ضربه با سه سطح انرژی، نمونه بازالت/اپوکسی در تمامی سطوح انرژی نیروی اوج بالاتری را نشان داد. این ماده در سطح انرژی بالا نیروی اوج حدود 3.4 کیلو نیوتن را ثبت کرد.

- در سطح پایین انرژی، نمونه بازالت/اپوکسی جابجایی 14.5 میلی‌متر و نمونه بازالت/وینیل استر جابجایی 8.5 میلی‌متر را نشان دادند. با افزایش انرژی تا 45.12 ژول، جابجایی نهایی بازالت/اپوکسی به 28.6 میلی‌متر و بازالت/وینیل استر به 37.6 میلی‌متر رسید. این موضوع به خاطر تفاوت خواص رزین‌های اپوکسی و وینیل استر در مواجهه با سطوح مختلف انرژی مربوط می‌شد.

- بازالت/اپوکسی انرژی بیشتری در تمامی سطوح جذب کرد ولی تمامی انرژی جذب شده، صرف گسترش آسیب‌ها شد و بازگشت الاستیک در این نمونه مشاهده نشد. بازالت/وینیل استر نیز در سطوح بالای انرژی، انرژی بیشتری جذب کرد اما بازگشت الاستیک کمتری در سطح انرژی 22.56 ژول مشاهده شد که نشان‌دهنده توانایی محدود آن در بازگشت به حالت اولیه است.

به طور کلی، بازالت/اپوکسی به دلیل استحکام و مدول بالاتر برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت بالا دارند، مناسب‌تر است. در مقابل، بازالت/وینیل استر با انعطاف‌پذیری بیشتر و گسترش یکنواخت‌تر آسیب‌ها، برای کاربردهایی که نیاز به جذب انرژی و تغییر شکل‌های بزرگ دارند گزینه بهتری است.

## 5- فهرست علائم

$E$	مدول یانگ ( $Nm^{-2}$ )
$P$	نیرو ( $Nm^{-2}$ )
$A_0$	سطح مقطع اولیه
$\Delta L$	تغییر طول ( $m$ )
$L_g$	طول گیج ( $m$ )
$b$	عرض مقطع تیر ( $m$ )
$d$	ضخامت مقطع تیر ( $m$ )
$D$	گشتاور انحنای تیر ( $N.m^2$ )
$L$	طول تیر ( $m$ )
$v(t)$	سرعت جسم در زمان ( $m/s$ )
$v_i$	سرعت اولیه جسم ( $m/s$ )
$g$	شتاب جاذبه زمین ( $m/s^2$ )
$t$	زمان ( $s$ )
$F(t)$	نیروی وارد بر جسم در زمان ( $N$ )
$m$	جرم جسم ( $Kg$ )
$E_d(t)$	انرژی جذب شده ( $J$ )
علائم یونانی	
$\sigma$	تنش ( $Nm^{-2}$ )
$\sigma_f$	تنش خمشی ( $Nm^{-2}$ )
$\epsilon$	کرنش
$\epsilon_f$	کرنش خمشی
$\delta(t)$	جابه‌جایی جسم در زمان ( $m/s$ )

- [14] Wu, Q., Chen, X., Fan, Z., Jiang, Y., Nie, D., "Experimental and Numerical Studies of Impact on Filament-Wound Composite Cylinder" *Acta mechanica solida sinica*, Vol. 30, pp. 540-549, 2017.
- [15] Shishevan, F. A., Akbulut, H., Mohtadi-Bonab, M., "Low Velocity Impact Behavior of Basalt Fiber-Reinforced Polymer Composites" *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 26, pp. 2890-2900, 2017.
- [16] Blanc-Vannet, P., "Burst Pressure Reduction of Various Thermoset Composite Pressure Vessels after Impact on the Cylindrical Part" *Composite Structures*, Vol. 160, pp. 706-711, 2017.
- [17] Taheri, F., Llanos, J. R., "Comparative Performance of Kevlar, Glass and Basalt Epoxy-and Elixir-Based Composites under Static-, Low-and High-Velocity Loading Scenarios—Introduction to an Effective Recyclable and Eco-Friendly Composite" *Polymers*, Vol. 16, No. 11, pp. 1494, 2024.
- [18] Paknejada, R., Ashenai Ghasemi, F., Malekzadeh Fard, K., "Response of Fully-Clamped Composite Laminated Plate Subjected to Low-Velocity Impact by Using Galerkin Method" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 45-50, 2014.
- [19] 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.
- [20] Mirzaei, J., Taghipoor, H., "Experimental Investigation of Glass/Hemp Hybrid Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading" *Journal of Aeronautical Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 136-125, 2022.
- [21] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of Astm Standard, 06.04, D 3039m-08, 2017.
- [22] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of Astm Standard, 06.04, D 790-17, 2017.
- [23] 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.