



## بررسی آزمایشگاهی اثر دما و نرخ کرنش بر رفتار مکانیکی و تورق گلار ۲/۱ تحت بار خمشی

علی شیرافکن<sup>۱</sup>، غلامحسین مجذوبی<sup>۲</sup>، محمد کشفی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آیت الله بروجردی (ره)، بروجرد، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: m.kashfi@abru.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۳۱ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۲۷ آبان ۱۴۰۲

#### کلیدواژگان:

تورق

خمش سه نقطه‌ای

دما

نرخ کرنش

خواص مکانیکی

ورقه‌های فلزی الیافی در دهه گذشته به دلیل خواص مکانیکی مطلوب مورد توجه صنایع هوایی و خودروسازی قرار گرفته‌اند. این لمینت‌ها از لایه‌های فلزی نازک و یک‌لایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند. گلار ۲/۱ از یک‌لایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه تشکیل شده که بین دولایه آلومینیوم ۲۰۲۴ قرار گرفته است. این مطالعه به بررسی تأثیر دما و نرخ کرنش بر روی رفتار مکانیکی گلار ۲/۱ تحت بارگذاری خمشی تمرکز دارد. نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه و در دماهای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس تحت آزمایش خمش قرار گرفتند. منحنی‌های نیرو-جابجایی برای خمش سه نقطه‌ای در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف استخراج شدند. تغییر شکل لایه‌ها با استفاده از فن‌آوری پردازش تصویر رصد شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۲۵ به ۱۰۰ درجه سلسیوس، حداکثر نیروی خمشی کاهش قابل توجهی دارد. این کاهش برای نرخ بارگذاری ۰/۰۳ بر ثانیه ۵۱٪ و برای نرخ بارگذاری ۰/۳ بر ثانیه، ۳۰٪ بود. با این حال، افزایش در نرخ بارگذاری گلار ۲/۱ منجر به افزایش بیشتر حداکثر نیروی خمشی شد. برای تمامی دماها، افزایش نرخ بارگذاری نیز باعث افزایش ضریب الاستیک خمشی شد. همچنین، نتایج نشان داد که با استفاده از تغییر شکل‌های به‌دست آمده در دماها و نرخ‌های بارگذاری مختلف، می‌توان تغییر شکل گلار ۲/۱ را در فرآیندهای شکل‌دهی کنترل نمود.

## An experimental study on the influence of temperature and strain rate on the mechanical properties and delamination of GLARE 2/1 under bending load

Ali Shirafkan<sup>1</sup>, Gholamhossein Majzoubi<sup>2</sup>, Mohammad Kashfi<sup>3\*</sup>

1- PhD Student, Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Professor, Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3- Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran

\* Corresponding Author's Email: m.kashfi@abru.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 22 August 2023

Accepted: 18 November 2023

#### Keywords:

Delamination

3-Point Bending

Temperature

Strain Rate

Mechanical Properties

### Abstract

Fiber metal laminates have garnered attention from the aviation and automotive industries due to their favorable mechanical properties. These laminates consist of thin metal layers and a fiber-reinforced epoxy layer. This study focuses on investigating and analyzing the impact of temperature and strain rate on GLARE 2/1 under bending conditions. GLARE 2/1 are composed of one layer of epoxy reinforced with glass fibers sandwiched between two layers of aluminum 2024. The samples were subjected to bending with loading rates of 0.03 and 0.3 1/s at temperatures of 25, 60, and 100 degrees Celsius. The force-displacement curves were extracted for three-point bending at different temperatures and strain rates. The deformation of the layers was observed using digital image correlation technology. The results indicate that, in GLARE 2/1 and at a constant loading speed, with increasing temperature, the maximum bending force decreases, this value decreased by 51% at a loading rate of 0.031/s and at 100 degrees Celsius compared to 25 degrees Celsius and this value decreased 30% at a loading rate of 0.3 1/s. Increasing the loading speed in GLARE 2/1 samples leads to a greater increase in the maximum bending force. The bending elastic coefficient at a loading rate of 0.3 1/s is higher than at a loading rate of 0.03 1/s at all temperatures. By utilizing the deformations obtained under different temperature and loading conditions, it is possible to control the deformation of GLARE 2/1 in forming processes.

### Please cite this article using:

Shirafkan A, Majzoubi Gh, Kashfi M. An experimental study on the influence of temperature and strain rate on the mechanical properties and delamination of GLARE 2/1 under bending load. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 June 22;10(4):37-47. doi: 10.22034/IJME.2023.412900.1821 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، بسیاری از کشورهای پیشرفته سیاست‌های مرتبط با حفظ انرژی و کاهش انتشار آلودگی را اعلام کرده‌اند. در این راستا مواد سبک‌وزن مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند و به‌طور گسترده در بسیاری از زمینه‌های مهم مانند هوافضا، حمل و نقل و معماری استفاده واقع می‌شوند. هواپیماها و خودروهای سبک‌وزن نه تنها می‌توانند مصرف سوخت و آلودگی محیطی را تا حد زیادی کاهش دهند، بلکه می‌توانند عمر مفید قطعات اصلی را بهبود بخشند. در بیشتر کاربردهای صنعتی و سازه‌ای، پارامترهای مهم در انتخاب مواد، استحکام ویژه و هزینه است. برای رسیدن به این هدف، ورقه‌های فلزی-الیافی سبک‌وزن توسعه یافته‌اند. ورقه‌های فلزی-الیافی از لایه‌های فلزی نازک و لایه اپوکسی تقویت‌شده با الیاف تشکیل و از ساختارهای ترکیبی محسوب می‌شوند. خواص مکانیکی ورقه‌های فلزی-الیافی نسبت به خواص هر دو آلیاژ فلزی و مواد کامپوزیتی برتری دارد به‌طوری‌که از مزایای دو جزء مختلف (فلز و الیاف) همزمان بهره‌مند بوده و دارای خواص مکانیکی عالی مانند مقاومت در برابر خوردگی بالا و نسبت استحکام به وزن فوق‌العاده در مقایسه با لایه کامپوزیت معمولی می‌باشند [۱]. تجاری‌ترین ورقه‌های فلزی-الیافی موجود عبارت‌اند از ورقه آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف آرامید (آرال)<sup>۱</sup>، ورقه آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف شیشه (گلار)<sup>۲</sup> و ورقه آلومینیوم تقویت‌شده با الیاف کربن (کارال)<sup>۳</sup>. آرال دارای استحکام خوب، انعطاف‌پذیری بالا، چگالی کم، مقاومت در برابر خوردگی و خواص خستگی مناسب است. تنش کششی باقی‌مانده در لایه‌های فلزی پس از پخت، عملکرد ضعیف در فشار و جذب رطوبت توسط الیاف آرامید از نقاط ضعف آرال است [۲]. پیوند بین الیاف شیشه و چسبندگی گلار بسیار مطلوب‌تر از آرال است. به دلیل خواص عالی از گلار در قسمت‌های مختلفی از هواپیماهای ایرباس ۳۸۰ و بوئینگ ۷۵۷ استفاده می‌شود [۳].

ماس و همکاران [۴] آزمایش‌های کششی و برشی را بر روی ورقه‌های فلزی الیافی‌های مبتنی بر پلی‌اتر اتر کتون<sup>۴</sup> در دماهای مختلف انجام دادند. آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت برشی ۶۰٪ در دمای ۲۲۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. کای جین و همکاران [۵] اثرات متقابل دما و سرعت بارگذاری بر تغییر شکل تورق تحت شرایط کششی و خمشی را بررسی نمودند. چان مینگ جی و همکاران [۶] در مطالعه‌ای روابط بین مقاومت خمشی تیتانیوم/الیاف کربن- پلی‌اتر اتر کتون، برای سه چینش مختلف لایه‌ای در دماهای متفاوت را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که برای لمینت با ساختاری مشابه، هر چه دمای آزمایش بالاتر رود، مقاومت خمشی کمتر می‌شود. علاوه بر این، مقاومت خمشی سه نوع لمینت به ترتیب ۴۵/۴، ۴۸/۸ و ۴۵/۱ درصد در دمای ۲۲۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. در مطالعه راجکومار و همکاران [۷] تأثیر چینش لایه‌ها و نرخ کرنش بر رفتار خمشی چهار نوع از ورقه‌های فلزی-الیافی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد استحکام خمشی با افزایش نرخ کرنش کاهش می‌یابد. کوبیت و همکاران [۸] به کمک آزمون خمش سه نقطه‌ای تأثیر شوک‌های حرارتی را بر مکانیسم تخریب و استحکام برشی بین لایه‌های نمونه‌های گلار بررسی کردند. در این تحقیق، تورق در محدوده دمایی ۶۰- تا ۸۰+ درجه سلسیوس بررسی شد. نتایج نشان داد که استحکام برشی بین لایه‌ای و حالت شکست نمونه‌ها به تعداد سیکل شوک حرارتی بستگی دارد. در مطالعه هینز و همکاران [۹] بر روی نمونه‌های گلار مشخص شد که استحکام برشی لایه‌های درونی با افزایش دما به شدت کاهش یافته و در دمای پایین تورق بین لایه‌های الیاف پدیده غالب است. همچنین، نامبردگان دریافتند که استحکام خمشی با افزایش دما کاهش می‌یابد. کاریلو و کانتول [۱۰] به بررسی نمونه‌های ورقه‌های فلزی-الیافی ترموپلاستیک ساخته شده از لایه‌های پلیمر و ورقه‌های آلومینیوم پرداختند. آن‌ها دریافتند در دمای اتاق و در آزمایش خمش، چینش لایه‌ها تأثیر ثانویه بر خواص مکانیکی نمونه‌ها داشته و تنش حداکثر و کرنش شکست در همه نمونه‌ها شبیه است.

اوستاپیک و همکاران [۱۱] به بررسی سازوکارهای ترک‌خوردگی و شکست در نمونه‌های گلار در آزمایش خمش سه نقطه‌ای پرداختند. در این بررسی‌ها، حالت‌های شکست مشاهده شده عبارت بودند از شکستن الیاف، ترک‌خوردگی فاز زمینه، جدایش الیاف و زمینه، تورق و شکست لایه آندی. ویسنوم و اتکینسون [۱۲] در مطالعه خود بر روی گلار به این نتیجه رسیدند که در آزمایش خمش سه نقطه‌ای حداکثر تنش با افزایش ضخامت ورق آلومینیوم کاهش می‌یابد. همچنین، نامبردگان دریافتند که با افزایش ابعاد نمونه،

<sup>1</sup> Aramid reinforced Aluminum laminate (ARALL)

<sup>2</sup> Glass Reinforced Aluminum Laminate (GLARE)

<sup>3</sup> Carbon Reinforced Aluminum Laminate (CARALL)

<sup>4</sup> Polyether Ether Ketone (PEEK)

کرنش کاهش می‌یابد. جکسون و همکاران [۱۳] به بررسی اثر مقیاس ورق‌های فلزی-الیافی بر شکست در آزمایش خمش پرداختند. نتایج نشان داد که استحکام در منطقه الاستیک مستقل از اندازه نمونه است با این حال در چینش‌های مختلف ورقه‌ها تأثیر اندازه نمونه بر استحکام قابل مشاهده بود.

هاینس و همکاران [۱۴] در مطالعه خود بر روی چینش نوع یک (الیاز آلومینیوم ۶۰۶۱/الیاف کربن/الیاز آلومینیوم ۶۰۶۱/الیاف کربن/الیاز آلومینیوم ۶۰۶۱) و چینش نوع دو (الیاف کربن/الیاز آلومینیوم ۶۰۶۱/الیاف کربن/الیاز آلومینیوم ۶۰۶۱/الیاف کربن) و مقایسه آن‌ها با کامپوزیت خالص کربن پرداختند. هدف این مطالعه افزایش مقاومت در برابر ضربه، بهبود استحکام کششی و افزایش قابلیت خمشی بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد چینش نوع اول و سپس نوع دوم حداکثر مقادیر مقاومت کششی و ظرفیت تحمل بار نهایی در طول آزمایش خمشی را از خود نشان دادند. نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی آزمون‌های کششی و خمشی از همبستگی مطلوبی برخوردار بود.

مقاومت خمشی و شکل‌پذیری ورقه فلزی-الیافی (FML) با هسته سه‌بعدی با انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای و شبیه‌سازی عددی مدل المان محدود توسط لین و همکاران [۱۵]، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد ورقه فلزی-الیافی به‌عنوان صفحه رویی هسته سه‌بعدی، استحکام خمشی، سفتی و شکل‌پذیری را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. در مقاله چن و همکاران [۱۶] یک مدل تئوری خمشی اصلاح‌شده از ورقه‌های آلومینیومی ۵۰۵۲ تقویت‌شده با فیبر کربن ایجاد و استحکام خمشی به صورت تحلیلی پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که ورقه‌های فلزی-الیافی متشکل از سه لایه آلومینیوم و دو لایه الیاف بهترین خواص خمشی را دارند.

پانل‌های پوسته هواپیما به دلیل آن‌که در زمان طولانی در معرض آفتاب بوده و یا در آب و هوای گرم و خشک هستند، دمای ۸۰ درجه سلسیوس و در آب و هوای قطبی و در ارتفاعات بالا تا ۶۰- درجه سلسیوس را تجربه می‌کنند. به منظور اطمینان از ایمنی، طراحان باید بتوانند تأثیر این شرایط را بر رفتار محتمل آسیب سازه‌های هواپیما در نظر بگیرند [۱۷]. در حین پرواز، آگزوز موتور جت و سایر منابع حرارتی نیز می‌توانند نقاط داغ روی بال‌ها، بدنه و سایر قسمت‌های بیرونی ایجاد کنند. دمای نزدیک موتورها اغلب از ۱۵۰ درجه سلسیوس تجاوز می‌کند. حداکثر دمای استفاده مداوم برای ورقه‌های استاندارد گلار معمولاً حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس که با قرار گرفتن در معرض متناوب گرما، می‌تواند تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس را تحمل کنند. آلومینیوم می‌تواند دمای بسیار بالاتری را تحمل کند، اما الیاف شیشه و رزین اپوکسی حداکثر دمای قابل تحمل را محدود می‌کند. افزایش ضخامت ورق آلومینیومی به بهبود مقاومت حرارتی کلی کمک می‌کند.

در گلار، لایه آلومینیومی رسانایی حرارتی بالایی را فراهم می‌کند که به حفظ یکنواختی دما در سطح لمینت کمک می‌کند. لایه‌های الیاف شیشه و اپوکسی عایق حرارتی هستند. این امر انتقال حرارت به داخل/خارج از کابین را کاهش می‌دهد. گلار نسبت استحکام به وزن بالاتری نسبت به آلومینیوم در دماهای گرم و سرد دارد در نتیجه در برابر ترک خوردگی و شکست مقاومت می‌کند. این مزایا سبب شده گلار در مقایسه با آلومینیوم یا کامپوزیت‌ها، به ماده‌ای ایده‌آل برای بدنه هواپیما تبدیل شود.

نرخ کرنش در پروازهای عادی هواپیما معمولاً در حدود ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱ بر ثانیه است. در طول شرایط پرواز، هواپیما نرخ کرنش بالایی را تجربه کرده که می‌تواند موجب تغییر شکل و ارتعاش سریع بال‌ها و بدنه شوند. در نرخ کرنش بالا، مقاومت و شکل‌پذیری آلیاژهای آلومینیوم نسبت به بارگذاری استاتیک کاهش می‌یابد و بیشتر مستعد شکست می‌شوند. در مقابل، لایه‌های الیاف در گلار سفتی و استحکام بیشتری را در شرایط نرخ کرنش بالا نسبت به آلومینیوم فراهم می‌کنند. الیاف شیشه ترک‌ها را از بین می‌برند و انتشار ترک را در ساختار لمینت به تأخیر می‌اندازند. این عملکرد نرخ کرنش بالا را افزایش می‌دهد. بنابراین استفاده از گلار در هواپیما، تحمل آسیب و مقاومت در برابر ترک خوردگی ناشی از خستگی را در نرخ کرنش بالا فراهم می‌کند.

با بررسی پیشینه پژوهش می‌توان دریافت که باتوجه به اثر دما و نرخ کرنش بر خواص مکانیکی گلار، مطالعه دو متغیر مذکور در بررسی‌های مکانیکی موردنیاز است؛ لذا، در این مطالعه به بررسی هم‌زمان اثر دما و نرخ کرنش بر روی گلار ۲/۱ پرداخته شد و نتایج تغییر شکل، نیروی و ضریب خمشی نمونه‌ها تحت شرایط بارگذاری خمشی در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف ارائه می‌شود. همچنین، پدیده تورق با استفاده از تجهیزات فناوری پردازش تصویر اولین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و آزمایش‌ها

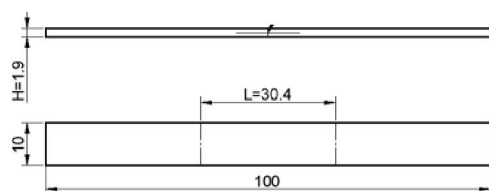
نمونه‌های گلار ۲/۱، از دو لایه بیرونی آلومینیوم و یک لایه میانی ماده مرکب شامل الیاف شیشه، رزین و سخت‌کننده به صورت لایه چینی دستی ساخته شدند. بدین منظور دو عدد لایه‌ی خارجی آلومینیوم T3-۲۰۲۴ با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و شش عدد لایه الیاف شیشه با چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر متر مربع تهیه شد. شکل ۱ (الف) نمایی از چینش لایه‌های مورد استفاده در گلار ۲/۱ را نشان می‌دهد. در ابتدا سطح داخلی لایه‌های آلومینیومی توسط سنباده شماره ۸۰ در دو جهت عمود برهم به منظور افزایش زبری سطح خراشیده شد. همچنین، برای حذف چربی و آلودگی قبل و بعد از عملیات سنباده‌زنی، از استون استفاده گردید. تمام لایه‌های الیاف در جهت نورد لایه‌های آلومینیومی و در جهت طول نمونه قرار گرفتند. فضای مشترک بین لایه‌های الیاف شیشه باهم و سطح مشترک بین ورق آلومینیوم و الیاف شیشه به کمک رزین اپوکسی آغشته شد. رزین مورد استفاده ترکیب اپوکسی آردیت<sup>۱</sup> و سخت‌کننده آرادور<sup>۲</sup> به دلیل خواص مکانیکی مناسب و استفاده در صنایع هوایی، انتخاب شد. بنابر پیشنهاد سازنده رزین اپوکسی، نمونه‌ها به مدت دو ساعت تحت فشار ۶ بار و دمای ۸۰ درجه سلسیوس در دستگاه پرس تخت داغ قرار گرفتند. پس از طی این زمان، به منظور تکمیل چرخه پخت، نمونه‌ها به مدت دو ساعت دیگر هم تحت فشار باقی‌مانده تا به صورت طبیعی به دمای اتاق برسند.

در انجام آزمایش‌ها از نمونه‌های تخت مستطیلی با ابعاد ۱۰۰×۱۰×۱/۹ میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM D3039 [۱۸] مطابق شکل ۱ (ب) استفاده شد. درصد حجمی فلز به کار رفته در نمونه تولید شده از نسبت مجموع ضخامت لایه‌های آلومینیوم تقسیم بر ضخامت کلی گلار ۲/۱ به دست می‌آید. با توجه به ضخامت دو لایه آلومینیوم (۰/۵×۲ میلی‌متر) و ضخامت کلی نمونه (۱/۹ میلی‌متر)، این درصد در ساخت نمونه‌ها برابر با ۵۳٪ به دست آمد. بر اساس نتایج تحقیقات قبلی [۱۹] برای آزمون خمش، نسبت دهانه (فاصله تکیه‌گاهی) به ضخامت (L/H) ۱۶ تعیین شد. مقادیر H و L به ترتیب ضخامت و طول سنجه نمونه می‌باشند که در شکل ۱ (ب) نشان داده شده‌اند. در شکل ۱ (ج) لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت در نمونه ساخته شده مشاهده می‌شود.

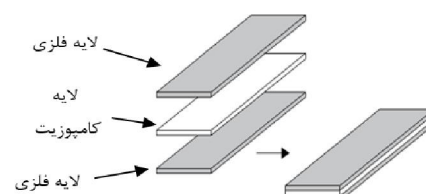
به منظور انجام آزمایش‌ها از دستگاه کشش ساخت شرکت سنتام با ظرفیت ۱۵ تن، لوازم داده‌برداری و تجهیزات فناوری پردازش تصویر شامل یک دوربین و یک منبع نوری مطابق شکل ۲ استفاده شد. همچنین، به منظور انجام آزمایش در دماهای بالاتر از دمای اتاق از یک دمنده گرم صنعتی به همراه یک دماسنج غیر تماسی لیزری نیز استفاده گردید. قطر غلتک‌های استفاده‌شده در آزمایش خمش سه نقطه‌ای برابر با ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها، تصویربرداری با سرعت ۵۰ فریم بر ثانیه انجام شد. در جدول‌های ۱ و ۲، نمونه‌های آلومینیوم و گلار ۲/۱ برحسب دما و سرعت بارگذاری کدگذاری شده‌اند.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۱ الف) نحوه چیدمان گلار ۲/۱، ب) ابعاد نمونه و ج) نمونه ساخته‌شده

جدول ۱ کدگذاری نمونه‌های آلومینیوم در دما و سرعت‌های آزمایش مختلف

سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)		
	۲۵	۶۰	۱۰۰
۰/۰۸۳۳	Al25L	Al60L	Al100L
۰/۸۳۳۳	Al25H	Al60H	Al100H

<sup>1</sup> Araldite LY5052

<sup>2</sup> Aradur5052

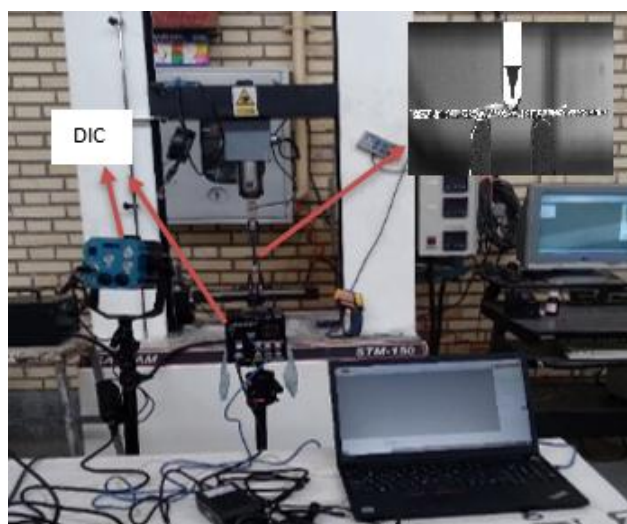
جدول ۲ کدگذاری نمونه‌های گلار ۲/۱ در دما و سرعت‌های آزمایش مختلف

سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)		
	۲۵	۶۰	۱۰۰
۰/۰۸۳۳	G25L	G60L	G100L
۰/۸۳۳۳	G25H	G60H	G100H

برای انجام آزمایش تورق، در ابتدا از نرخ کرنش کمتر برای تعیین ویژگی‌هایی مانند مقاومت تورق و چقرمگی شکست استفاده شد. سپس، به منظور بررسی چگونگی تغییر آن ویژگی‌ها با سرعت بارگذاری، از نرخ کرنش‌ها بالاتر استفاده گردید. برای محاسبه نرخ کرنش ( $\dot{\epsilon}$ ) در آزمایش خمش سه نقطه‌ای از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۲۰]:

$$\dot{\epsilon} = \frac{6hV}{L^2} \quad (1)$$

که در آن  $V$  سرعت جابه‌جایی فک دستگاه برحسب میلی‌متر بر ثانیه،  $L$  فاصله تکیه‌گاه‌ها برحسب میلی‌متر و  $h$  ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر است. با توجه به سرعت جابه‌جایی فک متحرک دستگاه، نرخ کرنش‌های اعمال‌شده به ترتیب برابر  $۰/۰۳$  و  $۰/۳$  بر ثانیه به دست آمد.



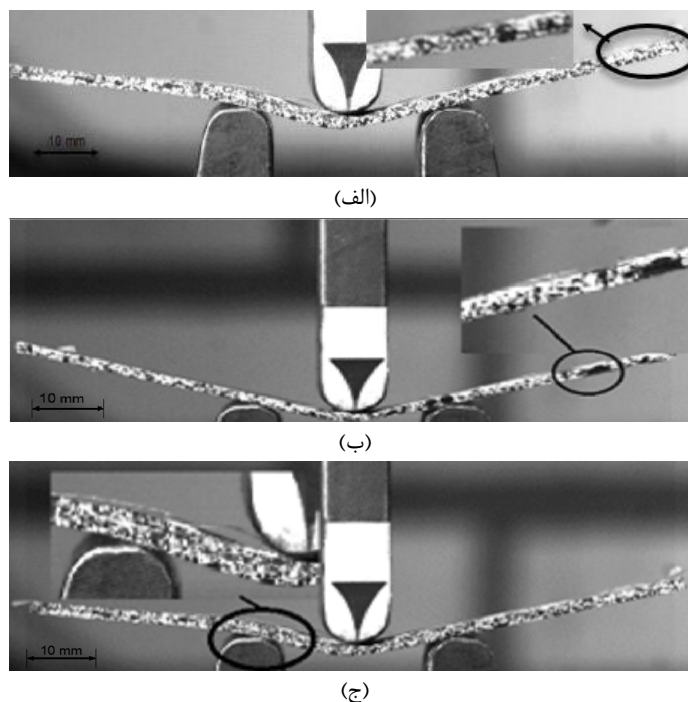
شکل ۲ تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای

### ۳- بحث و نتایج

تورق به جداسدن لایه‌ها در یک ورقه فلزی الیافی اشاره دارد، تورق زمانی رخ می‌دهد که پیوند بین لایه‌ها ضعیف یا از بین برود که این می‌تواند به دلیل عوامل مختلفی مانند تنش مکانیکی، تغییرات دما، جذب رطوبت یا نقص در ساخت اتفاق بیفتد. تورق یک مسئله مهم است زیرا می‌تواند منجر به کاهش ظرفیت باربری، کاهش سفتی و افزایش حساسیت به خستگی و شکست شود. تشخیص و جلوگیری از تورق در حصول اطمینان از عملکرد قابل اعتماد ورقه‌های فلزی-الیافی در کاربردهایی مانند صنایع هوایی و خودروسازی بسیار مهم است.

در شکل ۳، تصویر نمونه‌های (الف) G25L، (ب) G60L و (ج) G100L تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای در لحظه بروز اولین تورق که متناظر نقاط بیشینه نمودار نیروی خمشی-جابه‌جایی می‌باشند نشان داده شده است. این تصاویر رفتار گلار ۲/۱ را در نرخ کرنش  $۰/۰۳$  و در دماهای اتاق،  $۶۰$  و  $۱۰۰$  درجه سلسیوس نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اولین تورق با افزایش دما از انتهای نمونه به تکیه‌گاه در حال جابه‌جا شدن است. زمانی که آلومینیوم شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند، الیاف در حالت الاستیک باقی می‌مانند که علت آن استحکام برشی بالای لایه‌های حاوی رزین است. جدایش بین الیاف و زمینه سبب ایجاد ترک

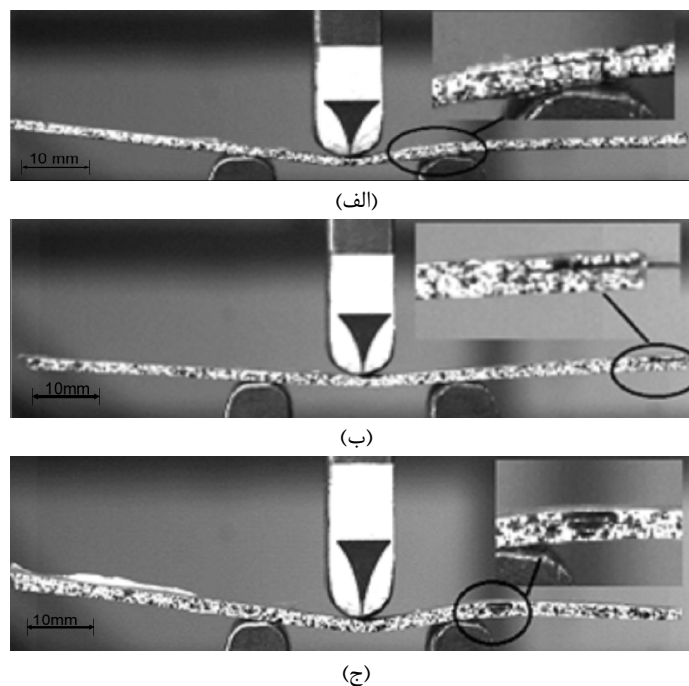
همراه با تورق می‌شود، به طوری که در نهایت با افزایش تنش‌های برشی در این لایه‌ها، تورق شکل می‌گیرد. در تمام نمونه‌ها، تورق بین لایه بالا و لایه کامپوزیت مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده تنش برشی بین لایه‌های بیشتر لایه بالایی و در نتیجه تورق زودتر آن باشد. تورق به دلیل وجود ترک‌های فاز زمینه و تنش برشی بین لایه‌های در امتداد سطح مشترک، سختی متفاوت بین لایه‌های مجاور و تغییر شکل لایه ایجاد می‌شود [۲۱]. با افزایش دما، خواص مکانیکی لایه پلیمری تقویت شده با الیاف تحت تأثیر حرارت تضعیف می‌شود و در نهایت توانایی آن برای مقاومت در برابر تغییر شکل و شکست تحت بار در طول آزمایش خمش سه نقطه‌ای کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انبساط و انقباض حرارتی لایه‌های مختلف به دلیل تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی آلومینیم و لایه کامپوزیتی می‌تواند سبب تورق و شکست گلار ۲/۱ شود.



شکل ۳ تصویر نمونه‌های الف (G25L، ب (G60L و ج) G100L تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای در لحظه بروز اولین تورق

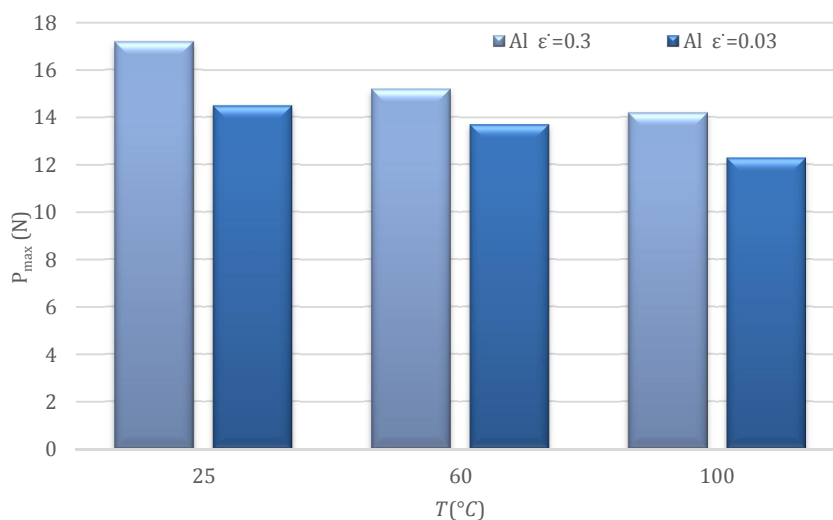
شکل ۴ تغییر شکل‌های نمونه مربوط به نقاط بیشینه نمودار نیروی خمشی-جابجایی برای شرایط دمایی مختلف و نرخ کرنش ۰/۰۳ بر ثانیه را نشان می‌دهد. این تصاویر با مطابقت زمانی بین اطلاعات خروجی دستگاه کشش و پردازش تصویر دیجیتال حاصل شده است. در تمام نمونه‌ها، نمودار نیرو-جابجایی پس از رسیدن به نقطه حداکثر نیرو، منحنی دچار افت ناگهانی می‌شود. در این لحظه تورق لایه‌ها مشاهده می‌شود.

در شکل ۴ الف) تصویر نمونه G25H در لحظه بروز اولین تورق توسط دوربین با سرعت بالا ثبت شده است. در این شرایط هم نمونه در قسمت خارجی و بین فک متحرک و پایه تکیه‌گاهی در قسمت راست دچار تورق شده است. نمونه G60H در لحظه بروز اولین تورق، در قسمت خارجی نمونه و سمت راست، با افزایش تنش‌های برشی در این لایه‌ها جدایش بین الیاف و زمینه سبب ایجاد ترک همراه با تورق می‌شود (شکل ۴ ب)). هنگامی که دما کمتر از ۱۰۰ درجه سلسیوس است، نرم شدن رزین مشاهده نمی‌شود. شکل ۴ ج) مربوط به نمونه G100H در لحظه بروز اولین تورق است. در سرعت بارگذاری بالاتر، تورق واضح‌تری مشاهده می‌شود. در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس، انعطاف‌پذیری گلار ۲/۱ بهبود می‌یابد. در طول آزمایش خمش با ادامه تغییر شکل، تورق به سمت الیاف تا جایی که ترک در لایه رزین با جدا شدن الیاف شیشه و رزین اپوکسی محدود شود، گسترش می‌یابد. علاوه بر این، تغییر شکل و تنش بیشتر، شکستن الیاف را تسریع می‌بخشد، بنابراین، حداکثر کرنش‌های الیاف بر حداکثر تنش خمشی آن‌ها در طول خمش تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، سطح مشترک الیاف زمینه به دلیل ضعف نسبی، محتمل‌ترین محل شروع شکست است [۲۲].



شکل ۴ تصویر نمونه‌های الف (G25H، ب) G60H و ج) G100H تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای در لحظه بروز اولین تورق

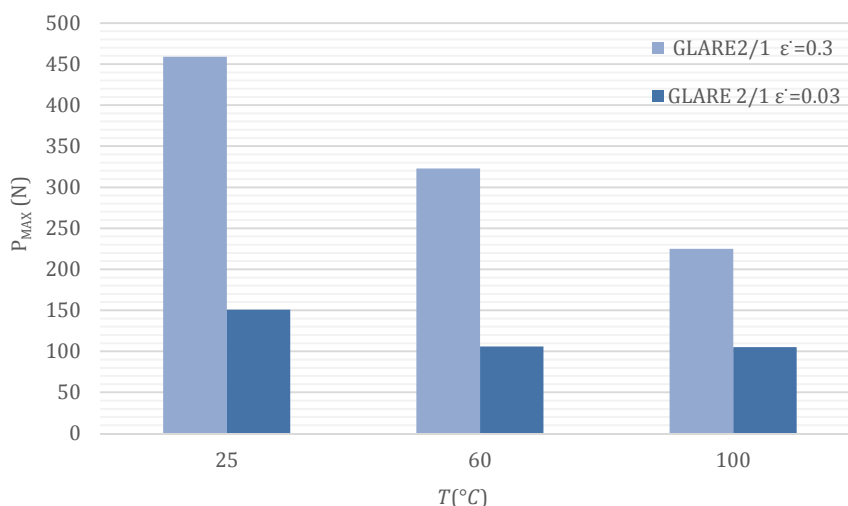
شکل ۵ نمودار نیروی بیشینه نمونه آلومینیوم را در دماهای مختلف و نرخ بارگذاری ۰/۳ و ۰/۳ بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در سرعت بارگذاری ثابت، با افزایش دما، نیروی بیشینه خمشی کاهش می‌یابد، به طوری که این کاهش برای نمونه‌های A100L و A100H نسبت به A25L و A25H، به ترتیب ۱۵ و ۱۷ درصد است. به همین ترتیب، نیروی بیشینه خمشی برای نمونه‌های A60L و A60H، نسبت به نمونه‌های A25L و A25H، به ترتیب ۶ و ۱۲ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۵ مقایسه نیروی خمشی حداکثر نمونه‌های آلومینیومی در دمای ۶۰، ۲۵ و ۱۰۰ درجه سلسیوس و در نرخ‌های کرنش ۰/۳ و ۰/۳ بر ثانیه

شکل ۶ نمودار نیروی بیشینه نمونه‌های گلار ۲/۱ را در دماهای مختلف و نرخ‌های بارگذاری ۰/۳ و ۰/۳ بر ثانیه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد، در نمونه‌های گلار ۲/۱ و در سرعت بارگذاری ثابت، با افزایش دما، نیروی بیشینه خمشی کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که این نیرو برای G100L و G100H نسبت به G25L و G25H، به ترتیب ۳۰ و ۵۱ درصد کاهش می‌یابد، این کاهش برای G60L و G60H نسبت به G25L و G25H، حدود ۳۰ درصد است.

نرخ کرنش بالاتر منجر به کار سختی بیشتر شده، در نتیجه مواد در برابر تغییر شکل مقاومتر می‌شوند [۷]. شکل ۶ همچنین، نشان می‌دهد که نرخ کرنش تأثیر فراوانی بر نیروی بیشینه خمشی برای همه دماها دارد به گونه‌ای که افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۳ به ۰/۳ موجب افزایش ۲/۰۴، ۲/۰۵ و ۱/۱۳ برابری به ترتیب برای دماهای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ می‌گردد. نکته قابل توجه دیگر که از مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ حاصل می‌گردد این است که تأثیر نرخ کرنش بر نیروی بیشینه خمشی در نمونه‌های گلار بسیار عمیق‌تر از آن در نمونه‌های آلومینیم است، به طوری که با افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۳ به ۰/۳ نیروی بیشینه خمشی در آلومینیم موجب افزایش ۱۷/۲، ۱۵/۲ و ۱۴/۲ درصدی به ترتیب برای دماهای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ می‌گردد که نسبت به نمونه‌های گلار افزایش بسیار کمتری دارد. ترکیب الیاف آلومینیم و شیشه در گلار یک اثر هم‌افزایی ایجاد می‌کند که در آن نقاط قوت هر دو ماده مکمل یکدیگر هستند. زمینه آلومینیومی شکل‌پذیری و چقرمگی را فراهم می‌کند، در حالی که الیاف شیشه به سفتی و استحکام کمک می‌کنند. این اثر هم‌افزایی تحمل کلی در برابر نیروهای خمشی را افزایش می‌دهد. همچنین وجود الیاف شیشه در گلار می‌تواند به جلوگیری از انتشار ترک‌هایی که ممکن است در حین خم شدن شروع شوند کمک کرده و احتمال شکست را کاهش می‌دهند. تأثیر افزایش لایه‌های میانی سبب شده اثرگذاری نرخ کرنش بر نیروی بیشینه خمشی در نمونه‌های گلار بسیار عمیق‌تر از آن در نمونه‌های آلومینیمی باشد. نمونه‌های آلومینیومی نسبت به گلار ۲/۱، در شرایط دمایی و سرعت بارگذاری مختلف، نیروی بیشینه خمشی پایین‌تری را تحمل می‌کنند که نشان‌دهنده تأثیر افزایش لایه‌های میانی بر تحمل نیروی خمشی است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، نیروی خمشی بیشینه برای نمونه G25H در حدود ۲۶ برابر بیشتر از نمونه A25H است. این مقدار برای G25L ۹ برابر است. یکی از عوامل مهم تغییر در خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده گلار ۲/۱ دما به ویژه دماهای بالا است. با افزایش دما و در نمونه‌های G100L، G60L، G60H و G100H لایه فلزی در گلار ۲/۱ می‌تواند انبساط و نرم شدن حرارتی را تجربه کند. در نتیجه، سفتی و استحکام آن کاهش می‌یابد. این به این دلیل که انبساط حرارتی لایه فلزی می‌تواند تنش‌های داخلی در گلار ۲/۱ ایجاد کند که در نتیجه باعث تغییر شکل آن و در نهایت شکست در بار کمتر می‌شود. علاوه بر این، نرم شدن لایه فلزی می‌تواند توانایی آن را در حمل بار کاهش دهد و آن را مستعد تغییر شکل و شکست کند.



شکل ۶ مقایسه نیروی خمشی حداکثر نمونه‌های گلار ۲/۱ در دمای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس و در نرخ کرنش‌های ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه

لایه پلیمری تقویت شده با الیاف در گلار ۲/۱ نیز می‌تواند تحت تأثیر دما قرار گیرد. در نمونه‌های G60L، G100L، G60H و G100H این لایه می‌تواند تخریب حرارتی را تجربه کند و در نتیجه خواص مکانیکی آن از بین رفته و در نهایت توانایی آن برای مقاومت در برابر تغییر شکل و شکست تحت بار در طول آزمایش خمش سه نقطه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انبساط و انقباض حرارتی لایه‌های مختلف می‌تواند تنش‌هایی را در سطح مشترک ایجاد کند که سبب تورق و شکست گلار ۲/۱ شود، در نتیجه پیوند

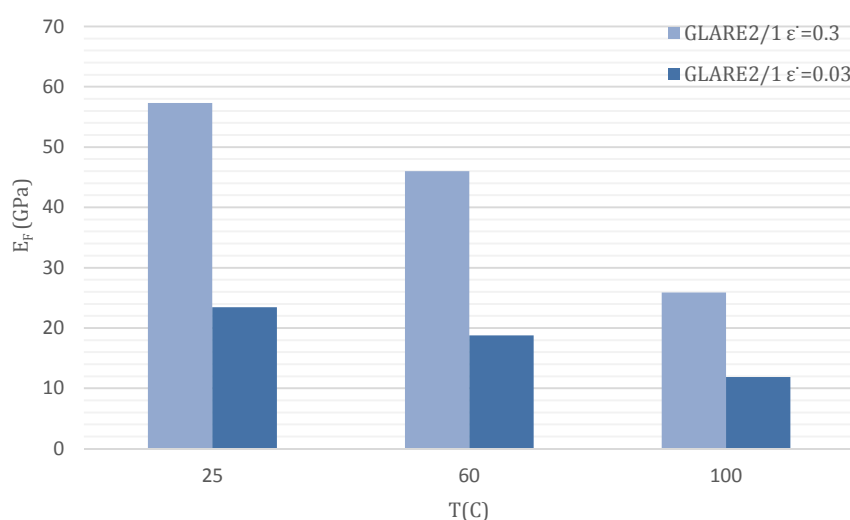


بین لایه‌های فلز و لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف می‌تواند در دماهای بالا ضعیف شود، که می‌تواند استحکام کلی گلار ۲/۱ را کاهش دهد. برای محاسبه ضریب الاستیک خمشی در آزمایش خمش سه نقطه‌ای از رابطه (۲) استفاده می‌شود [۲۳].

$$E_f = \frac{mL^3}{4bh^3} \quad (2)$$

در این رابطه  $m$  شیب نمودار نیرو-جاب‌جایی خمشی در قسمت خطی،  $L$  فاصله دو تکیه‌گاه پایینی،  $b$  عرض نمونه و  $h$  ضخامت آن است. با توجه به رابطه (۲)، نمودار میله‌ای برای نمونه‌های گلار ۲/۱ در شکل ۷ برای دماهای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس در نرخ کرنش‌های ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه رسم شده است. با توجه به ثابت بودن سایر متغیرها، نقش تعیین‌کننده در مقدار ضریب الاستیک خمشی، شیب نمودار تنش-کرنش خمشی، با افزایش مقدار این شیب، ضریب الاستیک خمشی دچار افزایش می‌شود. در نرخ‌های کرنش بالاتر، مواد رفتار شکننده‌تری نشان می‌دهند. در نرخ کرنش شبه استاتیک یا کم، لایه‌های الیاف زمان کافی برای قرار گرفتن در راستای نیروی خمشی دارند، در نتیجه شکل‌پذیری بالاتر و ضریب الاستیک خمشی کمتری برای آن‌ها ثبت می‌شود. در نرخ کرنش بالا، برعکس، الیاف زمان کافی برای تغییر شکل پلاستیک و قرار گرفتن در راستای نیروی خمشی را ندارند. در این شرایط رزین رفتار شکننده‌تری داشته که سبب افزایش سفتی خمشی می‌شود. در نرخ‌های کرنش بالاتر، زمینه پلیمری اپوکسی نسبت به لایه فلزی و لایه الیاف تعیین‌کننده‌تر بوده زیرا که زمان کمتری برای تسلیم شدن و تغییر شکل پلاستیکی قبل از شکست دارد.

با افزایش دما، تفاوت در نرخ انبساط حرارتی آلومینیوم و الیاف شیشه می‌تواند منجر به تنش‌ها و کرنش‌های داخلی در ماده شود که در نتیجه ضریب الاستیک خمشی کاهش می‌یابد. همچنین در دمای بالا تضعیف پیوند بین الیاف شیشه و آلومینیوم موجب شده انتقال بار بین آن‌ها کاهش یافته و در نتیجه منجر به کاهش ضریب الاستیک خمشی شود. در  $\varepsilon = 0.3$  با افزایش دما، ضریب الاستیک خمشی دچار کاهش می‌شود به طوری که ضریب خمشی G60L و G100L نسبت G25L به ترتیب با کاهش ۲۰ و ۲۴ درصدی همراه است. از طرفی ضریب الاستیک خمشی در تمامی دماها، نرخ کرنش‌های ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه کمتر است، به عبارتی با افزایش نرخ کرنش، ضریب الاستیک خمشی نیز افزایش یافته است. در دمای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس این مقدار به ترتیب ۵۹/۱۲، ۵۹/۲۲ و ۵۴/۰۲ درصد در نرخ کرنش‌های ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه کمتر است.



شکل ۷ مقایسه ضریب خمشی گلار ۲/۱ در دمای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس و در نرخ کرنش‌های ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، نمونه‌های گلار ۲/۱ جهت آزمایش خمش سه نقطه‌ای آماده‌سازی شدند. نمونه‌ها در دماهای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس در نرخ کرنش‌های ۰/۰۳ و ۰/۳ بر ثانیه تحت آزمایش خمش قرار گرفتند تا تأثیر دما و نرخ کرنش بر استحکام خمشی نمونه‌ها بررسی شود. پس از استخراج نمودارهای نیرو-جاب‌جایی و مطابقت زمانی بین داده‌های دستگاه ستام و تصاویر حاصل از فناوری پردازش تصویر دیجیتال، تصاویر مربوط به نقاط اکسترمم مشخص شد. در این تصاویر تغییر شکل‌های رخ داده در این نقاط

مورد بازبینی قرار گرفت. در نهایت برای بررسی رفتار خمشی و مقایسه تنش خمشی بیشینه در دماهای مختلف، نمودارهای تنش خمشی-کرنش از نمودارهای نیرو-جابه‌جایی استخراج شد. نتایج حاصل از مشاهده‌ها عبارت‌اند از:

۱. خواص مکانیکی لایه پلیمری تقویت شده با الیاف تحت تأثیر حرارت تضعیف می‌شود و در نهایت توانایی آن برای مقاومت در برابر تغییر شکل و شکست تحت بار در طول آزمایش خمش سه نقطه‌ای کاهش می‌یابد. علاوه بر این، انبساط و انقباض حرارتی لایه‌های مختلف به دلیل تفاوت در ضرائب انبساط حرارتی آلومینیم و لایه کامپوزیتی می‌تواند سبب تورق و شکست گلار ۲/۱ شود. در نمونه‌های گلار ۲/۱ و در سرعت بارگذاری ثابت، با افزایش دما، نیروی بیشینه خمشی کاهش می‌یابد. به طوری که این مقدار در G100L و G100H نسبت به G25L و G25H، به ترتیب ۳۰ و ۵۱ درصد کاهش می‌یابد، به طور مشابه برای G60L و G60H نسبت به G25L و G25H، به ترتیب ۲۹/۷۷ و ۲۹/۶۴ درصد کاهش می‌یابد.

۲. نرخ کرنش بالاتر منجر به کار سختی بیشتر شده، در نتیجه مواد در برابر تغییر شکل مقاوم‌تر می‌شوند [۷]. افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۳ به ۰/۳ موجب افزایش نیروی بیشینه خمشی ۲/۰۴، ۲/۰۵ و ۱/۱۳ برابری به ترتیب برای دماهای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ می‌گردد.

۳. ترکیب الیاف آلومینیم و شیشه در گلار یک اثر هم‌افزایی ایجاد می‌کند که در آن نقاط قوت هر دو ماده مکمل یکدیگر هستند. زمینه آلومینیمی شکل‌پذیری و چقرمگی را فراهم می‌کند، در حالی که الیاف شیشه به استحکام کمک می‌کنند. این اثر هم‌افزایی تحمل کلی در برابر نیروهای خمشی را افزایش می‌دهد. همچنین وجود الیاف به عنوان مانع عمل می‌کنند و از گسترش بیشتر ترک‌ها جلوگیری کرده و احتمال شکست را کاهش می‌دهند. تأثیر افزایش لایه‌های میانی سبب شده اثرگذاری نرخ کرنش بر نیروی بیشینه خمشی در نمونه‌های گلار بسیار عمیق‌تر از آن در نمونه‌های آلومینیمی باشد. تأثیر افزایش لایه‌های میانی سبب شده اثرگذاری نرخ کرنش بر نیروی بیشینه خمشی در نمونه‌های گلار بسیار عمیق‌تر از آن در نمونه‌های آلومینیم است، به طوری که با افزایش نرخ کرنش از ۰/۰۳ به ۰/۳ نیروی بیشینه خمشی در آلومینیم موجب افزایش ۲/۱۷، ۲/۱۵ و ۲/۱۴ درصدی به ترتیب برای دماهای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ می‌گردد که نسبت به نمونه‌های گلار افزایش بسیار کمتری دارد.

۴. با افزایش دما، تفاوت در نرخ انبساط حرارتی آلومینیم و الیاف شیشه می‌تواند منجر به تنش‌ها و کرنش‌های داخلی در ماده شود که در نتیجه ضریب الاستیک خمشی کاهش می‌یابد. همچنین در دمای بالا تضعیف پیوند بین الیاف شیشه و آلومینیم موجب شده انتقال بار بین آن‌ها کاهش یافته و در نتیجه منجر به کاهش ضریب الاستیک خمشی شود. در  $\xi = 0.3$  با افزایش دما، ضریب الاستیک خمشی G60L و G100L نسبت به G25L به ترتیب با کاهش ۲۰ و ۲۴ درصدی همراه است.

۵. در نرخ‌های کرنش بالاتر، زمینه پلیمری اپوکسی نسبت به لایه فلزی و لایه الیاف تعیین‌کننده‌تر بوده زیرا که زمان کمتری برای تسلیم شدن و تغییر شکل پلاستیکی قبل از شکست دارد. ضریب الاستیک خمشی در  $\xi = 0.03$  نسبت به  $\xi = 0.3$  در دمای ۲۵، ۶۰ و ۱۰۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۵۹/۱۲، ۵۹/۲۲ و ۵۴/۰۲ درصد کمتر است.

## Reference

- [1] Salve A, Kulkarni R, Mache A. A review: fiber metal laminates (FML's)-manufacturing, test methods and numerical modeling. International Journal of Engineering Technology and Sciences. 2016 Dec 30;3(2):71-84. doi: 10.15282/ijets.6.2016.10.2.1060
- [2] Sarasini F, Tirillò J, Ferrante L, Sergi C, Sbardella F, Russo P, Simeoli G, Mellier D, Calzolari A. Effect of temperature and fiber type on impact behavior of thermoplastic fiber metal laminates. Composite Structures. 2019 Sep 1;223:110961. doi: 10.1016/j.compstruct.2019.110961
- [3] 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. 2021 Oct 1;167:108026. doi: 10.1016/j.tws.2021.108026
- [4] Mosse L, Compston P, Cantwell WJ, Cardew-Hall M, Kalyanasundaram S. Stamp forming of polypropylene based fibre-metal laminates: the effect of process variables on formability. Journal of Materials Processing Technology. 2006 Feb 28;172(2):163-8. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.002
- [5] Jin K, Xuan S, Tao J, Chen Y. The synergistic effect of temperature and loading rate on deformation for thermoplastic fiber metal laminates. Materials. 2021 Jul 28;14(15):4210. doi: 10.3390/ma14154210

- [6] Ji C, Hu J, Wang B, Zou Y, Yang Y, Sun Y. Mechanical behavior prediction of CF/PEEK-titanium hybrid laminates considering temperature effect by artificial neural network. *Composite Structures*. 2021 Apr 15;262:113367. doi: [10.1016/j.compstruct.2020.113367](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113367)
- [7] Rajkumar GR, Krishna M, Narasimhamurthy HN, Keshavamurthy YC, Nataraj JR. Investigation of tensile and bending behavior of aluminum based hybrid fiber metal laminates. *Procedia Materials Science*. 2014 Jan 1;5:60-8. doi: [10.1016/j.mspro.2014.07.242](https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.242)
- [8] Kubit A, Trzepiecinski T, Kłonica M, Hebda M, Pytel M. The influence of temperature gradient thermal shock cycles on the interlaminar shear strength of fibre metal laminate composite determined by the short beam test. *Composites Part B: Engineering*. 2019 Nov 1;176:107217. doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107217](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107217)
- [9] Hinz S, Heidemann J, Schulte K. Damage evaluation of GLARE® 4B under interlaminar shear loading at different temperature conditions. *Advanced Composites Letters*. 2005 Mar;14(2): 096369350501400201. doi: [10.1177/096369350501400201](https://doi.org/10.1177/096369350501400201)
- [10] Carrillo JG, Cantwell WJ. Mechanical properties of a novel fiber-metal laminate based on a polypropylene composite. *Mechanics of materials*. 2009 Jul 1;41(7):828-38. doi: [10.1016/j.mechmat.2009.03.002](https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.002)
- [11] Ostapiuk M, Bieniaś J, Surowska B. Analysis of the bending and failure of fiber metal laminates based on glass and carbon fibers. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2018 Nov 27;25(6):1095-106. doi: [10.1515/secm-2017-0180](https://doi.org/10.1515/secm-2017-0180)
- [12] Wisnom MR, Atkinson JW. Reduction in tensile and flexural strength of unidirectional glass fibre-epoxy with increasing specimen size. *Composite Structures*. 1997 May 1;38(1-4):405-11. doi: [10.1016/S0263-8223\(97\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00075-5)
- [13] Jackson KE, Kellas S, Morton J. Scale effects in the response and failure of fiber reinforced composite laminates loaded in tension and in flexure. *Journal of composite materials*. 1992 Dec;26(18):2674-705. doi: [10.1177/002199839202601803](https://doi.org/10.1177/002199839202601803)
- [14] Hynes NR, Vignesh NJ, Jappes JW, Velu PS, Barile C, Ali MA, Farooq MU, Pruncu CI. Effect of stacking sequence of fibre metal laminates with carbon fibre reinforced composites on mechanical attributes: Numerical simulations and experimental validation. *Composites Science and Technology*. 2022 Apr 12;221:109303. doi: [10.1016/j.compscitech.2022.109303](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109303)
- [15] Lin Y, Li H, Kuang N, Chen S, Tao J. Experimental and numerical research on flexural behavior of fiber metal laminate sandwich composite structures with 3D woven hollow integrated core. *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2022 May;24(4):1790-807. doi: [10.1177/1099636222108463](https://doi.org/10.1177/1099636222108463)
- [16] Chen Y, Wang Z, Lin Y, Wang H, Hua L. Theoretical Modeling and Experimental Verification of the Bending Deformation of Fiber Metal Laminates. *Materials*. 2023 Apr 30;16(9):3486. doi: [10.3390/ma16093486](https://doi.org/10.3390/ma16093486)
- [17] Rans CD, Alderliesten RC, Benedictus RJ. Predicting the influence of temperature on fatigue crack propagation in Fibre Metal Laminates. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011 Jul 1;78(10):2193-201. doi: [10.1016/j.engfractmech.2011.04.005](https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2011.04.005)
- [18] Kashfi M, Majzoobi GH, Bonora N, Iannitti G, Ruggiero A, Khademi E. A study on fiber metal laminates by using a new damage model for composite layer. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017 Oct 1;131:75-80. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2017.06.045](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.06.045)
- [19] Wollmann T, Hahn M, Wiedemann S, Zeiser A, Jaschinski J, Modler N, Khalifa NB, Meißer F, Paul C. Thermoplastic fibre metal laminates: Stiffness properties and forming behaviour by means of deep drawing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018 Feb 1;18(2):442-50. doi: [10.1016/j.acme.2017.09.001](https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.09.001)
- [20] Lobo H, Lorenzo J. High speed stress-strain material properties as inputs for the simulation of impact situations. IBEC, Stuttgart, Germany. 1997.
- [21] González EV, Maimí P, Camanho PP, Lopes CS, Blanco N. Effects of ply clustering in laminated composite plates under low-velocity impact loading. *Composites Science and Technology*. 2011 Apr 12;71(6):805-17. doi: [10.1016/j.compscitech.2010.12.018](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.12.018)
- [22] Mortell DJ, Tanner DA, McCarthy CT. An experimental investigation into multi-scale damage progression in laminated composites in bending. *Composite structures*. 2016 Aug 1;149:33-40. doi: [10.1016/j.compstruct.2016.03.054](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.054)
- [23] Pol, M. H., Liaghat, G. Investigating the bending properties of polymeric orthopedic plaque made of different polymers by additive manufacturing method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2022; 9(9): 21-25. doi: [10.22034/ijme.2023.376919.1726](https://doi.org/10.22034/ijme.2023.376919.1726) [In Persian]