



## بررسی تأثیر الیاف شیشه، بازالت و ترکیب آن‌ها بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی چندلایه‌های الیافی - فلزی با پایه آلیاژ آلومینیوم 5052

پویا پرونده<sup>1</sup>، محسن حامدی<sup>2\*</sup>، هادی رزقی ملکی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده‌گان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بناب، بناب، تهران، صندوق پستی 14399-57131، mhamedi@ut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این پژوهش اهمیت چندلایه‌های الیافی-فلزی به‌عنوان نسل نوین مواد مهندسی با ویژگی‌هایی همچون استحکام بالا، شکل‌پذیری مناسب و مقاومت مطلوب در برابر آسیب بررسی شده است. این ساختارها به‌دلیل عملکرد ترکیبی فلز و کامپوزیت، در صنایع دریایی و هوافضا کاربرد گسترده‌ای دارند. سه نوع چندلایه شامل گلر، بارال و یک نمونه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم با آرایش ثابت FML 5-3/2 ساخته شدند. لایه‌های فلزی از آلومینیوم آلیاژ 5052-H32 و لایه‌های کامپوزیتی از الیاف شیشه، بازالت و ترکیب شیشه/بازالت در زمینه رزین وینیل‌استر تهیه گردیدند. به‌منظور ارزیابی رفتار مکانیکی، آزمون‌های کشش، خمش و ضربه سرعت پایین در سه سطح انرژی انجام شد. نتایج نشان داد گلر بیشترین استحکام کششی با 315 مگاپاسکال را داشته و بارال با 281 مگاپاسکال رفتار تردتری از خود نشان داد، در حالی که نمونه ترکیبی با 287 مگاپاسکال عملکرد میانی ارائه کرد. در خمش، تنش بیشینه برای گلر 285، بارال 250 و نمونه ترکیبی 227 مگاپاسکال به دست آمد. در آزمون ضربه نیز جذب انرژی عمدتاً ناشی از تغییر شکل پلاستیک آلومینیوم و جدایش بین‌لایه‌ای بود. به‌کارگیری رزین وینیل‌استر به‌جای اپوکسی رایج و استفاده از آلیاژ آلومینیوم 5052-H32 همراه با نمونه ترکیبی شیشه/بازالت، مسیری متفاوت از رویکردهای مرسوم ایجاد کرده است که مقایسه نتایج نشان می‌دهد این انتخاب‌ها نقش قابل توجهی در تغییر رفتار مکانیکی و ظرفیت جذب انرژی دارند.

دریافت: 1404/04/21

پذیرش: 1404/07/15

### کلیدواژگان

گلر،

بارال،

چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت - آلومینیوم،

ضربه سرعت پایین،

جذب انرژی

## Investigation of glass, basalt, and hybrid fibers effect on the mechanical behavior and energy absorption of fiber-metal laminates based on 5052 aluminum alloy

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

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

\* P.O.B. 14399-57131, mhamedi@ut.ac.ir

### Keywords

GLARE, BARAL, Hybrid Glass Basalt Aluminum Laminate, Low velocity impact, Energy absorption

### Abstract

In this study, the significance of fiber-metal laminates (FMLs) as a new generation of engineering materials with superior properties such as high strength, good ductility, and enhanced damage resistance was investigated. Due to their combined metallic-composite performance, these structures are widely applied in marine and aerospace industries. Three types of laminates, including GLARE, BARAL, and a novel hybrid glass/basalt-aluminum configuration with a constant FML 5-3/2 lay-up, were fabricated. The metallic layers consisted of 5052-H32 aluminum alloy, while the composite layers were reinforced with unidirectional glass, basalt, and glass/basalt hybrid fibers in a vinyl ester matrix. To evaluate the mechanical behavior, tensile, flexural, and low-velocity impact tests were performed at three energy levels. The results showed that GLARE exhibited the highest tensile strength of 315 MPa, BARAL displayed a more brittle behavior with 281 MPa, and the hybrid laminate presented an intermediate performance with 287 MPa. Under flexural loading, the maximum stresses were measured as 285 MPa for GLARE, 250 MPa for BARAL, and 227 MPa for the hybrid laminate. In the impact tests, the primary energy absorption mechanisms were identified as plastic deformation of the aluminum layers and interfacial delamination. The use of vinyl ester resin instead of conventional epoxy, along with the employment of 5052-H32 aluminum alloy and the incorporation of a glass/basalt hybrid configuration, introduced a distinctive approach compared to conventional practices, with the comparative results highlighting their significant influence on mechanical response and energy absorption capacity.

### 1- مقدمه

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Parvande, P., Hamedi, M., Rezghi Maleki, H., "Investigation of Glass, Basalt, and Hybrid Fibers Effect on the Mechanical Behavior and Energy Absorption of Fiber-Metal Laminates Based on 5052 Aluminum alloy," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 1, pp. 2704-2716, 2025. <https://doi.org/10.22068/jstc.2025.2065632.1929>

مطالعه و تحلیل خواص مکانیکی و رفتار ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی- فلزی همواره مورد توجه محققان بوده است. در این بخش، به مرور برخی از مطالعات شاخص در این زمینه پرداخته می‌شود. الکاراز و همکاران [24] ویژگی‌های ضربه‌ای فلیر<sup>1</sup> را بررسی کردند و دریافتند که مقاومت آن در برابر ضربه‌های کم‌سرعت، کمتر از چندلایه‌های الیافی-فلزی متداولی مانند گلر<sup>2</sup> است. با این حال، این تفاوت زمانی که انرژی جذب‌شده به ازای واحد وزن در نظر گرفته شود، کاهش می‌یابد. در فلیر، لایه‌های کامپوزیتی نقش کمتری در جذب انرژی داشتند، در حالی که لایه‌های فلزی پیش از شکست، تغییر شکل زیادی از خود نشان دادند و این موضوع نقش حیاتی آن‌ها را در مقاومت ضربه‌ای برجسته می‌کند. چنگ و همکاران [25] مکانیزم‌های شکست فشاری گلر با پیکربندی‌های مختلف پس از ضربه سرعت پایین را بررسی کردند. پیکربندی 3/2 نسبت به پیکربندی 2/1 طراحی لایه‌ای سودمندتری را از نظر استحکام ویژه فشاری پس از ضربه و نسبت استحکام باقی‌مانده نشان داد. در محدوده انرژی ضربه‌ای 35 تا 65 ژول، چندلایه‌های الیافی - فلزی کاهش 40 تا 61 درصدی در استحکام فشاری پس از ضربه سرعت پایین را نشان دادند.

حسن و همکاران [26] به مطالعه ساخت و رفتار مکانیکی چندلایه‌های فلزی الیافی از نوع گلر پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش لایه‌چینی دستی و رویکردی پیشرفته برای بهبود چسبندگی میان اجزا، چندلایه‌هایی با 1، 2، 4، 6 و 8 لایه الیاف شیشه بافته‌شده بین ورق‌های نازک آلومینیوم ساختند. آزمون‌های کشش و خمش برای اندازه‌گیری مقاومت کششی و خمشی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش تعداد لایه‌های الیاف، مقاومت نمونه‌ها بیشتر می‌شود، هرچند در خمش شکست به صورت لایه لایه شدن رخ می‌دهد. همچنین مشخص شد که با افزایش تعداد لایه‌های کامپوزیتی رفتار الاستیک، ناحیه پلاستیک آلومینیوم کاهش می‌یابد. انصاری و همکاران [27] اثر جنس و ضخامت لایه میانی بر جذب انرژی چندلایه‌های الیافی - فلزی مربعی را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها از چهار نوع لایه میانی شامل شیشه - اپوکسی، کربن - اپوکسی، فوم پلی‌یورتان و آلومینیوم 2024 استفاده کردند. نتایج نشان داد نمونه با لایه میانی کربن بالاترین جذب انرژی و نیروی متوسط را دارد، در حالی که نمونه فومی کمترین کارایی را داشت. همچنین، ضخامت بهینه برای عملکرد بهتر حالتی بود که هر سه لایه ضخامت برابر داشتند. اسلامی فارسانی و همکاران [28] تأثیر لایه‌چینی الیاف و سیکل سرمایش را بر رفتار خمشی چندلایه‌های الیافی-فلزی حاوی الیاف شیشه و بازالت بررسی کردند. نمونه‌ها از دو ورق آلومینیوم 2024 و لایه میانی اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت و شیشه در پنج حالت لایه‌چینی مختلف ساخته شدند. پس از اعمال 40 سیکل سرمایش بین 100- و 25 درجه سانتی‌گراد، خواص خمشی ارزیابی شد. نتایج نشان داد چندلایه‌های الیافی-فلزی حاوی الیاف بازالت بالاترین استحکام و مدول خمشی را داشتند و بیشترین بهبود پس از سیکل سرمایش نیز در همین نمونه‌ها مشاهده شد که به دلیل بهبود چسبندگی بین اجزا در اثر تنش‌های فشاری بود.

در مطالعه‌ای دیگر، عبدالهی اذغان و همکاران [29] تأثیر چیدمان الیاف و سیکل حرارتی را بر رفتار خمشی چندلایه‌های الیافی-فلزی حاوی الیاف شیشه و کولار بررسی کردند. نمونه‌ها از آلومینیوم 2024 و اپوکسی ساخته شده و تحت سیکل حرارتی بین 150°C- و 100°C قرار گرفتند. نتایج نشان داد اعمال 40 سیکل باعث بهبود استحکام و مدول خمشی شد اما پس از 60 سیکل این خواص کاهش یافت. مکانیزم‌های پخت ثانویه، تنش فشاری و جدایش بین

چندلایه‌های الیافی-فلزی به عنوان دسته‌ای از ساختارهای پیشرفته‌ی مواد مرکب شناخته می‌شوند که بهترین ویژگی‌های پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف و آلیاژهای فلزی را با هم ترکیب می‌کنند. این ساختارها قادرند شرایط سخت کاربردهای مهندسی مدرن را تحمل کنند و در عین حال به دغدغه‌های زیست‌محیطی رو به رشد پاسخ دهند. چندلایه‌های الیافی-فلزی با چگالی پایین، مقاومت عالی در برابر خستگی و سایش، خواص ضربه‌ای برتر و تحمل آسیب بهتر نسبت به مواد تک‌جزئی سنتی مشخص می‌شوند [3-1]. اهمیت چندلایه‌های الیافی - فلزی در ساختار ترکیبی منحصربه‌فرد آن‌ها نهفته است که از لایه‌های متناوب ورق‌های فلزی و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده است. این پیکربندی، استحکام و انعطاف‌پذیری بالای فلزات را با سبک‌وزنی و مقاومت به خوردگی مواد مرکب پلیمری ترکیب می‌کند [4، 5]. نتیجه این کار، ترکیبی از ویژگی‌های مکانیکی است که به‌تنهایی با هیچ یک از اجزای منفرد، قابل دستیابی نیست. از دیگر مزایای چندلایه‌های الیافی-فلزی توانایی آن‌ها در ارائه پاسخ مهندسی‌شده به بارهای مکانیکی است. این سازه‌ها، انعطاف‌پذیری لایه‌های فلزی را با استحکام و سفتی بالای الیاف ترکیب کرده و منجر به بهبود نسبت استحکام به وزن می‌شود [6]. کاربردهای چندلایه‌های الیافی-فلزی گسترده و متنوع است و از صنایع هوافضا و خودرو گرفته تا سازه‌های دریایی و مهندسی عمران را در بر می‌گیرد [7، 8].

مقاومت در برابر ضربه یکی از خواص حیاتی برای اجزای سازه‌ای است که در معرض بارهای ناگهانی قرار دارند [9-13]. ضربه سرعت پایین یکی از ضرباتی است که در استفاده از سازه‌ها عموماً با آن مواجه هستیم در حالیکه ضربات سرعت بالا در شرایط خاصی اتفاق می‌افتد [14]. ضربه سرعت پایین در اثر سقوط ابزار و وسایل مختلف روی سازه‌ها، تصادفات سرعت پایین تر، برخورد سنگ، تگرگ، اشیاء و پرندگان با سازه‌ها اتفاق می‌افتد [15-18]. چندلایه‌های الیافی-فلزی به دلیل ساختار چندلایه‌ای خود در این زمینه عملکرد بسیار خوبی دارند [19]. لایه‌های فلزی انرژی ضربه را جذب و پخش می‌کنند در حالی که لایه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف از لایه لایه شدن و گسترش ترک جلوگیری می‌کنند و به این ترتیب تحمل آسیب و یکپارچگی سازه‌ای را تضمین می‌نمایند. این ویژگی‌ها، چندلایه‌های الیافی - فلزی را به ویژه برای اجزایی که بقای ساختاری در برابر ضربه برای ایمنی و عملکرد حیاتی است، بسیار ارزشمند می‌سازد.

الیاف نقش مهمی در تقویت چندلایه‌های الیافی-فلزی ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، الیاف بازالت به عنوان جایگزینی امیدبخش برای الیاف شیشه مطرح شده‌اند. بازالت در حالی که استحکام و سفتی قابل مقایسه‌ای با الیاف شیشه دارد، پایداری حرارتی بالاتر و مقاومت شیمیایی بهتری ارائه می‌دهد [20]. در مقایسه با الیاف شیشه، الیاف بازالت دوام بهتری در محیط‌های مهاجم از خود نشان می‌دهند و این ویژگی آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای نسل جدید چندلایه‌های الیافی-فلزی، به‌ویژه در کاربردهایی که با دماهای بالا یا محیط‌های شیمیایی سروکار دارند تبدیل کرده است [21]. با این حال، الیاف شیشه مزایای خاصی از جمله هزینه‌ی پایین، خواص مکانیکی خوب و مقاومت شیمیایی قابل قبول را دارا می‌باشند [22]. ترکیب‌سازی در مواد کامپوزیتی به معنای ترکیب هدفمند دو یا چند نوع مختلف الیاف در یک ساختار چندلایه‌ای است تا تعادل خواصی به دست آید که با استفاده از یک نوع ماده به تنهایی قابل دستیابی نیست [23].

<sup>2</sup> Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy (GLARE)

<sup>1</sup> Flax laminate Aluminium Reinforced Epoxy (FLARE)

با وجود انجام مطالعات گسترده بر روی ساختارهای چندلایه الیافی-فلزی، بخش عمده این پژوهش‌ها بر نمونه‌های رایج نظیر گلر و عمدتاً با استفاده از الیاف شیشه و رزین‌های اپوکسی متمرکز بوده‌اند. بررسی ساختارهای نوین تر همچون بارال با لایه‌چینی‌های متفاوت، یا چندلایه‌های ترکیبی شیشه/بازالت، تنها در موارد محدودی گزارش شده است. علاوه بر این، به‌کارگیری رزین‌های وینیل‌استر به‌عنوان زمینه جایگزین اپوکسی و مقایسه عملکرد مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در سوی دیگر، اغلب تحقیقات پیشین بر پایه آلیاژهای متداولی مانند T3-2024 انجام شده و استفاده از آلیاژ آلومینیوم 5052-H32 در ساخت این دسته از سازه‌ها به ندرت بررسی گردیده است. این شکاف‌ها نشان‌دهنده خلأ علمی در شناخت اثر نوع الیاف، نوع رزین و آلیاژ فلزی بر رفتار مکانیکی و قابلیت جذب انرژی چندلایه‌های الیافی-فلزی هستند. بر این اساس، هدف پژوهش حاضر بررسی تجربی خواص کششی و خمشی و همچنین تحلیل رفتار شکست و ظرفیت جذب انرژی در سه نوع ساختار شامل بارال، گلر و یک چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم است. در این راستا، با استفاده از چندلایه‌های الیافی - فلزی حاوی آلومینیوم 5052-H32 و تقویت‌کننده‌های الیافی شیشه و بازالت، آزمون‌های کششی، خمشی و ضربه سرعت پایین انجام شد تا نقش پارامترهای ساختاری در بهبود عملکرد مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر آسیب آشکار گردد.

## 2- تجربی

### 1-1 مواد

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل سه نوع ساختار الیافی-فلزی با آرایش FML 5-3/2 به‌صورت بارال، گلر و چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم هستند. شکل 1 نمای شماتیک آرایش لایه‌چینی این ساختارها را نشان می‌دهد.

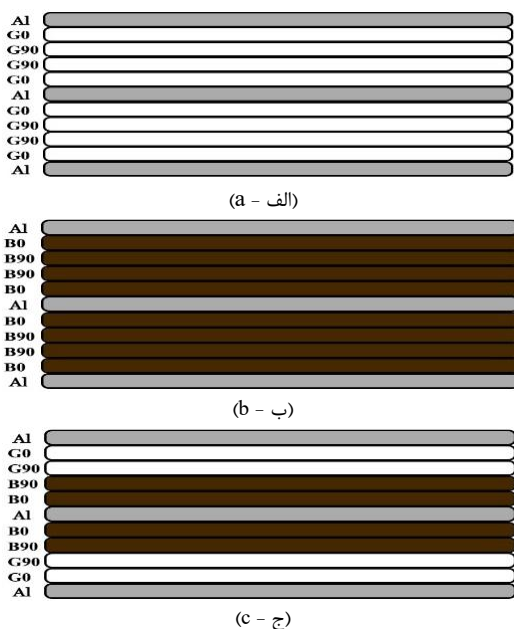


Fig. 1 The schematic lay-up of fibre metal laminates, including: a) GLARE, b) BARAL, c) hybrid glass/basalt-aluminium laminate (HGBAL).

شکل 1 نمای شماتیک لایه‌چینی چندلایه الیافی فلزی شامل: الف) گلر، ب) بارال، ج) چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم.

اجزا به‌عنوان عوامل اصلی تغییر خواص معرفی شدند. کرامت‌زاده و همکاران [30] پاسخ ورق ساندویچی با رویه الیاف-فلز را تحت ضربه سرعت پایین توسط ضربه‌زننده صلب استوانه‌ای بر اساس قانون برخورد اصلاح‌شده بررسی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن رویه‌های فلز - الیاف و یک هسته صلب - پلاستیک با مقاومت له‌شدگی ثابت، مدل تحلیلی مبتنی بر اصل حداقل انرژی پتانسیل و بالانس انرژی را ارائه دادند. نتایج نشان داد پارامترهای هندسی و فیزیکی مانند چیدمان لایه‌ها، جرم و سرعت ضربه‌زننده تأثیر زیادی بر پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی دارند و مدل پیشنهادی تطابق خوبی با داده‌های تجربی و تحلیلی دارد. محمد ظاهری و همکاران [31] رفتار آسیب در چندلایه‌های الیافی-فلزی تحت بارگذاری کششی استاتیکی را بررسی کردند. در این مطالعه، آسیب‌هایی مانند ترک‌های ماتریسی، جدایش بین‌لایه‌های القاشده توسط ترک‌های ماتریسی و پلاستیسیته لایه‌های فلزی تحلیل شدند. با بهره‌گیری از مدل تحلیلی، توزیع تنش و نرخ رهاسازی انرژی برای شرایط حاوی ترک و جدایش بین‌لایه‌ای استخراج گردید و نتایج مدل‌سازی عددی نیز با نتایج تحلیلی مقایسه شد که تطابق خوبی نشان داد. همچنین، آزمایش‌های کشش تجربی نشان داد که در چگالی ترک 0.38، یعنی زمانی که به‌طور متوسط در هر میلی‌متر طول نمونه 0.38 ترک وجود دارد (فاصله متوسط ترک‌ها حدود 2.7 میلی‌متر)، ترک‌های ماتریسی به حالت اشباع می‌رسند و جدایش بین‌لایه‌ای آغاز می‌شود. این معیار کمی برای چگالی ترک به‌صورت نسبت تعداد ترک‌های ماتریسی به طول نمونه تعریف می‌شود و شاخص مناسبی برای تعیین آستانه شروع آسیب‌های ثانویه در چندلایه‌های الیافی-فلزی است. اژدری و طاهری بهروز [32] با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، مقاومت خمشی گلر را پس از وارد آمدن ضربه بررسی کردند. نتایج نشان داد که لایه آلومینیوم در چندلایه‌های الیافی - فلزی نقش بسیار مهمی در تحمل بارهای خمشی ایفا می‌کند. همچنین، نتایج عددی با داده‌های تجربی تطابق خوبی داشت و درک جامعی از رفتار خمشی گلر ارائه نمود.

گونزالس-کانچه و همکاران [33] در پژوهشی به بررسی خواص کششی چندلایه‌های الیافی - فلزی ساخته‌شده از آلیاژ آلومینیوم با شکل‌پذیری پایین و کامپوزیت ترموپلاستیک شامل پارچه آرامید و زمینه پلی‌پروپیلن پرداختند. نتایج آزمون کشش نشان داد که نمونه ساخته‌شده رفتار شکل‌پذیرتری نسبت به اجزای سازنده‌اش دارد، به‌طوری‌که کرنش شکست در آن به‌طور قابل‌توجهی (تا حدود 400٪) نسبت به ورق آلومینیوم افزایش یافت. این افزایش ناشی از چسبندگی بسیار خوب میان لایه‌ها بود که با آزمون برشی اتصال تک‌لبه و میکروسکوپ نوری نیز تأیید شد. چسبندگی مناسب موجب توزیع یکنواخت‌تر تغییرشکل پلاستیک در ورق آلومینیوم و بهبود رفتار مکانیکی شد. این یافته‌ها اهمیت طراحی مهندسی چندلایه‌های الیافی-فلزی را نشان می‌دهند، زیرا با کنترل خواص نظیر چقرمگی و کرنش شکست، می‌توان ظرفیت جذب انرژی این مواد را برای کاربردهای سازه‌ای بهینه کرد. رزقی ملکی و پرونده [34] به بررسی تأثیر نوع زمینه رزینی بر رفتار مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت پرداختند. آن‌ها نمونه‌های بازالت/وینیل‌استر و بازالت/اپوکسی را به روش لایه‌چینی دستی و پرس گرم ساختند و تحت آزمون‌های کششی، خمشی و ضربه قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از زمینه اپوکسی موجب بهبود خواص کششی و خمشی و همچنین جذب انرژی ضربه‌ای بیشتر شد، هرچند این افزایش جذب انرژی با گسترش آسیب‌های داخلی بیشتری همراه بود. این مطالعه اهمیت انتخاب نوع زمینه مناسب را در بهبود عملکرد مکانیکی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های بازالتی برجسته می‌کند.

نمونه‌های الیافی-فلزی پس از ساخت، با دستگاه سنگ‌بری به ابعاد دقیق آزمون‌های کشش، خمش و ضربه برش داده شدند. برای جلوگیری از آسیب لبه‌ای و جدایش لایه‌های فلزی - مواد مرکب، برش با تیغه الماسه و سرعت کنترل‌شده همراه جریان آب خنک‌کننده انجام گرفت. پس از برش، لبه‌ها پولیش و به‌صورت چشمی و با آزمون مقدماتی برای اطمینان از یکپارچگی لایه‌ها بررسی شدند.

## 2-2- روش‌ها

### 2-2-1- آزمون کشش

خواص کششی چندلایه‌های الیافی - فلزی با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره و مطابق با استاندارد ASTM D3039 در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه بناب ارزیابی شدند [35]. تمامی آزمون‌ها تحت شرایط محیطی کنترل‌شده با دمای ثابت و رطوبت مشخص انجام گرفت و نمونه‌ها با ابعاد دقیق تهیه شدند. طول نمونه‌ها 250 میلی‌متر و عرض آن‌ها 25 میلی‌متر بود. آزمون‌ها با استفاده از دستگاه آزمون یونیورسال STM-15 مجهز به لودسل 15 کیلو نیوتن و سرعت ثابت 2 میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. میزان تغییر طول نمونه‌ها با استفاده از اکستنسومتر با طول مبنا 50 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. شکل 2 نمایی از نمونه قرار گرفته داخل فک دستگاه آزمون کشش را نشان می‌دهد.

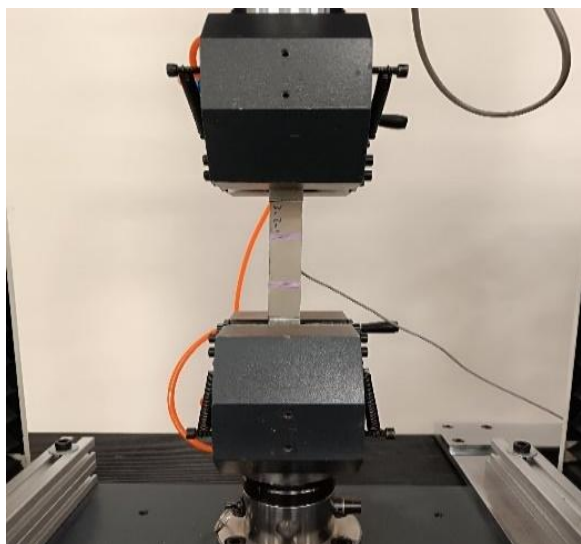


Fig. 2 Tensile test for composite specimen.

شکل 2 آزمون کشش برای نمونه کامپوزیتی

### 2-2-2- آزمون خمش

آزمون‌های سه‌نقطه‌ای خمشی مطابق با استاندارد ASTM D790 برای ارزیابی رفتار خمشی چندلایه‌های الیافی - فلزی انجام در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه بناب شدند [36]. این آزمون با استفاده از دستگاه آزمون چندمنظوره STM-15 مجهز به لودسل 0.5 کیلونیوتن انجام گرفت. سرعت ثابت حرکت سر متحرک دستگاه 2 میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد. نمونه‌ها با ابعاد دقیق 127 میلی‌متر طول و 12.7 میلی‌متر عرض تهیه شدند. با توجه به اینکه ضخامت نمونه‌ها 3.12 میلی‌متر بود، فاصله اسپن 50 میلی‌متر انتخاب گردید تا نسبت دهانه به عمق تقریباً برابر با 16 به 1 باشد و بارگذاری خمشی به‌صورت دقیق انجام شود. قبل از آزمون، تمامی نمونه‌ها به مدت حداقل 24 ساعت در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی با دمای  $23 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی  $50 \pm 5$  درصد قرار گرفتند تا تعادل حرارتی و رطوبتی برقرار شود.

لایه‌های فلزی از ورق‌های آلومینیوم آلیاژ 5052-H32 با ضخامت 0.5 میلی‌متر ساخته شدند. این ورق‌ها پیش از فرآیند لایه‌گذاری، به‌منظور افزایش چسبندگی سطحی و بهبود اتصال بین فلز و لایه‌های کامپوزیتی، تحت فرآیند آندایز (انودایز) در محلول اسید سولفوریک قرار گرفتند. در این فرآیند ابتدا سطح ورق‌ها با محلول فلزیایی به‌طور کامل تمیزکاری و چربی‌زدایی شد تا هرگونه آلودگی و لایه اکسید طبیعی حذف گردد. سپس ورق‌ها در شرایط کنترل‌شده شامل چگالی جریان مشخص، ولتاژ ثابت و زمان معین در محلول اسید سولفوریک قرار داده شدند. این عملیات موجب تشکیل یک لایه اکسیدی یکنواخت، متخلخل و پایدار بر سطح آلومینیوم شد. وجود این لایه آندی علاوه بر افزایش زبری سطح، باعث ایجاد مکان‌های قفل‌شدگی مکانیکی برای نفوذ رزین و بهبود چسبندگی شد و در نهایت انرژی پیوند بین سطح فلز و لایه‌های رزینی را به‌طور محسوسی افزایش داد. چنین اصلاح سطحی نقش مهمی در جلوگیری از جدایش بین لایه‌های فلزی و کامپوزیتی در حین بارگذاری‌های مکانیکی و ضربه‌ای دارد.

لایه‌های کامپوزیتی با استفاده از الیاف شیشه نوع E-glass تک‌جهته، الیاف بازالت تک‌جهته و همچنین ترکیبی از این دو الیاف در زمینه رزین وینیل‌استر MFE711 ساخته شدند. رزین وینیل‌استر با افزودن 2 درصد پراکسید متیل‌اتیل‌کتون (MEKP) به‌عنوان کاتالیزور و 1 درصد کبالت به‌عنوان شتاب‌دهنده در دمای اتاق (25 درجه سلسیوس) مورد استفاده قرار گرفت. برای ایجاد پیوند قوی میان لایه‌های فلزی و کامپوزیتی نیز از چسب اپوکسی دو جزئی آرالدیت 2015 با نسبت اختلاط 1:1 استفاده شد. الیاف تقویت‌کننده به‌صورت تک‌جهته با وزن سطحی 300 گرم بر مترمربع استفاده شدند و درصد حجمی آن‌ها در لایه‌های کامپوزیت 42 درصد اندازه‌گیری گردید. خواص مکانیکی مواد اولیه در جدول 1 ارائه شده است. در نهایت، مراحل ساخت شامل آغشته‌سازی الیاف به رزین، قراردادی ورق‌های آلومینیومی اصلاح‌شده و لایه‌های تقویت‌کننده، اعمال چسب، فشرده‌سازی چندلایه توسط پرس گرم، جداسازی از قالب و آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون‌های مکانیکی و ضربه‌ای بود.

جدول 1 خواص مکانیکی مواد اولیه مورد استفاده

Table 1. Mechanical properties of the materials used

چسب اپوکسی	وینیل استر	الیاف شیشه	الیاف بازالت	آلومینیوم	واحد	چگالی
1.15	1.05-1.20	2.5	2.68	2.68	g/cm <sup>3</sup>	چگالی
30	80-95	2500-2800	2200-2400	215-265	MPa	استحکام کششی
2.0	3.2-3.7	72	90	70	GPa	مدول کششی
4.4	5-6	3.5	2.5-3.5	5	%	ازدیاد طول
42.7	120-150	-	-	-	MPa	استحکام خمشی
1.81	3.3-3.8	-	-	-	GPa	مدول خمشی

تنش و کرنش خمشی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

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

که در آن P نیروی اعمالی، L فاصله بین تکیه‌گاه‌ها، b عرض نمونه، d ضخامت نمونه و D جابجایی وسط دهانه است. شکل 3 نمایی از آزمون خمش یک چندلایه الیافی- فلزی را نشان می‌دهد.

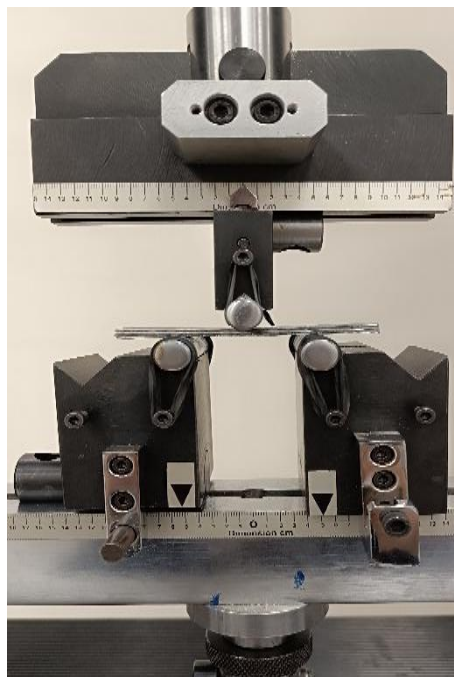


Fig. 3 Three-point flexural test specimen.

شکل 3 آزمون خمش برای نمونه کامپوزیتی

داده‌های آزمون شامل داده‌های نیرو و زمان برای تحلیل پاسخ نمونه‌ها در برابر ضربه و مقاومت آن‌ها در برابر آسیب موردبررسی قرار گرفت. سرعت ضربه‌زن در هر لحظه به صورت  $v(t)$ ، جابجایی ضربه‌زن  $\delta(t)$  و انرژی جذب شده  $E_a(t)$  با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند [37]:

$$v(t) = v_i + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (3)$$

$$\delta(t) = \delta_i + v_i t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (4)$$

$$E_a(t) = \frac{m \times (v_i^2 - (v(t))^2)}{2} + m \times g \times \delta(t) \quad (5)$$

که در این معادلات،  $v_i$  سرعت اولیه ضربه‌زن،  $g$  شتاب گرانش،  $F(t)$  نیروی ضربه در زمان  $t$ ،  $m$  جرم ضربه‌زن،  $\delta_i$  جابجایی اولیه و  $t$  زمان است. برای تعیین سطوح انرژی آزمون ضربه، از رابطه شماره 6 استفاده شد:

$$E = C_e h \quad (6)$$

که در آن E انرژی ضربه،  $C_e$  نسبت انرژی به ضخامت (ژول/میلی‌متر) و h ضخامت نمونه است. با در نظر گرفتن ضخامت 3.12 میلی‌متر و مقادیر مرجع  $C_e$  بین 10 تا 15 ژول/میلی‌متر برای چندلایه‌های الیافی- فلزی، انرژی محاسباتی حداقل حدود 31 ژول و حداکثر 47 ژول برآورد شد. بر این اساس، سه سطح انرژی 28.20، 39.48 و 50.76 ژول انتخاب گردید تا رفتار سازه به ترتیب در شرایط زیر حد مرجع، در بازه میانی و اندکی فراتر از حد بالای توصیه شده ارزیابی شود. انرژی‌های بالاتر مورد بررسی قرار نگرفتند زیرا موجب مچالگی و تخریب کامل نمونه می‌شدند. سطوح انتخابی با تنظیم، ارتفاع سقوط و ثابت بودن شتاب گرانش و جرم ضربه زن (5.75kg) به شرح زیر می‌باشد:

$$E = mgh \quad (7)$$

که در این رابطه E انرژی ضربه،  $m$  جرم ضربه زن،  $g$  شتاب گرانش زمین و h ارتفاع سقوط ضربه‌زن می‌باشد.



(الف-ا)

### 3-2-2- ضربه سرعت پایین

آزمون ضربه سرعت پایین مطابق استاندارد ASTM D7136 برای ارزیابی رفتار ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی- فلزی در آزمایشگاه مکانیک دانشگاه صنعتی کاردانیز ترکیه انجام شد [37]. تجهیزات آزمایش شامل سیستم ضربه با وزنه سقوط‌کننده مجهز به یک ضربه‌زن نیم کروی با قطر 16 میلی‌متر بود. نمونه‌های مستطیلی با ابعاد 150×100 میلی‌متر جهت انجام آزمون‌ها استفاده شدند. نمونه‌ها در یک فیکسچر فولادی با حفره 125×75 میلی‌متر نصب شدند تا در هنگام ضربه امکان تغییر شکل آزادانه فراهم باشد. برای اندازه‌گیری نیروی ضربه، از لودسل پیزوالکتریک استفاده شد که داده‌ها به سیستم ثبت داده DEWE-43A با نرخ نمونه‌برداری 20 کیلوهرتز منتقل می‌شد تا پاسخ دینامیکی با وضوح بالا ثبت گردد. انرژی ضربه با تغییر ارتفاع رهاسازی ضربه‌زن، درحالی‌که جرم آن ثابت و برابر 5.75 کیلوگرم بود، کنترل شد. سه سطح مختلف انرژی ضربه به ترتیب در سه سطح پایین، متوسط، بالا (28.20، 39.48 و 50.76 ژول) به نمونه‌ها وارد شد تا رفتار نمونه‌ها در برابر شدت ضربه‌های افزایش‌یافته بررسی شود. شکل 4 نمای کلی از دستگاه آزمون ضربه سرعت پایین را نشان می‌دهد.

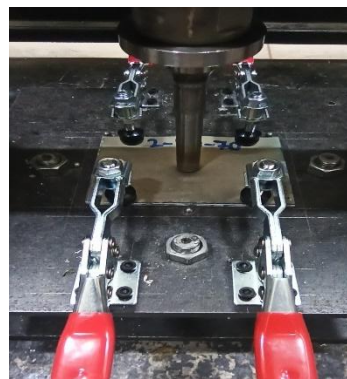
اساس، نمونه گلر در حدود 240 مگاپاسکال و کرنش نزدیک به 0.0025، بارال در حدود 230 مگاپاسکال و کرنش 0.002 و چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم در حدود 235 مگاپاسکال و کرنش 0.025 وارد ناحیه گذار می‌شوند. این نتایج نشان می‌دهد که هر سه ساختار در محدوده تنش بالا وارد فاز تسلیم می‌شوند و تفاوت‌های آن‌ها بیشتر در ادامه ناحیه غیرخطی آشکار می‌گردد.

در مرحله سوم (کرنش سختی)، فلزات وارد ناحیه پلاستیک می‌شوند و سهم تحمل بار به تدریج به لایه‌های الیافی منتقل می‌شود. منحنی در این بخش به صورت غیرخطی ولی صعودی ادامه می‌یابد که نشان دهنده افزایش تدریجی مقاومت ناشی از درگیری بیشتر الیاف است. گلر و بارال در این مرحله سفت شوندگی نرم و یکنواختی از خود نشان می‌دهند که امکان توزیع بهتر تنش و افزایش دوام سازه‌ای را فراهم می‌کند. چندلایه ترکیب شیشه/بازالت - آلومینیوم نیز با استفاده از ترکیب الیاف شیشه و بازالت عملکرد مطلوبی در انتقال بار و سفت‌شوندگی کرنش دارد.

مرحله چهارم (شکست نهایی) به گسیختگی کلی نمونه اختصاص دارد. در این مرحله، آسیب‌های تجمعی مانند پارگی الیاف و جداشدگی بین لایه‌ها منجر به شکست نهایی می‌شوند. گلر با استحکام کششی نهایی حدود 315 مگاپاسکال و کرنش نهایی 0.026 mm/mm بالاترین ظرفیت تحمل بار را دارد. بارال با حدود 281 مگاپاسکال و 0.022 mm/mm و چندلایه ترکیب شیشه/بازالت - آلومینیوم با حدود 287 مگاپاسکال و 0.0223 mm/mm نیز عملکرد مکانیکی بسیار خوبی را پیش از گسیختگی از خود نشان می‌دهند. به‌طور کلی، نتایج آزمون کشش نشان داد که هر سه نوع چندلایه رفتار متفاوتی در نواحی غیرخطی دارند. نمونه گلر بالاترین ظرفیت باربری را ارائه داد که ناشی از مدول بالای الیاف شیشه و پیوند مناسب بین لایه‌های است. در مقابل، بارال ضعیف‌ترین عملکرد را نشان داد، با شیب تندتر منحنی که نشان دهنده مقاومت پایین‌تر و جذب کرنش کمتر قبل از شکست است. این نشان می‌دهد که بارال نسبت به دیگر نمونه‌ها انعطاف‌پذیری کمتری دارد. نمونه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم رفتاری بین دو ساختار قبلی نشان داد و تعادلی میان ظرفیت باربری و انعطاف‌پذیری ایجاد کرد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گلر بیشترین مقاومت نهایی، بارال ضعیف‌ترین عملکرد و چندلایه ترکیبی خواص کششی بینابینی را داراست.

### 3-2- آزمون خمش

همان‌گونه که در نمودار نیرو-جابجایی شکل 6 دیده می‌شود، رفتار خمشی چندلایه‌های گلر، بارال و چندلایه ترکیبی را می‌توان در چهار مرحله مشخص توصیف کرد که هر یک نشان‌دهنده تکامل تدریجی ویژگی‌های مکانیکی این نمونه‌ها است. در مرحله نخست، هر سه نمونه پاسخ خطی - الاستیک آشکاری از خود نشان می‌دهند که با شیب اولیه تند در منحنی نیرو-جابجایی مشخص است و بیانگر پیوند بین لایه‌های قوی و انتقال بار مؤثر میان لایه‌های آلومینیوم و الیاف است. در این مرحله هیچ نشانه‌ای از آسیب مشاهده نمی‌شود و نیرو به سرعت افزایش می‌یابد تا به آستانه تسلیم لایه‌های آلومینیومی برسد. مرحله دوم با آغاز جاری شدن پلاستیک در آلومینیوم مشخص می‌شود، در حالی که لایه‌های الیافی عمدتاً در محدوده الاستیک باقی می‌مانند. این بخش با کاهش تدریجی شیب منحنی نیرو - جابجایی و ظهور نخستین ریزترک‌ها در الیاف بیرونی همراه است، بی‌آن‌که ظرفیت باربری نمونه‌ها به طور محسوسه کاهش یابد. در مرحله سوم بیشینه نیروی خمشی به دست می‌آید که با شکست‌های موضعی گسترده‌تر در لایه‌های بیرونی الیاف و گسترش ریزترک‌ها همراه است.



(ب-ا)

Fig. 4 General view of the low-velocity impact test apparatus: a) Open view b) View of the sample and impactor

شکل 4 نمای کلی از دستگاه آزمون ضربه سرعت پایین: (الف) نمای باز (ب) نمای نمونه و ضربه زن

### 3- بحث و نتایج

#### 3-1- آزمون کشش

نمودار تنش - کرنش کششی چندلایه‌های گلر، بارال و چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت - آلومینیوم در چهار مرحله مشخص قابل‌توصیف است که پاسخ تدریجی و ترکیبی لایه‌های فلزی و الیافی آن‌ها را تحت بارکششی بیان می‌کند. این روند در شکل 5 نشان‌دهنده است و شامل مراحل الاستیک، گذار به تسلیم، کرنش سختی و شکست نهایی است.

در مرحله الاستیک، منحنی تنش-کرنش حالت خطی دارد که در آن ورق‌های آلومینیوم و لایه‌های الیاف (شیشه، بازالت یا ترکیب آن‌ها) به طور هم‌زمان تغییر شکل می‌دهند. این بخش از منحنی تا کرنشی حدود 0.002 ادامه دارد و شیب آن بیانگر سفتی اولیه چندلایه است. نتایج نشان می‌دهد که سفتی اولیه در سه ساختار بارال، گلر و ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم تقریباً برابر بوده و تفاوت محسوسه‌ای میان آن‌ها وجود ندارد. بنابراین، اختلاف عملکرد نمونه‌ها بیشتر در نواحی غیرخطی و بعد از گذار به مرحله پلاستیک آشکار می‌شود.

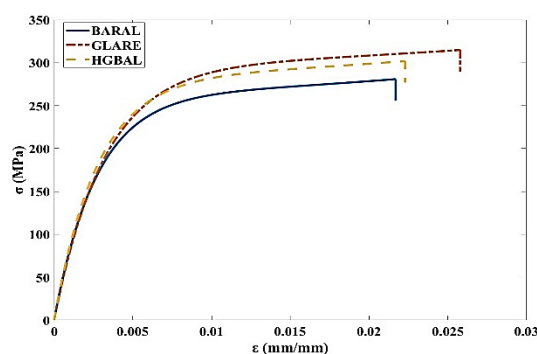


Fig. 5 Tensile stress-strain curves of GLARE, BARAL, HGBAL specimens.

شکل 5 نمودار تنش-کرنش کششی نمونه‌های چندلایه گلر، بارال و ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم

در مرحله دوم (ناحیه گذار یا تسلیم)، تغییر در شیب منحنی نشان‌دهنده آغاز تسلیم ورق‌های آلومینیومی و گذار از رفتار الاستیک به پلاستیک است. این مرحله تقریباً از کرنش 0.002 تا 0.003 آغاز می‌شود و مقادیر متناظر تنش برای سه نمونه در محدوده 220 تا 240 مگاپاسکال قرار دارند. بر این

می‌شود، چرا که با تضعیف پیوند بین لایه‌ها، مسیرهایی برای گسترش تدریجی آسیب ایجاد می‌کند. در سطوح مختلف انرژی، ترک خوردگی ماتریس و شکست الیاف نیز در توسعه آسیب نقش دارند، اما معمولاً نسبت به اثر غالب جداشدگی، نقش ثانویه‌ای ایفا می‌کنند.

شکل 7 نماهای سطح بالا و پایین نمونه‌های گلر، بارال و چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم را پس از ضربه با سطوح انرژی مختلف نشان می‌دهد و نگرش دقیقی از ماهیت و میزان آسیب سطحی ایجاد شده در این ساختارها ارائه می‌کند. ناحیه‌های تحت ضربه دچار فرورفتگی‌های پلاستیک موضعی شده‌اند که بیانگر تغییر شکل متمرکز در لایه‌های آلومینیومی است. با وجود شکل‌گیری این فرورفتگی‌ها، هیچگونه ترک سطحی یا شکست کامل در امتداد ضخامت لایه‌های فلزی مشاهده نشد؛ این موضوع نشان‌دهنده توانایی لایه‌های فلزی در جذب و پراکندگی انرژی تحت شرایط ضربه با سرعت پایین است. همچنین در برخی نمونه‌ها، انحرافات یا برآمدگی‌ها در سطح پشتی (سمت بدون ضربه) دیده شد که نشان می‌دهد بخشی از انرژی ضربه از میان ساختار پیچیده میان لایه‌های تقویت‌شده با الیاف و ورق‌های فلزی هستند که بر نحوه انتشار تنش و جذب انرژی در زمان ضربه اثر می‌گذارند.

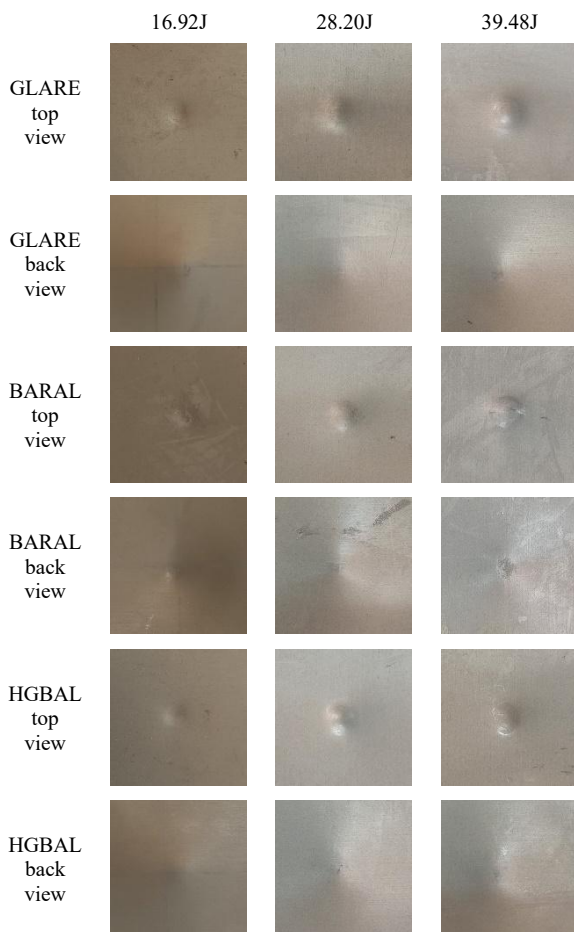


Fig. 7 Top and back surface views of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens impacted at different energy levels

شکل 7 نماهای بالا و پشت از نمونه‌های گلر، بارال و چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه در سطوح انرژی مختلف

در این مرحله نمونه گلر بیشترین نیروی قابل تحمل را ثبت می‌کند، پس از آن بارال و در نهایت نمونه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم قرار می‌گیرد. مرحله چهارم با گسترش تدریجی آسیب از لایه‌های بیرونی به سمت درونی همراه است و شامل شکست کامل الیاف، تخریب بین‌لایه‌ای و جدایش می‌شود. جابجایی نهایی در این بخش تفاوت شکل‌پذیری نمونه‌ها را نشان می‌دهد؛ به طوری که گلر بیشترین جابجایی نهایی، بارال جابجایی متوسط و نمونه ترکیبی کمترین جابجایی را تجربه می‌کند.

تفاوت مشاهده شده در میزان جابجایی نهایی میان کامپوزیت‌های شیشه و بازالت ناشی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی متفاوت این دو نوع الیاف است. الیاف شیشه به دلیل انعطاف‌پذیری بالاتر جابجایی بیشتری را تحمل می‌کنند، در حالی که الیاف بازالت با وجود استحکام بالاتر از شکل‌پذیری کمتری برخوردارند و ازدیاد طول خمشی محدودتری نشان می‌دهند. در چندلایه‌های ترکیبی شیشه/بازالت، برهم‌کنش این دو نوع الیاف موجب رفتار خمشی غیرخطی می‌شود و در صورت توزیع غیر بهینه الیاف یا تفاوت چسبندگی رزین وینیل‌استر با هر یک از آن‌ها، جابجایی نهایی کمتر از مقدار مورد انتظار به دست می‌آید.

به طور کلی، نتایج آزمون خمشی نشان می‌دهد که نمونه گلر بالاترین ظرفیت باربری و بیشترین جابجایی نهایی را ارائه کرده است که ناشی از خواص مکانیکی الیاف شیشه و پیوند مناسب بین‌لایه‌ای است. نمونه بارال عملکردی میانه با انعطاف‌پذیری متوسط از خود نشان می‌دهد، در حالی که نمونه ترکیبی کمترین مقدار نیرو و جابجایی نهایی را در مقایسه با دو نمونه دیگر ثبت کرده است.

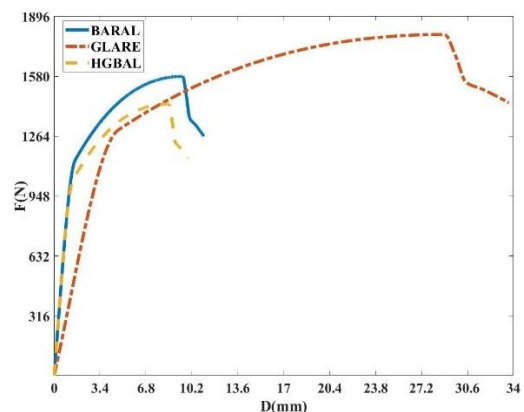


Fig. 6 Flexural stress-strain curves of GLARE, BARAL, HGBAL.

شکل 6 نمودار تنش- کرنش خمشی نمونه‌های گلر، بارال و ترکیبی شیشه/بازالت- آلومینیوم

### 3-3- رفتار ضربه‌ای چندلایه‌های الیافی- فلزی

آسیب ناشی از ضربه‌های با سرعت پایین در چندلایه‌های الیافی- فلزی را می‌توان به طور کلی به دودسته اصلی تقسیم کرد: آسیب‌های سطحی (خارجی) و زیرسطحی (درونی). بروز عیوب سطحی معمولاً به صورت فرورفتگی‌های دائمی و ترک خوردگی‌های موضعی در لایه‌های فلزی ظاهر می‌شوند. در حالی که بخش داخلی ساختار، مکانیزم‌های خرابی می‌توانند شامل ترک خوردگی زمینه، شکست الیاف، لایه‌لایه شدن و جداشدن کامپوزیت از ورق فلزی باشند.

هر یک از این مکانیزم‌ها نقش منحصربه‌فردی در جذب و پخش انرژی ضربه ایفا می‌کنند. در این میان، جداشدگی در سطح تماس کامپوزیت و فلز به عنوان مهم‌ترین مکانیزم جذب انرژی در ضربه‌های با سرعت پایین شناخته

شکل 9 پاسخ نیرو-زمان سه نمونه مختلف را در سطح انرژی متوسط نشان می‌دهد. نمودار نیرو-زمان هر سه نمونه، روندی متقارن با پیک مشخص نیرو و نوسانات محدود در فاز بارگذاری است. در نمونه گلر، نزدیکی نیروی تماس اولیه و نیروی اوج بیانگر آن است که مکانیزم اصلی جذب انرژی، تغییر شکل پلاستیک لایه‌های آلومینیومی بوده است؛ بدون آنکه شکست الیاف یا جدایش بین‌لایه‌ای نقشی غالب داشته باشند. نوسانات قبل از رسیدن به پیک نیرو در این نمونه، به آغاز جدایش در لایه‌های پشتی نسبت داده می‌شود که در نمای برش‌خورده ماکروسکوپی نمونه (شکل 11-ب) جدایش همراه با تغییر شکل موضعی آلومینیوم قابل مشاهده است. در نمونه بارال، نوسانات مشخصی در فاز بارگذاری دیده می‌شود که نشانه‌ای از آغاز جدایش در لایه‌های پایینی است. پس از نیروی اوج، افت کوچکی در منحنی ظاهر شده که حاکی از آسیب محدود و موضعی در لایه‌های بالایی است. این الگو در تصویر نمای برش‌خورده نمونه بارال (شکل 11-ه) قابل مشاهده است. در نمونه ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم، نوسانات اولیه‌ی منحنی نیز حاکی از آغاز جدایش در لایه‌های پشتی است که ناشی از تنش‌های خمشی در ناحیه دور از ضربه‌زننده می‌باشد؛ موضوعی که در تصویر شکل 11-ح به خوبی تأیید می‌شود. به‌طور کلی، در این سطح انرژی، هر سه نمونه با جذب مؤثر انرژی، حفظ یکپارچگی ساختاری و بروز حداقلی آسیب، عملکردی قابل قبول در برابر ضربه از خود نشان داده‌اند.

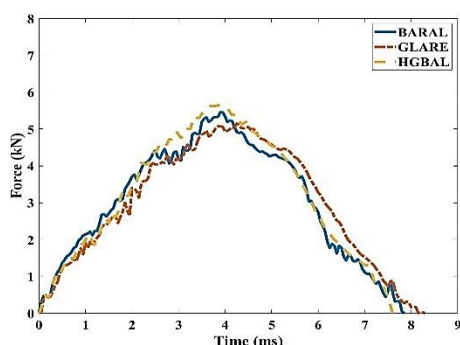


Fig. 9 Force-time responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at medium energy level.

شکل 9 پاسخ نیرو-زمان نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی متوسط.

شکل 10 پاسخ نیرو-زمان سه نمونه مختلف را در سطح انرژی بالا نشان می‌دهد. نمودار نیرو-زمان نمونه گلر شکل کلی متقارن از خود نشان می‌دهد که مشابه رفتار آن در سطوح پایین‌تر انرژی است. نوسانات کوچکی در فاز بارگذاری مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده آغاز جدایش عمدتاً در لایه‌های زیرین چندلایه است، همان‌طور که در شکل 11 به وضوح دیده می‌شود. این نوع آسیب به صورت موضعی از نمای بالا مشاهده می‌شود و نشان می‌دهد که ساختار داخلی نمونه هنوز بخش قابل توجهی از یکپارچگی خود را تحت این انرژی برخوردار حفظ کرده است. با این حال، تصاویر مقطع‌نگاری شده در شکل 11-ج نشان می‌دهند که در همان نواحی موضعی، در قسمت‌های پایین‌تر نمونه، تغییر شکل پلاستیکی و جدایش داخلی قابل توجهی به‌ویژه در لایه‌های پشتی رخ داده است. بنابراین، اگرچه آسیب به صورت گسترده و فراگیر در کل ساختار مشاهده نشد، شدت آسیب‌های موضعی در لایه‌های پشتی نشان‌دهنده نقش کلیدی مکانیزم جدایش در فرآیند جذب انرژی است.

نمودار نیرو - زمان نمونه بارال در انرژی برخوردی بالا، واکنش کلی متقارن و همراه با نوسانات قابل توجهی در فاز بارگذاری نشان می‌دهد. تغییر

منحنی نیرو - زمان ابزاری کلیدی برای تحلیل رفتار ضربه‌ای نتایج آزمون ضربه است و اطلاعات دقیقی درباره پاسخ دینامیکی سازه در اختیار قرار می‌دهد. این منحنی ویژگی‌هایی مانند میزان سفتی و روند آغاز و گسترش آسیب را آشکار می‌کند. از جمله شاخص‌های مهم این منحنی، نیروی تماس اولیه ( $F_i$ ) و بیشینه نیرو ( $F_{max}$ ) هستند.  $F_i$  لحظه‌ای را مشخص می‌کند که سازه نخستین واکنش خود را به بارگذاری ضربه‌ای آغاز می‌کند، در حالی که  $F_{max}$  بیشترین نیروی قابل تحمل پیش از وقوع مکانیزم‌های اصلی شکست را نشان می‌دهد. تحلیل شکل کلی منحنی می‌تواند به شناسایی مکانیسم‌های آسیب کمک کند. به‌عنوان مثال، چقرمگی فلزات باعث ایجاد ناحیه‌ای صاف و کشیده یا کاهش تدریجی نیرو در منحنی می‌شود که به تغییر شکل پلاستیک نسبت داده می‌شود، در حالی که افت ناگهانی نیرو یا نوسانات شدید اغلب نشانه شکست ترد الیاف است. همچنین، آسیب‌هایی مانند ترک خوردگی زمینه یا جدایش بین لایه‌ها به صورت کاهش ظرفیت باربری و تغییرات در شیب بخش پس از اوج منحنی بروز می‌کنند. در هنگام ضربه، سطح خارجی چندلایه تحت کشش قرار گرفته و لایه‌های آلومینیومی به دلیل چقرمگی بالای خود قادر به تحمل تغییر شکل پلاستیک گسترده هستند در حالی که لایه‌های مرکب تردتر و با سفتی بالاتر، در برابر تغییر شکل موضعی مقاومت می‌کنند. این تفاوت رفتار مکانیکی، موجب بروز تنش‌های بین‌لایه‌ای و پدیده جدایش در فصل مشترک فلز و کامپوزیت می‌شود که نه تنها می‌تواند ناشی از ضعف چسبندگی باشد بلکه در افت عملکرد سازه‌ای تحت بارهای ضربه‌ای مکرر یا شدید نقش مهمی ایفا می‌کند.

در سطح انرژی پایین، نمودار نیرو-زمان (شکل 8) برای هر سه نمونه نشان‌دهنده رفتار مکانیکی الاستیک و آسیب جزئی است. شکل کلی منحنی‌ها متقارن بوده و با شیب ملایم تا پیک نیرو در حدود 4 کیلو نیوتن افزایش یافته و سپس به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابند. روند بدون افت ناگهانی پس از پیک نیرو، حاکی از آن است که مکانیزم اصلی جذب انرژی در این سطح، تغییر شکل پلاستیک محدود در لایه‌های فلزی بوده و هنوز شکست الیاف یا جدایش بین‌لایه‌ای نقشی غالبی نداشته‌اند. نوسانات اولیه در منحنی‌ها، به‌ویژه در بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم، احتمالاً مربوط به آغاز جدایش‌های خفیف در لایه‌های پشتی هستند که تأثیر محسوس بر یکپارچگی کلی سازه ندارند. این تحلیل با مشاهدات نمای برش‌خورده ماکروسکوپی نمونه‌ها در شکل‌های 11-الف، 11-د و 11-ز تأیید می‌شود. در این تصاویر، ساختار کلی سالم باقی‌مانده و تنها نشانه‌هایی از تغییر شکل پلاستیک موضعی در لایه‌های فلزی دیده می‌شود در حالی که لایه‌های کامپوزیتی بدون آسیب جدی حفظ شده‌اند.

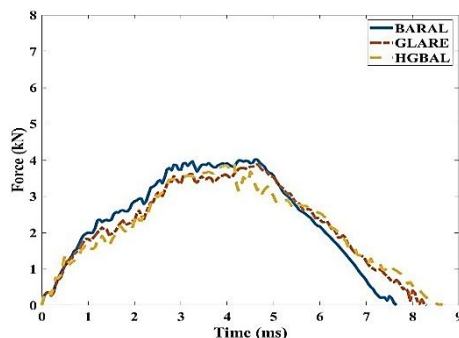
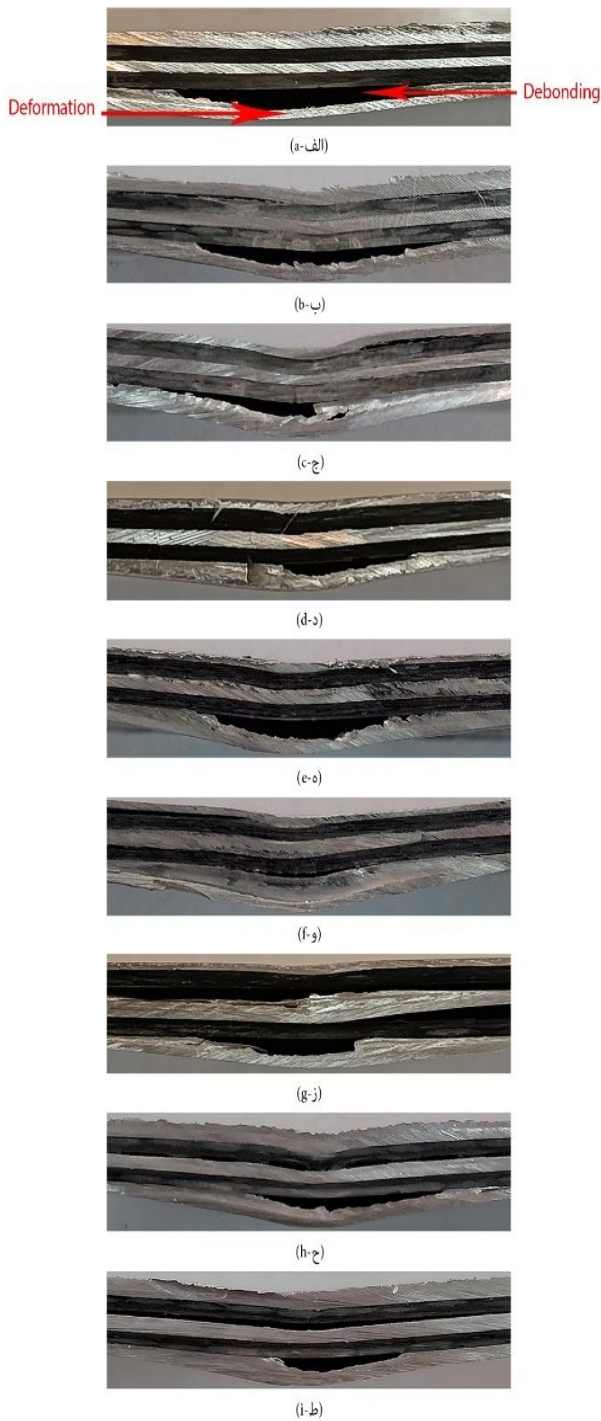


Fig. 8 Force-time responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at low energy level.

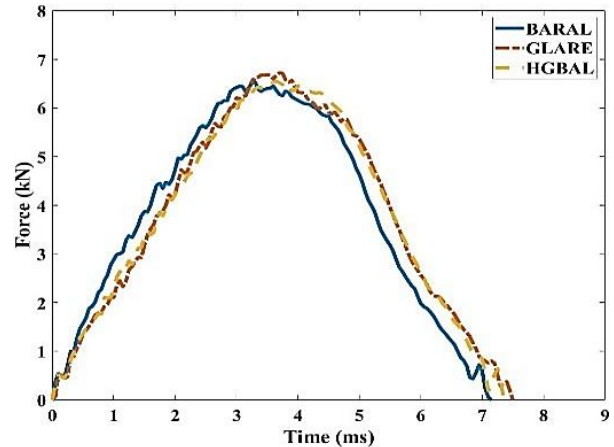
شکل 8 پاسخ نیرو-زمان نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی پایین.



**Fig. 11** Sectional views of fiber-metal laminates: a) GLARE at low energy level, b) GLARE at medium energy level, c) GLARE at high energy level, d) BARAL at low energy level, e) BARAL at medium energy level, f) BARAL at high energy level, g) HGBAL at low energy level, h) HGBAL at medium energy level, i) HGBAL at high energy level.

شکل 11 نمای برش خورده چندلایه‌های الیافی-فلزی: الف) گالر در سطح انرژی پایین، ب) گالر در سطح انرژی متوسط، ج) گالر در سطح انرژی بالا، د) بارال در سطح انرژی پایین، ه) بارال در سطح انرژی متوسط، و) بارال در سطح انرژی بالا، ز) چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم در سطح انرژی پایین، ح) چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم در سطح انرژی متوسط، ط) چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم در سطح انرژی بالا.

شکل در این حالت محدود است و باعث ایجاد جدایش‌های کوچک موضعی در ساختار چندلایه می‌شود که در تصاویر نمای جانبی شکل 11-و قابل مشاهده است. این رفتار نشان‌دهنده حفظ بخش بزرگی از یکپارچگی ساختاری چندلایه در این سطح انرژی برخورد است. همچنین، مکانیسم اصلی خرابی، تغییر شکل پلاستیک لایه‌های آلومینیومی است که بدون شکست الیاف قابل مشاهده است.



**Fig. 10** Force-time responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at high energy level.

شکل 10 پاسخ نیرو-زمان نمونه‌های گالر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی بالا.

نمودار نیرو - زمان نمونه ترکیب شیشه/بازالت - آلومینیوم کمی پایین‌تر از نمونه‌های دیگر قرار دارد؛ هرچند که همه نمودارها در یک محدوده بسیار نزدیک هستند. این نشان می‌دهد که جذب انرژی نمونه ترکیبی نسبت به سایر نمونه‌ها کمی کمتر است. نمای برش خورده نمونه که در شکل 11-ط نشان داده شده، آسیب محدودی را به تصویر می‌کشد و حاکی از حفظ نسبی یکپارچگی ساختاری در این سطح انرژی برخورد است.

رفتار نیرو-جابجایی در چندلایه‌های الیافی-فلزی تحت برخورد با سرعت پایین بینش ارزشمندی درباره سفتی سازه‌ای، مقاومت در برابر تغییر شکل و ظرفیت بازیابی الاستیک ارائه می‌دهد. نتایج مربوط به هر سه نمونه در شکل‌های 12، 13 و 14 نمایش داده شده‌اند که پاسخ سازه را در سه سطح انرژی ضربه‌ای پایین، متوسط و بالا نشان می‌دهند. بررسی این نمودارها امکان شناسایی سه حالت اصلی آسیب را فراهم می‌کند: بازیابی، نفوذ و سوراخ. در حالت بازیابی، منحنی نیرو-جابجایی بسته است؛ یعنی ضربه‌زننده پس از برخورد به سطح نمونه بازمی‌گردد و نیروی مثبت‌شده به صفر می‌رسد که بیانگر آسیب سطحی و عدم تغییرات ساختاری چشمگیر است. حالت نفوذ با منحنی باز مشخص می‌شود، به گونه‌ای که نیروی مثبت‌شده پس از برخورد به صفر بازمی‌گردد و نشان‌دهنده ورود ضربه‌زننده به داخل نمونه و بروز آسیب‌های داخلی است. در حالت سوراخ، که شدیدترین نوع آسیب به شمار می‌رود، منحنی نیز باز باقی می‌ماند اما شدت ضربه به حدی است که ضربه‌زننده می‌تواند نمونه را به طور کامل سوراخ کند. علاوه بر نوع منحنی، شیب بخش افزایشی که بیانگر سختی خمشی نمونه است و همچنین میزان جابجایی نهایی، شاخص‌های کلیدی برای ارزیابی مقاومت و گستره آسیب در این ساختارها محسوب می‌شوند.

شده و تفاوت چشمگیری بین آنها وجود ندارد. این موضوع حاکی از آن است که نمونه‌ها در این محدوده‌های انرژی می‌توانند بخش زیادی از یکپارچگی و مقاومت خود را حفظ کنند.

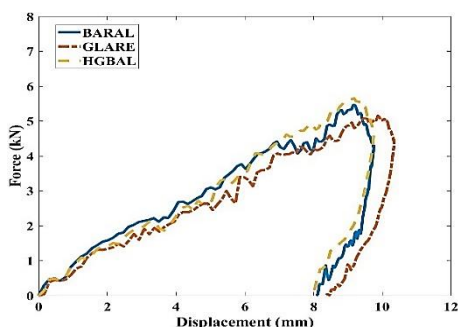


Fig. 13 Force-displacement responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at medium energy level.

شکل 13 پاسخ نیرو-جابجایی نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی متوسط.

از نظر روند کلی، هر سه نمونه در یک ناحیه بسیار مشابه از نمودار نیرو-جابجایی قرار دارند که نشان‌دهنده رفتار مشابه در جذب انرژی ضربه و انتقال بار است. تفاوت‌های جزئی در میزان پیک نیرو یا نوسانات کوچک نمودارها نیز در حدی است که نمی‌تواند تغییرات عمده در رفتار مکانیکی نمونه‌ها را نشان دهد.

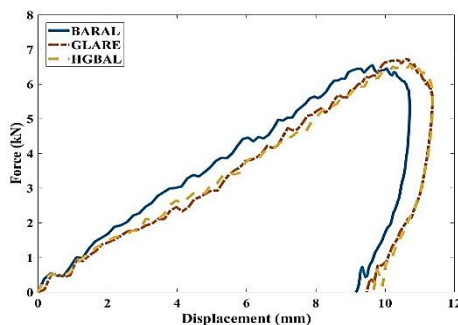


Fig. 14 Force-displacement responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at high energy level.

شکل 14 پاسخ نیرو-جابجایی نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی بالا.

پاسخ انرژی جذب شده - زمان اطلاعات مهمی را درباره روند جذب انرژی و تخریب ساختاری چندلایه‌های الیافی - فلزی تحت ضربه سرعت پایین ارائه می‌دهد. شکل‌های 15، 16 و 17 نمودارهای انرژی جذب شده-زمان نمونه‌های گلر، بارال و ترکیبی را در سطوح انرژی برخورد پایین، متوسط و بالا نشان می‌دهند.

شکل 15 نمودارهای انرژی جذب شده-زمان را برای سه نمونه مختلف در سطح انرژی پایین نشان می‌دهد. نمودارها روندی یکنواخت و هم‌پوشان را بین سه نمونه نشان می‌دهد. شکل نمودارها در هر سه نمونه نشان می‌دهد مقدار بیشتری از انرژی ضربه جذب شده، بدون اینکه منجر به خرابی درونی یا نفوذ کامل در سازه شود. همچنین مقدار کمتری از انرژی برای هر سه نمونه به صورت الاستیک باقی مانده است. این ویژگی‌ها به‌طور مشخص بیانگر توان بالای هر سه ساختار در جذب انرژی‌های ضربه‌ای پایین به شیوه‌ای مؤثر و قابل اطمینان است.

شکل 12 پاسخ نیرو - جابجایی سه نمونه مختلف را در سطح انرژی پایین نشان می‌دهد. منحنی‌های به‌دست آمده در هر سه نمونه که به صورت منحنی بسته می‌باشند نشان‌دهنده میزان آسیب کم و بازگشت ضربه زنده پس از بارگذاری هستند، با توجه به منحنی‌ها در هر سه نمونه تغییر شکل در نمونه‌ها مشاهده می‌شود. نمونه‌ی گلر با بیشترین جابجایی نهایی، انعطاف‌پذیری بالاتری از خود نشان داده است، در حالی که نمونه‌ی بارال با نیروی پیک بالاتر و جابجایی کمتر، رفتاری مقاوم‌تر و نسبتاً ترد دارد. چندلایه‌ی ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم نیز بین این دو قرار می‌گیرد و با جذب مناسب نیرو و جابجایی متعادل، عملکردی ترکیبی از مقاومت و انعطاف را ارائه می‌دهد.

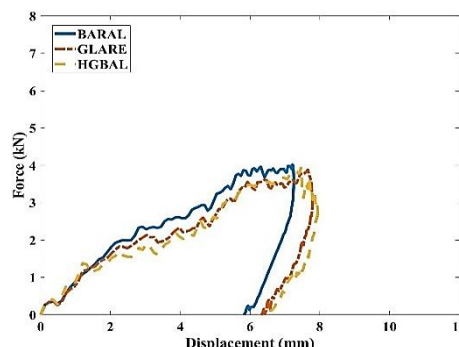


Fig. 12 Force-displacement responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at low energy level.

شکل 12 پاسخ نیرو-جابجایی نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی پایین.

شکل 13 پاسخ نیرو-جابجایی سه نمونه مختلف را در سطح انرژی متوسط نشان می‌دهد. در این سطح انرژی نیز منحنی مربوط به هر سه نمونه به‌صورت بسته می‌باشد که گویای پاسخ الاستیک مؤثر و مقاومت ساختاری بالای آن‌ها در برابر ضربه است.

در نمونه گلر، منحنی نیرو - جابجایی با جابجایی بیشتر نسبت به بقیه همراه بوده و نشان می‌دهد که ساختار داخلی چندلایه، هرچند بدون بروز آسیب جدی یا جدایش بین لایه فلزی و کامپوزیتی، انرژی ضربه را جذب و آزاد کرده است؛ اما با آسیب‌های به‌مراتب بیشتر بوده است. نمونه بارال نیز رفتاری مشابه داشته و ضمن ثبت نیروی اوج مناسب، هیچ‌گونه نشانه‌ای از نفوذ یا تخریب ساختاری بروز ن داده است. در این حالت، تغییر شکل محدود باقی‌مانده و یکپارچگی بین لایه‌های فلزی و پلیمری حفظ شده است. همچنین، نمونه چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت - آلومینیوم نیز با نمودار نیرو-جابجایی حلقه‌ای بسته و قله‌ای قابل‌مقایسه، مقاومت قابل‌توجهی در برابر ضربه نشان داده است؛ بدون اینکه نشانه‌ای از تخریب درونی قابل‌مشاهده باشد.

مطابق شکل 14، در سطح انرژی بالا نمودارهای نیرو - جابجایی برای نمونه‌های گلر، بارال و چندلایه ترکیبی شیشه/بازالت-آلومینیوم در یک بازه بسیار نزدیک به هم قرار دارند و شکل کلی آن‌ها بسیار مشابه است. این موضوع نشان می‌دهد که واکنش نمونه‌ها به ضربه در این سطح انرژی از نظر رفتار مکانیکی تقریباً یکسان است. در این سطح انرژی نیز، تمامی منحنی‌ها دارای شکل بسته هستند که بیانگر یک پاسخ عمدتاً الاستیک و بازگشت‌پذیر همراه با تغییرشکل پلاستیک محدود می‌باشد.

با افزایش سطح انرژی برخورد، میزان جابجایی ضربه‌زنده در تمام نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ این افزایش جابجایی در نمودارها به‌خوبی مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده نفوذ بیشتر ضربه‌زنده به داخل ساختار نمونه‌ها است. با این حال، علی‌رغم این افزایش جابجایی، شکل کلی نمودارها همچنان حفظ

تغییر شکل‌های موضعی بدون بروز خرابی فاجعه‌آمیز یا نفوذ کامل ضربه است. نتایج نشان می‌دهد که حتی با افزایش انرژی برخورد، هر سه نمونه توان مناسبی در مدیریت و توزیع آسیب داخلی داشته و مقاومت ساختاری خود را تا حد قابل توجهی حفظ می‌کنند.

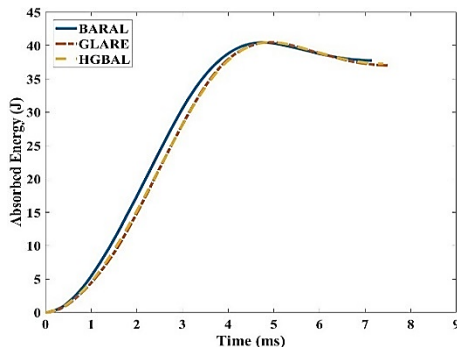


Fig. 17 Absorbed energy-time responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at high energy level.

شکل 17 پاسخ انرژی جذب شده-زمان نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی بالا.

#### 4- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش، مقایسه رفتار سه نوع ساختار چندلایه شامل گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت - آلومینیوم تحت بارگذاری‌های کششی، خمشی و ضربه‌ای بود. نتایج به‌دست‌آمده تفاوت‌های معناداری در رفتار مکانیکی این چندلایه‌ها نشان داد. در ادامه، مهم‌ترین یافته‌های تحقیق به تفکیک هر حالت بارگذاری و انرژی برخورد ارائه می‌شود:

- مطالعه رفتار کششی چندلایه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم نشان داد که هر سه ساختار از روند چهاربخشی الاستیک، تسلیم، کرنش سختی و شکست تبعیت می‌کنند. نمونه گلر با بیشترین سفتی اولیه، تنش تسلیم بالا (245 مگاپاسکال) و مقاومت نهایی قابل توجه (315 مگاپاسکال)، عملکرد مکانیکی برتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشت. در مقابل، بارال و نمونه ترکیبی با سفتی و مقاومت نهایی نسبتاً پایین‌تر، رفتار یکنواخت و پیوسته‌ای را از خود نشان دادند. این نتایج بیانگر نقش مؤثر نوع الیاف و کیفیت اتصال بین‌لایه‌ای در تحمل بارکششی و پایداری سازه‌ای است.

- آزمون خمش نیز الگوی چهارمرحله‌ای مشابهی را برای هر سه نمونه نشان داد. گلر با مقاومت خمشی بالاتر (285 مگاپاسکال) و کرنش نهایی بیشتر (0.099mm/mm)، از شکل‌پذیری بالاتری نسبت به بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم برخوردار بود. سفتی خمش نمونه بارال بیشتر از سایر نمونه‌ها بود.

- نتایج نمودارهای نیرو - زمان در سه سطح انرژی برخورد نشان داد که هر سه ساختار گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت - آلومینیوم در برابر ضربه رفتار مشابهی دارند و توانسته‌اند انرژی ضربه را به‌صورت تدریجی و بدون افت ناگهانی جذب کنند. در انرژی‌های پایین، رفتار عمدتاً الاستیک بوده و نوسانات محدود بوده‌اند در حالی که با افزایش انرژی، شدت نوسانات بیشتر شده که به بروز آسیب‌های موضعی و جدایش چشمگیر در لایه‌های کامپوزیتی و آلومینیومی پشتی مربوط می‌شود. در تمامی سطوح انرژی اعمال شده، شکست لایه‌های کامپوزیت و ترک در ورق آلومینیومی اتفاق نیفتاد.

- نمودارهای نیرو - جابه‌جایی نشان دادند که با افزایش سطح انرژی برخورد، میزان جابه‌جایی ضربه‌زننده در همه نمونه‌ها افزایش یافت؛ اما شکل

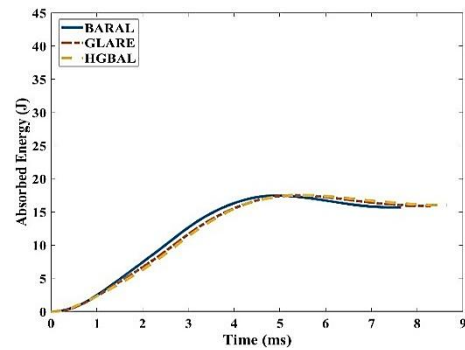


Fig. 15 Absorbed energy-time responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at low energy level.

شکل 15 پاسخ انرژی جذب شده-زمان نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی پایین.

شکل 16 نمودارهای انرژی جذب شده-زمان را برای سه نمونه مختلف در سطح انرژی متوسط نشان می‌دهد. در این سطح انرژی نیز، هر سه نوع نمونه رفتار مشابهی از خود بروز می‌دهند. میزان انرژی جذب شده برای هر سه نمونه تقریباً برابر و در حدود 28 الی 30 ژول است. شکل نمودار نشان می‌دهد که قسمت بیشتری از انرژی ضربه جذب شده و قسمتی از آن به‌صورت الاستیک باقی مانده است. این موضوع نشان‌دهنده عدم وجود آسیب داخلی قابل توجه یا نفوذ کامل ضربه‌زننده در ساختار چندلایه‌ها است. این رفتار مشابه در هر سه نمونه گویای حفظ یکپارچگی ساختاری و توانایی مناسب آن‌ها در جذب انرژی ضربه در این سطح انرژی پایین می‌باشد.

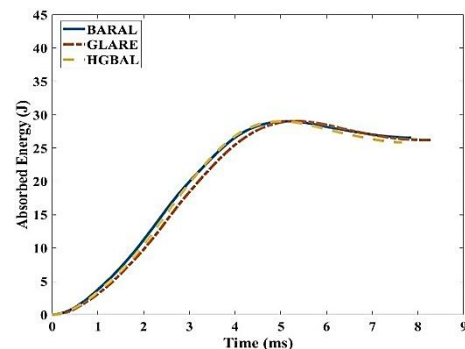


Fig. 16 Absorbed energy-time responses of GLARE, BARAL, and HGBAL specimens under low-velocity impact at medium energy level.

شکل 16 پاسخ انرژی جذب شده-زمان نمونه‌های گلر، بارال و ترکیب شیشه/بازالت-آلومینیوم تحت ضربه سرعت پایین در سطح انرژی متوسط.

مطابق شکل 17 در سطح انرژی بالا، نمودارهای انرژی جذب شده-زمان برای هر سه نوع نمونه، روندی نسبتاً مشابه و پیوسته در جذب انرژی نشان می‌دهند. این نمودارها دارای شیب نسبتاً یکنواخت هستند ولی شیب بیشتر نمونه بارال نشان دهنده سفتی خمشی بالای این نمونه است. سفتی بالای خمشی نمونه بارال باعث می‌شود که زمان تماس ضربه نسبت به دو نمونه دیگر کمتر شود. این موضوع بخوبی در نمودارهای نیرو-زمان و نیرو-جابه‌جایی مشهود بود. نمودارها نشان می‌دهند در این سطح از انرژی نیز تمام انرژی ضربه به‌صورت کامل جذب نشده و قسمتی از آن به‌صورت الاستیک باقی مانده است. این رفتار نشان دهنده توانایی هر سه ساختار در جذب انرژی به‌صورت تدریجی و کنترل شده در این سطح انرژی است. شکل کلی منحنی‌ها حاکی از مکانیزم‌های آسیب تدریجی مانند جدایش‌های محدود بین‌لایه‌ای و

[7] Bellini, C., Di Cocco, V., Iacoviello, F., Sorrentino, L., "Influence of Structural Characteristics on the Interlaminar Shear Strength of Cfrp/Al Fibre Metal Laminates" *Procedia Structural Integrity*, Vol. 18, pp. 373–378, 2019.

[8] Das, R., Chanda, A., Brechou, J., Banerjee, A., "Impact Behaviour of Fibre-Metal Laminates" in: *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*, Eds., pp. 535–598: Elsevier, 2023.

[9] 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" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 4, pp. 2634–2644, 2025.

[10] Khodaei, M., Safarabadi, M., Haghghi-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.

[11] 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.

[12] Sarkhosh, R., "Experimental Study of Energy Absorption Capacity of Spring-Reinforced Honeycomb Structures Filled with Polyurethane Foam under Quasi-Static Loading" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 3, pp. 2554–2562, 2024.

[13] Sarkhosh, R., "Experimental Study of Energy Absorption Characteristic of Sunflower-Inspired Foam-Filled Honeycomb Structure under out-of-Plane Loading" *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 11, No. 2, pp. 2512–2520, 2024.

[14] Zarei, H., Shahnazar, P., Meskini, M., Sarkhosh, R., "Ballistic Performance Analysis of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Uhmwpe) Composite" *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 347–346, 2022.

[15] He, W., Wang, L., Liu, H., Wang, C., Yao, L., Li, Q., Sun, G., "On Impact Behavior of Fiber Metal Laminate (Fml) Structures: A State-of-the-Art Review" *Thin-Walled Structures*, Vol. 167, pp. 108026, 2021.

[16] Zhou, J., Wen, P., Wang, S., "Numerical Investigation on the Repeated Low-Velocity Impact Behavior of Composite Laminates" *Composites Part B: Engineering*, Vol. 185, pp. 107771, 2020.

[17] Demiral, M., Abbassi, F., Saracyakupoglu, T., Habibi, M., "Damage Analysis of a Cfrp Cross-Ply Laminate Subjected to Abrasive Water Jet Cutting" *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 61, No. 10, pp. 7669–7684, 2022.

[18] Chen, Y., Chen, L., Huang, Q., Zhang, Z., "Effect of Metal Type on the Energy Absorption of Fiber Metal Laminates under Low-Velocity Impact" *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 29, No. 25, pp. 4582–4598, 2022.

[19] Vasudevan, B., Nagarajan, L., Durvasulu, R., Ansari, M. A., "Unlocking the Potential of Copper-Reinforced Fibre Metal Laminates: The Influence of Stacking Sequences" *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 33, pp. 6546–6558, 2024.

[20] Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S., "Influence of Nanofillers on Biodegradable Composites: A Comprehensive Review" *Polymer composites*, Vol. 42, No. 11, pp. 5691–5711, 2021.

[21] Gao, H., Jiang, B., Lei, S., Hu, L., Dai, H., Cheng, Z., Li, X., Wang, L., "Comparisons between Basalt for Continuous Fiber and Ordinary Basalt" *Ceramics International*, Vol. 51, No. 1, pp. 132–146, 2025.

[22] kumar Gara, D., Raghavendra, G., Prasad, P. S., "Enhanced Mechanical Properties of Glass Fibre Epoxy Composites by 2d Exfoliated Graphene Oxide Filler" *Ceramics International*, Vol. 47, No. 24, pp. 34860–34868, 2021.

[23] Jamir, M. R., Majid, M. S., Khasri, A., "Natural Lightweight Hybrid Composites for Aircraft Structural Applications" in: *Sustainable*

کلی نمودارها، همچنان به صورت حلقه بسته و بازگشت‌پذیر باقی ماند. این موضوع بیانگر رفتار الاستیک - پلاستیک کنترل شده و مقاومت مناسب ساختارها در برابر نفوذ است. نمونه گلر بیشترین جابه‌جایی را ثبت کرد که حاکی از انعطاف‌پذیری بیشتر آن در برابر ضربه است، - بر اساس نمودارهای انرژی - زمان، هر سه نمونه در تمامی سطوح انرژی ضربه، مقدار بیشتری از انرژی را جذب کردند و مقدار کمتری از انرژی به صورت الاستیک باقی ماند. شکل منحنی‌ها حاکی از مکانیزم‌های آسیب تدریجی مانند جدایش‌های محدود بین‌لایه‌ای و تغییر شکل‌های موضعی بدون بروز خرابی فاجعه‌آمیز یا نفوذ کامل ضربه بود. نتایج نشان دادند که هر سه نمونه در سطوح انرژی ضربه اعمال شده، توان مناسبی در مدیریت و توزیع آسیب داخلی داشته و مقاومت ساختاری خود را تا حد قابل توجهی حفظ می‌کنند.

## 5- فهرست علائم

$v(t)$  سرعت جسم در زمان  $t$  (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)

$E_a(t)$  انرژی جذب شده (J)

$C_E$  نسبت انرژی سقوط به ضخامت (J/mm)

## علائم یونانی

$\sigma$  تنش ( $Nm^{-2}$ )

$\epsilon$  کرنش

$\delta(t)$  جابه‌جایی جسم در زمان  $t$  (m/s)

$\delta_i$  جابه‌جایی اولیه جسم (m)

## زیرنویس‌ها

0 اولیه

$i$  مقدار اولیه

$a$  جذب شده

## 6- مراجع

[1] Zuo, P., Srinivasan, D. V., Vassilopoulos, A. P., "Review of Hybrid Composites Fatigue" *Composite Structures*, Vol. 274, pp. 114358, 2021.

[2] Alderliesten, R., "Fatigue in Fibre Metal Laminates: The Interplay between Fatigue in Metals and Fatigue in Composites" *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 42, No. 11, pp. 2414–2421, 2019.

[3] Morinière, F., Alderliesten, R., Sadighi, M., Benedictus, R., "An Integrated Study on the Low-Velocity Impact Response of the Glare Fibre-Metal Laminate" *Composite Structures*, Vol. 100, pp. 89–103, 2013.

[4] Bieniaś, J., "Fibre Metal Laminates-Some Aspects of Manufacturing Process, Structure and Selected Properties" *Composites*, Vol. 11, No. 1, pp. 39–43, 2011.

[5] Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., Çoban, O., "A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods" *Materials & Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671–3685, 2011.

[6] Xu, R., Huang, Y., Lin, Y., Bai, B., Huang, T., "In-Plane Flexural Behaviour and Failure Prediction of Carbon Fibre-Reinforced Aluminium Laminates" *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 36, No. 18, pp. 1384–1399, 2017.

- Composites for Aerospace Applications*, Eds., pp. 155–170: Elsevier, 2018.
- [24] Alcaraz, M., Alderliesten, R. C., Mosleh, Y., “Flax-Reinforced Aluminum (Flare): A Bio-Based Fiber Metal Laminate Alternative Combining Impact Resistance and Vibration Damping” *Advanced Engineering Materials*, Vol. 27, No. 5, pp. 2400183, 2025.
- [25] Cheng, Z.-Q., Xia, J., Liu, H., Zhu, Z.-W., Tan, W., “Compressive Failure Mechanisms of Fibre Metal Laminates with 2/1 and 3/2 Configurations after Low-Velocity Impact” *Thin-Walled Structures*, Vol. 211, pp. 113112, 2025.
- [26] Hassan, M. K., Abdellah, M. Y., Azabi, S., Marzouk, W., “Investigation of the Mechanical Behavior of Novel Fiber Metal Laminates” *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, Vol. 15, No. 3, pp. 112–118, 2015.
- [27] Ansari, E., majzoobi, G., Rahmani, K., Kashfi, M., “The Effect of Middle Layer Material and Thickness on the Quasi-Static Energy Absorption of Fml” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 427–436, 2018.
- [28] Eslami-Farsani, R., Asghari -Arpatappeh, F., Abdollahi -Azghan, M., “Effect of Cryogenic Environmental Condition Upon Flexural Properties of Aluminum- Epoxy/ Basalt Fibers- Glass Fibers Laminates” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 4, pp. 541–548, 2020.
- [29] Abdollahi Azghan, M., Fallahnejad, M., Zamani, A., Eslami-Farsani, R., “Investigation the Flexural Behavior of Fiber Metal Laminates Containing Glass and Kevlar Fibers Subjected to Thermal Cycling” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No. 3, pp. 981–988, 2020.
- [30] Malekzadeh-Fard, K., Azarnia, A. h., Zolghadr, N., “Analytical Modeling to Predict Dynamic Response of Fiber-Metal Laminated Panel Subjected to Low Velocity Impact” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 331–342, 2018.
- [31] Mohamad Zaheri, F., Mohammadi, B., Taheri-Behrooz, F., “Study of Damage in Fiber Metal Laminate Including Matrix Cracking, Delamination and Plasticity of Metal Layer” *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 10, No. 4, pp. 2377–2386, 2024.
- [32] Azhdari, S., Taheri-Behrooz, F., “An Experimental and Numerical Investigation on Bending after Impact Strength of Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 171, pp. 107578, 2023.
- [33] Gonzalez-Canche, N., Flores-Johnson, E., Carrillo, J., “Mechanical Characterization of Fiber Metal Laminate Based on Aramid Fiber Reinforced Polypropylene” *Composite structures*, Vol. 172, pp. 259–266, 2017.
- [34] 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*, Vol. 11, No. 4, pp. 2584–2596, 2025.
- [35] Astm D3039/D3039m-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM .
- [36] Astm D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM .
- [37] Astm D7136/D7136m-15 Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, ASTM .