



مطالعه تجربی رفتار کششی گلار ۱/۲ و ۲/۳ به کمک پردازش تصویر

البرز محبی^۱، غلامحسین مجذوبی^۲، محمد کشفی^{۳*}

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- استادیار، 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: ۶ آذر ۱۴۰۲

پذیرش: ۲ فروردین ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

ورق‌های فلزی الیافی

گلار

الیاف شیشه

نسبت پواسون

یکی از مواد مرکب ترکیبی با مقاومت ویژه بالا ورق‌های فلزی الیافی (اف ام ال‌ها) هستند. این ورق‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که در عین سبکی، مقاومت و استحکام بالایی نیز از خود نشان می‌دهند، لذا در صنایع هوایی و در زمینه ساخت بدنه هواپیما کاربرد فراوانی دارند. در این پژوهش رفتار کششی ورق‌های فلزی الیافی از نوع گلار به صورت آزمایشگاهی بررسی می‌شود. نمونه‌های گلار از ورق آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت ۰٫۸ میلی‌متر و اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه (E-glass, 200 g/cm²) بافته شده که با نام GFRE شناخته می‌شوند، ساخته شده‌اند. آرایش لایه‌ها در نمونه‌های گلار 1/2 و 2/3 به ترتیب Al/GFRE/Al/GFRE/Al و Al/GFRE/Al در نظر گرفته شد. ضخامت تقریبی نمونه‌های گلار 1/2 و 2/3 به ترتیب ۲٫۳۲ و ۳٫۸۸ میلی‌متر می‌باشد. در ساخت نمونه‌ها از پرس داغ استفاده شد. برای پخت گلار، در ابتدا نمونه به مدت ۷٫۵ ساعت در دمای محیط و سپس، به مدت ۶ ساعت در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و تحت فشار ۳ بار قرار گرفت. نمونه‌های آزمایش کشش بر طبق استاندارد ASTM D3039 تهیه و تحت شرایط شبه‌استاتیکی آزمایش شدند. با استفاده از روش پردازش تصویر مقدار نسبت پواسون هر نمونه در مقایسه با آلومینیوم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استحکام کششی گلار 2/3 نسبت به گلار 1/2، ۸٫۸ درصد افزایش یافته است. نسبت پواسون گلار 1/2 و 2/3 نسبت به آلومینیوم به ترتیب ۱۷ و ۲۷ درصد کاهش را نشان داد. در نهایت، با استفاده از قانون اختلاط خواص مکانیکی لایه میانی با دقت مناسبی محاسبه گردید.

An experimental study of GLARE 2/1 and 3/2 tensile behavior using Digital Image Correlation

Alborz Mohebi¹, Gholamhossein Majzooobi², Mohammad Kashfi^{3*}

1- MSc Graduate, Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

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

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

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

Article Information

Original Research Paper

Received: 27 November 2023

Accepted: 21 March 2024

Keywords:

Fiber Metal Laminate

GLARE

Glass Fiber

Poisson's Ratio

Abstract

Fiber Metal Laminates (FMLs) are a type of composite material known for their high specific strength. These laminates are designed, as being lightweight, to offer exceptional resistance and strength. This characteristic makes FMLs widely utilized in the aviation industry and aircraft body construction. In this research, the tensile behavior of GLARE (Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy) is experimentally investigated. GLARE specimens are made of aluminum 2024-T3 plates with a thickness of 0.8 mm and woven glass fibers (E-glass, 200g/cm²) reinforced epoxy, known as GFRE. The layering arrangement in GLARE 2/1 and 3/2 samples consists of Al/GFRE/Al and Al/GFRE/Al/GFRE/Al, respectively. The approximate thickness of GLARE 2/1 and 3/2 specimens is 2.32 mm and 3.88 mm, respectively. The samples are produced using the hot plate method. First, samples are cured at room temperature for 7.5 hours and then continued the curing process for an additional 6 hours under 40°C temperature and 3-bar pressure. Tensile test samples are prepared in accordance with the ASTM D3039 standard and tested under quasi-static conditions. The Poisson's ratio of the GLARE samples was evaluated in comparison to that of aluminum using Digital Image Correlation (DIC). The results indicated an 8.8% increase in tensile strength for GLARE 3/2 compared to that obtained for GLARE 2/1. Furthermore, the Poisson's ratio for GLARE 2/1 and 3/2, compared to aluminum, exhibited reductions of 17% and 27%, respectively. Additionally, the mechanical properties of the GFRE layer were accurately predicted using the Rule-of-Mixture.

Please cite this article using:

Mohebi A, Majzooobi Gh, Kashfi M. An experimental study of GLARE 2/1 and 3/2 tensile behavior using Digital Image Correlation. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Mar 20;11(1):39-50. doi: 10.22034/IJME.2024.427374.1881 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

ماده مرکب ماده‌ای است که از قراردادن یک یا چند جزء ناپیوسته در یک جزء پیوسته به دست می‌آید، به نحوی که در مقیاس ماکروسکوپی با یکدیگر ترکیب شده و یک ماده مفید دیگر حاصل شود [۱]. نوع، درصد حجمی و چیدمان الیاف در ساخت ماده مرکب بسیار حائز اهمیت هستند، زیرا می‌توانند بر خواصی مانند استحکام، ضریب الاستیسیته، استحکام خستگی، ضرایب انتقال حرارت و رسانندگی الکتریکی، وزن مخصوص ماده مرکب و قیمت تأثیر بگذارند [۲].

یکی از انواع مواد مرکب، ورق‌های فلزی الیافی هستند که تاریخچه پیدایش آن‌ها به دهه ۵۰ میلادی زمانی که شرکت هوافضای هلندی فوکر به دنبال راه حل جایگزینی برای چسباندن قطعات به یکدیگر به جای استفاده از دیگر روش‌های شناخته شده اتصال قطعات بود، بازمی‌گردد [۲]. یکی از انواع ورق‌های فلزی الیافی، گلار^۱ نام دارد که از چسباندن ورق‌های نازک آلیاژ آلومینیوم به لایه‌هایی از رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه، ساخته می‌شوند. گلار در قسمت بالایی بدنه ایرباس A380 مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳]. ورق فلزی الیافی نسبت به ساختارهای فلزی کاهش وزن قابل توجهی را نشان می‌دهد. به دلیل حساسیت کمتر به خستگی، ورق‌های فلزی الیافی به دوره‌های نگهداری طولانی‌تر نیاز دارند. این مزایا هزینه‌های نگهداری ورق‌های فلزی الیافی را کاهش می‌دهند [۴].

مطالعات مختلفی در زمینه رفتار مکانیکی ورق‌های فلزی الیافی انجام گرفته است. کشفی و همکاران [۵] به بررسی رفتار مکانیکی ورق فلزی الیافی با آزمایش و شبیه‌سازی پرداختند و برای پژوهش خود از ورق فلزی الیافی با دو لایه آلومینیوم 2024 و اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه استفاده کردند. نامبردگان در آزمایش‌های خود دریافتند که رفتار لایه میانی به صورت الاستیک غیر خطی و ناشی از تکامل آسیب و تخریب مواد است. در نهایت، یک مدل آسیب غیرخطی ساده به منظور تخمین بهتر رفتار مکانیکی، ارائه کردند. لی و همکاران [۶] خواص مکانیکی ورق‌های فلزی الیافی ساخته شده از پلی‌پروپیلن خود تقویت شده همراه با آلومینیوم 5052 را تحت کشش تحت محوره با استفاده از روابط تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. نامبردگان با استفاده از روابط الاستیک و پلاستیک برای هر دو لایه فلزی و غیرفلزی بر پایه تئوری کلاسیک لایه‌های مواد مرکب توانستند رفتار مکانیکی نمونه‌ها را مورد بررسی قرار دهند. خان و همکاران [۷] به مطالعه تأثیر تغییرات بارگذاری بر روی اشکال لایه‌لایه شدن در ورق‌های فلزی الیافی پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود، از روش پردازش تصویر برای اندازه‌گیری کرنش و ثبت لایه‌لایه شدن در آزمایش استفاده کردند. نامبردگان دریافتند که تغییرات بارگذاری به مقدار اندکی شکل‌های لایه‌لایه شدن را تغییر می‌دهد. ون‌تاو هی و همکاران [۸] به طور گسترده‌ای به بررسی تأثیر جهت لایه، اندازه و شکل شیار بر رفتار کششی و مکانیسم‌های شکست ورق‌های فلزی الیافی سوراخ‌دار با روش‌های پردازش تصویر و عددی پرداختند. نامبردگان دریافتند جهت لایه و سائز سوراخ تأثیر مشهودی بر روی استحکام سوراخ و کرنش شکست نهایی دارد، درحالی‌که شکل سوراخ اثر کمی بر استحکام سوراخ دارد اما عمدتاً بر روی کرنش نهایی شکست اثر می‌گذارد. جینگ سان و همکاران [۹] به مطالعه تجربی تأثیر نرخ کرنش بر شکست کششی و پاسخ مکانیکی ورق‌های فلزی الیافی پرداختند. محققان دریافتند که ورق‌های فلزی الیافی مبتنی بر آلومینیوم الگوهای شکست سه مرحله‌ای، مشابه کشش شبه استاتیکی را دارند. همچنین، استحکام کششی با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد. خالد و همکاران [۱۰] به مطالعه رفتار کششی ورق‌های فلزی الیافی ساخته شده ورق آلومینیوم Al 7075-T6 در نرخ‌های کرنش متفاوت پرداختند. نامبردگان در پژوهش خود دریافتند که در تمامی نرخ کرنش‌ها، بیشترین استحکام کششی متوسط مربوط به ورق‌های فلزی الیافی با الیاف کربن است که این امر به دلیل مدول کششی بیشتر الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه و کولار می‌باشد. شارما و همکاران [۱۱] به بررسی پاسخ کشش تک محوری و شکست ورق‌های فلزی الیافی پرداختند. نامبردگان در پژوهش خود، اثر ضخامت لایه آلومینیوم و جهت‌گیری الیاف را بر رفتار کششی ورق‌های فلزی الیافی بررسی کردند. در نهایت دریافتند که توالی چیدمان هیچ تأثیری بر مدول اولیه ورق‌های فلزی الیافی ندارد. با این حال، استحکام نهایی ورق‌های فلزی الیافی به طور قابل توجهی تحت تأثیر ترتیب چیدمان قرار می‌گیرند. ریس و کانتول [۱۲] بر پاسخ مکانیکی ورق‌های فلزی الیافی ساخته شده از لایه‌های آلومینیوم و الیاف شیشه تقویت شده با پلی‌پروپیلن^۲ متمرکز شدند. در نهایت دریافتند که پاسخ ورق‌های فلزی الیافی به نیرو-جابجایی تا رسیدن به حداکثر نیرو تقریباً خطی بود و سپس یک افت ناگهانی که به دلیل شکست لایه‌های مرکب است، مشاهده شد.

¹ GLARE (Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy)

² Polypropylene (PP)

همان گونه که در پیشینه پژوهش اشاره شد، به دلیل کاربرد ورق‌های فلزی الیافی، رفتار کششی آن‌ها همواره حائز اهمیت بوده است. با توجه به این که ورق‌های فلزی الیافی موادی غیر همگن هستند؛ لذا محاسبه خواص مکانیکی آن‌ها به ویژه نسبت پواسون، دشوار و دارای خطا می‌باشد. که در این پژوهش، رفتار کششی ورق‌های فلزی الیافی شامل استحکام و نسبت پواسون به صورت آزمایشگاهی و به کمک روش پردازش تصویر مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت به دلیل آن که نمی‌توان به صورت مستقیم خواص مکانیکی لایه میانی را محاسبه نمود، از قانون اختلاط برای پیش‌بینی خواص مکانیکی اپوکسی تقویت شده با الیاف استفاده می‌شود. همچنین، استفاده از روش پرس داغ منجر به تولید نمونه‌هایی با اعواج حداقلی می‌شود.

۲- مواد و آزمایش‌ها

با توجه به خواص مناسب و کاربرد آلومینیوم 2024-T3 در صنایع هوایی، برای تهیه گلار از این نوع آلومینیوم استفاده شده است. ورق آلومینیوم در ابعاد 2×1 متر و ضخامت ۰٫۸ میلی‌متر تهیه شد. جهت اطمینان از آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده بر طبق استاندارد ASTM B211، آزمایش تجزیه عناصر شیمیایی بر روی آن انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود نسبت عناصر موجود در ماده مطابق با استاندارد، نشان‌گر آن است که آلیاژ آلومینیوم مورد مطالعه از نوع T3-2024 است. برای تهیه لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف، از الیاف شیشه بافته شده از نوع E به صورت رول در ابعاد 3×1 متر و چگالی سطحی ۲۰۰ گرم بر سانتی‌متر مربع استفاده شد. در شکل ۱ نوع بافت، تاروپود الیاف شیشه مورد استفاده که به وسیله میکروسکوپ نوری عکس‌برداری شده، مشاهده می‌شود. همان گونه که ملاحظه می‌گردد، الیاف در دو جهت تاروپود با دقت مناسبی دارای پراکندگی یکسانی هستند. برای ساخت نمونه‌های گلار از رزین اپوکسی آرالدایت 5052^۱ و سخت‌کننده آرادور 5052^۲ شرکت هانتسمن^۳ استفاده گردید. این رزین از خانواده اپوکسی‌ها با کارایی بالا هستند که عمدتاً در ساخت قطعات سازه‌های هوایی (قطعاتی با خواص مکانیکی بالا) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. بر طبق پیشنهاد تولیدکننده رزین، نسبت درصدهای حجمی رزین اپوکسی و سخت‌کننده به ترتیب ۱۰۰ و ۴۷ می‌باشد.

جدول ۱ عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ آلومینیوم T3-2024

| عنصر | Cr | Ti | Zn | Si | Fe | Mn | Mg | Cu | Al |
|------|------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|
| درصد | 0.02 | 0.056 | 0.13 | 0.18 | 0.37 | 0.7 | 1.30 | 4.58 | پایه |



شکل ۱ نمایی از نوع بافت الیاف شیشه مورد استفاده در ساخت گلار

تمامی نمونه‌ها به کمک روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند. برای ساخت گلار 1/2 در ابتدا بر اساس استاندارد ASTM D2651 سطوح نمونه‌های آلومینیومی برای استفاده در ساخت نمونه‌های گلار به منظور افزایش چسبندگی، آماده‌سازی سطحی شد. روند آماده‌سازی سطح آلومینیوم قبل از ساخت نمونه به شرح زیر می‌باشد [۱۳]:

¹ Araldite LY 5052

² Aradur 5052

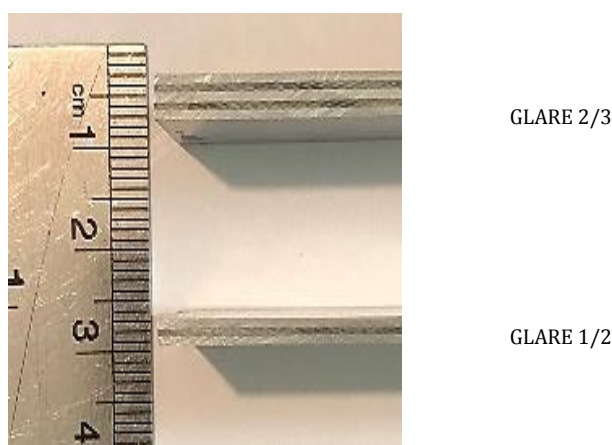
³ Huntsman

۱. تمیز کردن سطوح فلز با استون
۲. آبکشی نمونه‌ها با آب مقطر، سپس خشک کردن نمونه‌ها در مقابل فن
۳. خراشیدن سطح با کاغذ سمباده شماره هشتاد برای افزایش زبری سطح
۴. آبکشی نمونه‌ها با آب مقطر، سپس خشک کردن نمونه‌ها در مقابل فن
۵. تمیز کردن سطوح فلز با استون
۶. آبکشی نمونه‌ها با آب مقطر، سپس خشک کردن نمونه‌ها در مقابل فن

پس از آن رزین اپوکسی به سطح آماده شده آلومینیوم، آغشته شد و شش لایه الیاف شیشه در جهت نورد لایه آلومینیومی، روی آن قرار داده شد. در نهایت، سطح لایه فلزی دوم نیز توسط رزین اپوکسی، آغشته و بر روی آخرین لایه الیاف قرار داده شد. سپس، نمونه تولیدی بین دو فک دستگاه سنتام مدل SPH-500B تحت پرس داغ قرار گرفت. تحت فشار قرار دادن نمونه‌ها نه تنها منجر به توزیع یکنواخت رزین اپوکسی در بین لایه‌ها می‌شود، بلکه باعث به حداقل رسیدن خلل و فرج‌ها و حباب‌های هوای محبوس در نمونه می‌گردد.

به منظور پخت، در ابتدا نمونه به مدت ۷٫۵ ساعت در دمای محیط قرار گرفت. سپس، به مدت ۶ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس در دستگاه و تحت فشار ۳ بار قرار گرفت. در پایان پس از خارج نمودن نمونه‌ها از دستگاه، نمونه‌ها به مدت ۷ روز در دما و فشار محیط قرار گرفتند.

نمونه‌های گلار تولید شده همگی به صورت ورق‌هایی با ابعاد 200×200 میلی‌متر ساخته شدند. سپس، با استفاده از ماشین‌کاری با دور بالا همگی به صورت مستطیلی و بر طبق استاندارد ASTM D3039 در ابعاد 12×120 میلی‌متر با ضخامت تقریبی ۲٫۳۲ میلی‌متر برای گلار 1/2 و ۳٫۸۸ میلی‌متر برای گلار 2/3 آماده شدند. لازم به ذکر است که روند تولید گلار 2/3 کاملاً مشابه گلار 1/2 می‌باشد، با این تفاوت که در گلار 2/3 از سه لایه آلومینیوم و دو لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه استفاده می‌شود. همچنین، دو طرف آلومینیوم میانی، برای چسبندگی بهتر، آماده‌سازی سطحی می‌شود. این امر موجب پیوند بهتر لایه‌ها در گلار 2/3 نسبت به 1/2 می‌شود. همچنین، با توجه به اختلاف تعداد لایه‌های به کار رفته در گلار 1/2 و 2/3، درصد حجمی فلز (MV¹) برای دو نمونه به ترتیب برابر ۶۵ و ۵۸ درصد محاسبه می‌شود. شکل ۲ نمونه‌های گلار 2/3 و 1/2 تولید شده را نشان می‌دهد. در کنار نمونه‌های گلار تولید شده، نمونه‌های آلومینیوم T3-2024 نیز تهیه گردید تا بتوان خواص گلار را با آن مقایسه نمود.

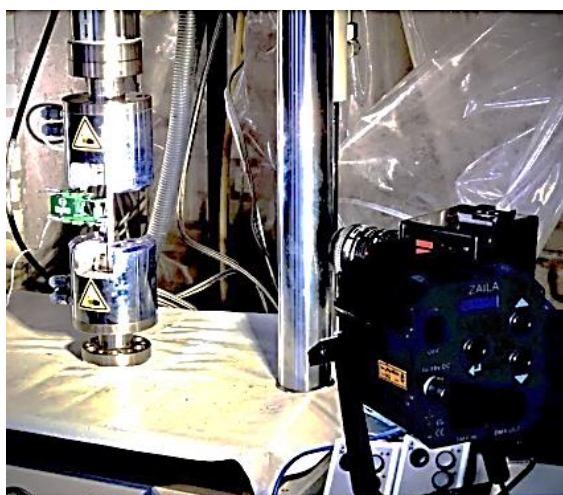


شکل ۲ نمونه‌های تولید شده گلار 1/2 و 2/3 پس از عملیات برشکاری

برای انجام آزمایش‌های مکانیکی از دستگاه زوییک مدل HCT_25 استفاده شد. برای هر نمونه حداقل سه آزمایش به منظور مطالعه تکرارپذیری نتایج انجام شد. جهت دستیابی به شرایط شبه‌استاتیکی در آزمایش کشش، نرخ کرنش متوسط برای انجام کلیه آزمایش‌ها برابر ۰٫۰۰۰۲۵ بر ثانیه و در دمای اتاق در نظر گرفته شد؛ بنابراین، سرعت فک محرک دستگاه برابر ۱٫۵۲ میلی‌متر بر دقیقه برای

¹ Metal Volume Fraction

طول سنج ۵۰ میلی‌متر تنظیم گردید. لازم به ذکر است که در واقع نرخ کرنش به دلیل یکنواخت بودن سرعت فک ثابت نیست. با این وجود به دلیل تغییرات کم کرنش مقدار نرخ کرنش با تقریب، ثابت فرض شده است. شکل ۳ نمایی از نمونه را حین آزمایش کشش نشان می‌دهد که به وسیله اکستنسومتر و روش پردازش تصویر کرنش ایجاد شده در آن به صورت هم‌زمان محاسبه می‌شود. دلیل استفاده از اکستنسومتر در کنار روش پردازش تصویر امکان همگام‌سازی داده‌ها در تحلیل‌های بعدی است. برای استفاده از روش پردازش تصویر از دوربین سرعت بالا Fastcam mini ax200 با قابلیت عکس‌برداری نه‌صد هزار عکس در ثانیه استفاده شد. الگوی ایجاد شده بر روی نمونه‌ها با استفاده از رنگ مشکی در زمینه سفید و به صورت تصادفی ایجاد شده است.



شکل ۳ نمایی از نمونه و مجموعه آزمایش کشش

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی و محاسبه رفتار کششی آلومینیوم T3-2024

خواص مکانیکی ورق آلومینیوم با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش کشش و نوشتن کد در نرم‌افزار متلب استخراج گردید. در کد نوشته شده در ابتدا داده‌های پردازش تصویر و اکستنسومتر همگام‌سازی می‌شود؛ سپس، ناحیه الاستیک نمودار به صورت خودکار جدا شده و مقدار ضریب الاستیسیته گزارش می‌شود. در گام بعد به دلیل رفتار غیرخطی آلومینیوم T3-2024 در آزمایش کشش، مدل ماده وس^۱ با یک جمله غیرخطی و سه ثابت بر روی منحنی تنش پلاستیک ماده برازش داده می‌شود. مدل ماده وس در رابطه ۱ بدین صورت تعریف می‌شود [۱۴]:

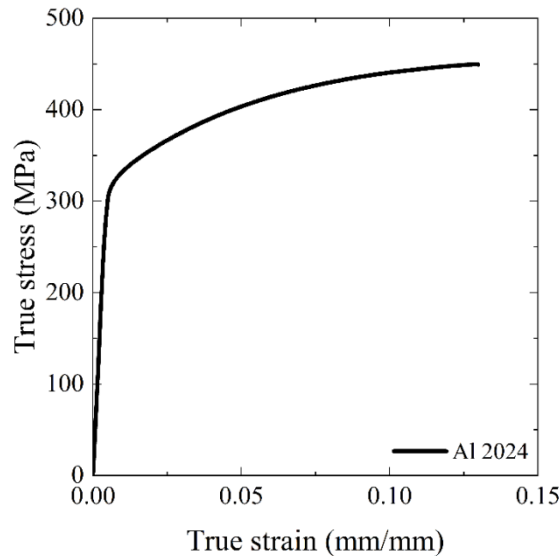
$$\sigma = a + b \left(1 - \exp\left(\frac{-\epsilon_{pl}}{c}\right) \right) \quad (1)$$

که در آن σ تنش سیلان ماده، ϵ_{pl} کرنش پلاستیک و a ، b و c ثابت‌های مادی مدل ماده می‌باشند. همچنین، کد نوشته شده با توجه به کرنش‌های طولی و جانبی مستخرج از روش پردازش تصویر، نسبت پواسون نمونه آلومینیوم T3-2024 را محاسبه می‌کند. در شکل ۴ نمودار تنش-کرنش نمونه آلومینیوم تحت آزمایش کشش نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، تنش در ناحیه الاستیک تا محدوده ۳۰۸،۸ مگاپاسکال به صورت خطی با کرنش افزایش می‌یابد. سپس، با افزایش تنش تا ۴۴۹،۷ مگاپاسکال شکست در نمونه آلومینیوم رخ می‌دهد. در جدول ۲ خواص مکانیکی آلومینیوم T3-2024، ثابت‌های محاسبه شده مدل ماده وس برای بخش پلاستیک به همراه ضریب الاستیسیته و نسبت پواسون داده شده است.

جدول ۲ خواص مکانیکی ورق آلومینیوم T3-2024

| c | b(MPa) | a(MPa) | نسبت پواسون | مدول الاستیسیته (GPa) |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|
| 0.08±0.02 | 233.83±3.10 | 326.88±0.97 | 0.3317 | 67.67±2.85 |

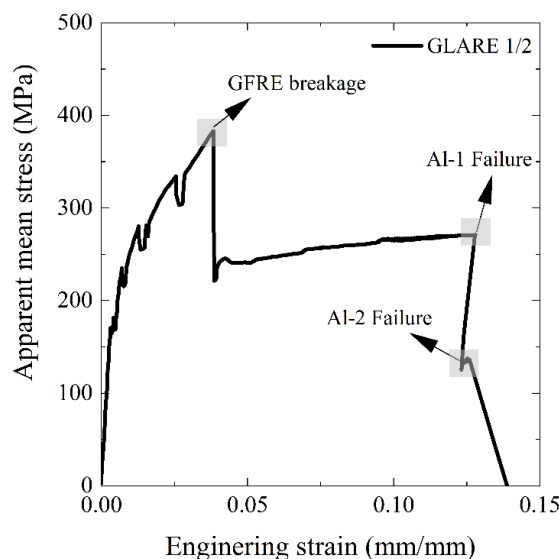
¹ Voce



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش حقیقی آزمایش کشش برای آلومینیوم T3-2024

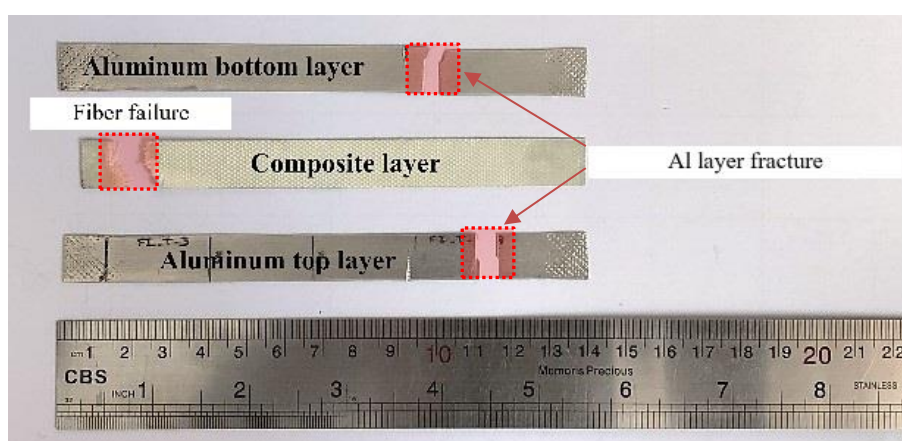
۳-۲- بررسی رفتار کششی گلار 1/2

در شکل ۵ نمودار تنش-کرنش گلار 1/2 تحت آزمایش کشش نشان داده شده است. به دلیل آن که در نمونه‌های تحت آزمایش، تغییر جنس در مقطع وجود دارد، تنش میانگین در همه نقاط برابر نیست، لذا از عبارت تنش متوسط ظاهری به منظور ارائه نتایج نمودار تنش-کرنش استفاده شده است. می‌توان رفتار ماده را به دو بخش مجزا از یکدیگر که مرز این تقسیم‌بندی پارگی لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه است، تقسیم نمود. در بخش اول، در ابتدا تنش تا 157.6 ± 9.2 مگاپاسکال به صورت خطی با کرنش افزایش می‌یابد. سپس، شیب منحنی شروع به کاهش می‌کند. در این ناحیه غیرخطی رفتار ماده با تسلیم شدن و شروع تغییر شکل پلاستیک لایه‌های آلومینیوم همراه است. سپس، هنگامی که مقدار سطح تنش به حداکثر مقدار خود برابر 383.2 ± 16.8 مگاپاسکال می‌رسد، نقطه پارگی (قله اول) لایه میانی که اغلب با صدای شکستن همراه است، مقدار تنش افت شدیدی (42.3% نسبت به بیشینه تنش) را نشان می‌دهد که دلیل این پدیده از دست دادن قابلیت تحمل بار لایه میانی است. لازم به ذکر است تا قبل از واماندگی کامل لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه در قسمت‌هایی از نمودار افت‌های موضعی مشاهده می‌شود که به دلیل پارگی برخی از الیاف در لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه رخ می‌دهد. در بخش دوم، تنها دو لایه آلومینیومی تحمل بار می‌کنند. در واقع، ماده را پس از پارگی لایه میانی دیگر نمی‌توان ورق فلزی الیافی نامید. اما با این وجود، آزمایش تا گسیختگی کامل همه لایه‌ها ادامه یافته است.



شکل ۵ نمودار تنش-کرنش گلار 1/2 مستخرج از آزمایش کشش

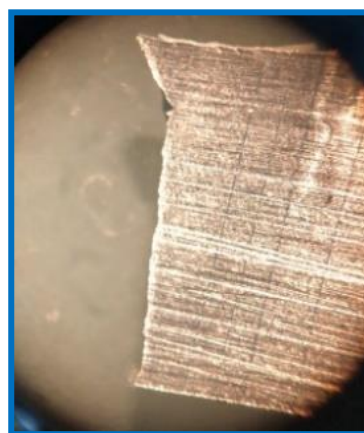
در شکل ۶-الف نمونه گسیخته شده گلار 1/2 پس از آزمایش کشش مشاهده می‌شود که در آن ورق‌های آلومینیوم و الیاف شیشه دچار شکست شده‌اند. همان گونه که شکل نشان می‌دهد، پس از شکست لایه میانی به دلیل افت شدید نیرو بین لایه‌های گلار 1/2 تنش برشی ایجاد می‌گردد که منجر به تورق شده و لایه‌های نمونه را از یکدیگر جدا می‌کند. همچنین، به دلیل اختلاف نسبت پواسون لایه‌های تشکیل‌دهنده گلار 1/2 احتمال بروز تورق و جدایش لایه‌ها حتی قبل از نقطه بیشینه نمودار نیز وجود دارد. شکل‌های ۶-ب و ۶-ج به ترتیب بزرگ‌نمایی محل شکست لایه آلومینیوم و اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه را که به وسیله میکروسکوپ نوری عکس‌برداری و با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر گرفته شده است را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پارگی الیاف و بیرون آمدن آن‌ها از فاز زمینه به وضوح قابل مشاهده است.



(الف)



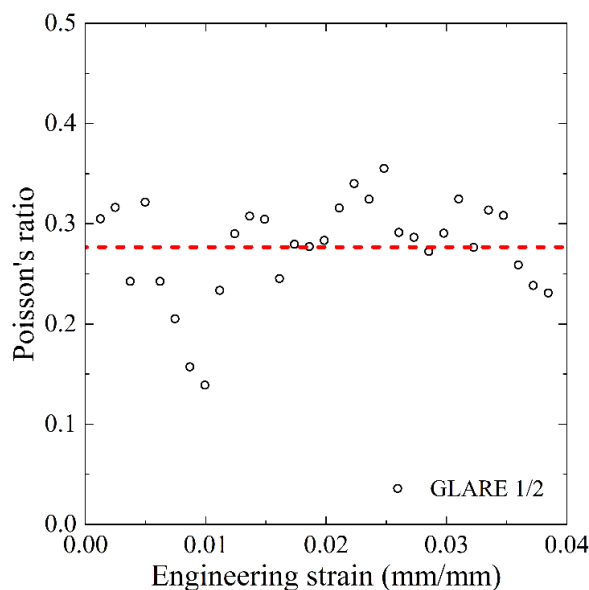
(ج)



(ب)

شکل ۶-الف) شکست لایه‌های گلار 1/2 بعد از آزمایش کشش (ب) بزرگ‌نمایی ناحیه شکست لایه آلومینیوم و (ج) لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه

شکل ۷ نمودار تغییرات نسبت پواسون گلار 1/2 نسبت به کرنش را طی آزمایش کشش نشان می‌دهد. با توجه به آن که بعد از نقطه قله در شکل ۵، نمونه دیگر گلار نبوده و لایه‌ها از هم جدا شده است، لذا تغییرات نسبت پواسون تنها تا نقطه بیشینه نمودار ترسیم شده است. با استفاده از برازش یک چندجمله‌ای مرتبه صفر می‌توان مقدار نسبت پواسون را محاسبه نمود. لازم به ذکر است هر نقطه در نمودار شکل ۷ مبین یک تصویر طی انجام آزمایش است که به وسیله روش پردازش تصویر کرنش‌های طولی و عرضی نمونه اندازه‌گیری و نسبت پواسون در آن تصویر به دست آمده است. مقدار میانگین نسبت پواسون برای گلار 1/2 برابر ۰,۲۷۶۷ محاسبه گردید.



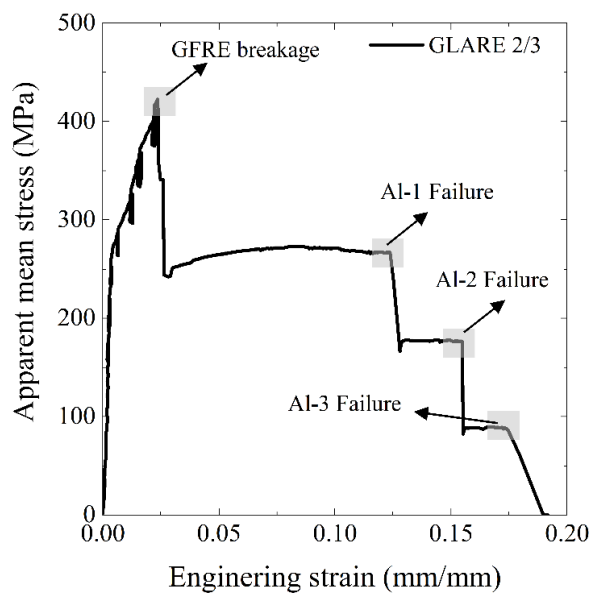
شکل ۷ نمودار تغییرات نسبت پواسون گلار 1/2 در آزمایش کشش نسبت به کرنش

۳-۳- بررسی رفتار کششی گلار 2/3

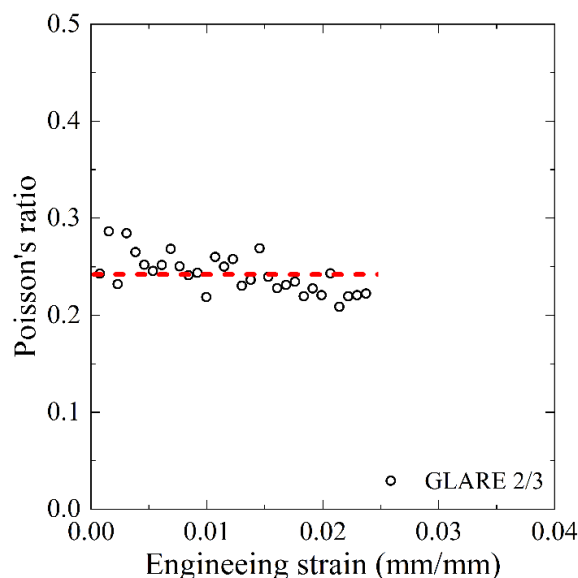
در شکل ۸ نمودار تنش-کرنش گلار 2/3 نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد با وجود دو لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف، تنها یک قله وجود دارد. این مطلب به این معنا است که هر دو لایه در یک‌زمان گسیخته شده‌اند. دلیل این موضوع آن است که کرنش شکست در لایه‌های ماده مرکب نسبت به لایه آلومینیومی بسیار کمتر بوده و اختلاف چندانی در کرنش گسیختگی برای لایه‌ها وجود ندارد؛ اما برای لایه آلومینیومی به دلیل ماهیت نرم و همچنین، امکان گسیختگی از نواحی با تمرکز تنش بالا، مانند لایه‌هایی که با فک‌ها در تماس هستند، لایه‌های آلومینیومی به صورت هم‌زمان گسیخته نمی‌شوند. لازم به ذکر است که در گلار 2/3 نیز مانند گلار 1/2 در ابتدا مقدار تنش به صورت خطی با کرنش افزایش پیدا می‌کند، با این تفاوت که تنش در گلار 2/3 تا محدوده 258.1 ± 6.6 مگاپاسکال به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند که نسبت به گلار 1/2 مقدار 63.8 درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین، مقدار تنش بیشینه در مقایسه با گلار 1/2 در حدود 8.8 درصد افزایش پیدا کرده و به مقدار تنش 416.8 ± 5.4 مگاپاسکال می‌رسد. این امر به دلیل افزایش تعداد لایه‌های ماده مرکب و آلومینیوم و همچنین، چسبندگی بهتر به دلیل آماده سطحی دو طرف آلومینیوم میانی می‌باشد. لازم به ذکر است که درصد حجمی فلز در گلار 1/2 در مقایسه با گلار 2/3 به ترتیب از 65 به 58 درصد کاهش یافته است. از آن جا که سازوکار واماندگی در لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شامل پارگی الیاف، جدایش الیاف زمینه، شکستگی زمینه و تورق بین زیر لایه‌ها است، کاهش درصد حجمی فلز منجر به افزایش میزان واماندگی در اپوکسی تقویت شده با الیاف خواهد شد. به عبارت دیگر، رفتار گلار 2/3 در مقایسه با گلار 1/2 تردتر خواهد بود.

دلایل کاهش 8 درصدی تنش واماندگی گلار 1/2 نسبت به 2/3 را می‌توان بدین صورت بیان نمود. مقدار MVF در نمونه گلار 1/2 و 2/3 به ترتیب برابر 65 و 58 درصد است که منجر به تفاوت در تنش واماندگی شده است. همچنین، در نمونه 2/3 حباب‌های حین ساخت کمتر شده است؛ بنابراین لایه‌های چسبندگی بهتری پیدا خواهند کرد. این موضوع منجر به افزایش سطح تماس بیشتر و در نهایت تنش واماندگی بالاتر است. از سوی دیگر لایه میانی در گلار 2/3 از دوطرف خراشیده شده است که منجر به افزایش چسبندگی و قابلیت تحمل با و در نهایت افزایش تنش واماندگی می‌شود.

در شکل ۹ نمودار نسبت پواسون برحسب کرنش برای گلار 2/3 نشان داده شده است. لازم به ذکر است نقاط تا کرنش متناظر با نقطه بیشینه نمودار شکل ۸ ترسیم شده است. مقدار میانگین نسبت پواسون برای گلار 2/3 برابر 0.2426 به دست آمده است که در مقایسه با گلار 1/2، 12.32 درصد کاهش را نشان می‌دهد. دلیل این امر، کاهش در مقدار درصد فلز به کار رفته در گلار 2/3 در مقایسه با گلار 1/2 است.



شکل ۸ نمودار تنش- کرنش کششی گلار 2/3



شکل ۹ نمودار تغییرات نسبت پواسون گلار 2/3 در آزمایش کشش نسبت به کرنش

۳-۴- پیش‌بینی خواص لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه

به منظور تخمین خواص مکانیکی لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه از برازش منحنی خطی قانون اختلاط بر روی خواص مکانیکی گلار استفاده شده است. با استفاده از قانون اختلاط می‌توان خواص مکانیکی گلار را محاسبه نمود. به وسیله برازش رابطه ۲ بر روی منحنی‌های مدول الاستیسیته و نسبت پواسون نسبت به MVF می‌توان مقادیر خواص مکانیکی لایه میانی را با دقت مناسبی محاسبه نمود [۱۵].

$$P_{GLARE} = (MVF \times P_{Al}) + ((1 - MVF) \times P_{GFRE}) \quad (2)$$

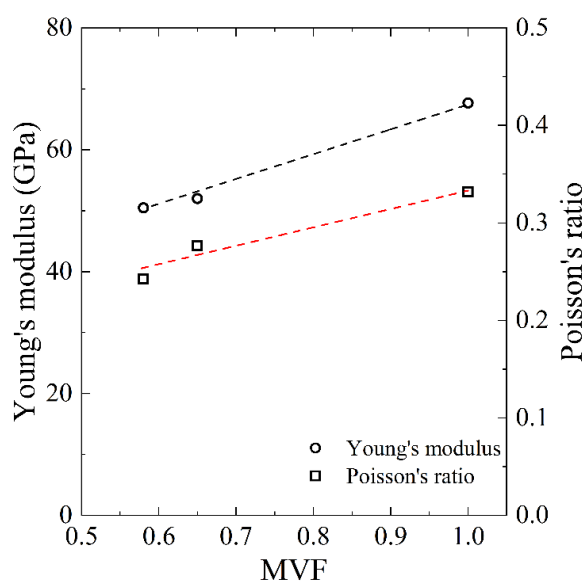
که در آن P_{GLARE} خاصیت مکانیکی گلار، P_{Al} خاصیت مکانیکی آلومینیوم و P_{GFRE} خاصیت مکانیکی لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه است. همچنین، MVF درصد فلز به کار رفته در نمونه را بیان می‌کند.

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات مدول الاستیسیته و نسبت پواسون نسبت به کسر حجمی فلز برای آلومینیوم، گلار 1/2 و گلار 2/3 نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با کاهش MVF ، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به ترتیب برای گلار 1/2 و 2/3

نسبت به آلومینیوم به مقدار ۲۳،۱۶، ۱۶،۵۸، و ۲۵،۴۲، ۱۶،۸۶ درصد کاهش می‌یابد. از برازش منحنی‌های شکل ۱۰ با استفاده از رابطه ۲، خواص مکانیکی شامل نسبت پواسون و مدول الاستیسیته برای لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه محاسبه می‌شود. همچنین، به منظور بررسی دقت رابطه، مقدار خواص ذکر شده برای آلومینیوم نیز محاسبه گردیده و مقدار خطای آن در جدول ۳ داده شده است. ضریب همبستگی برازش برای مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به ترتیب برابر ۰،۹۸۷۰ و ۰،۹۶۱۹ محاسبه شده است. شایان ذکر است که دلیل تغییر نسبت پواسون گلار در مقایسه با آلومینیوم آن است که ضریب انبساط طولی لایه میانی و لایه آلومینیومی متفاوت است، بنابراین در هنگام سرد شدن نمونه‌ها، مقدار انقباض آن‌ها با هم برابر نیست لذا مقداری تنش پسماند که به صورت کششی در آلومینیوم موجود است، منجر به تغییر نسبت پواسون لایه آلومینیومی گلار در مقایسه با لایه آلومینیومی جدا می‌شود.

جدول ۳ خواص مکانیکی تخمین زده شده آلومینیوم T3-2024 و اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه

| | نسبت پواسون | مدول الاستیسیته |
|--------------------------------|-------------|-----------------|
| آلومینیوم T3-2024 | 0.3332±0.01 | 67.43±1.52 |
| اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه | 0.1446±0.03 | 26.74±3.55 |



شکل ۱۰ نمودار تغییرات مدول الاستیسیته و نسبت پواسون نسبت به کسر حجمی فلز برای آلومینیوم، گلار ۱/۲ و گلار ۲/۳

با توجه به اطلاعات جدول ۳ مشاهده می‌شود که قانون اختلاط و برازش آن بر روی داده‌ها، با دقت بسیار خوبی توانسته خواص آلومینیوم را پیش‌بینی کند. با توجه به خواص مکانیکی محاسبه شده برای آلومینیوم، قانون اختلاط توانسته است نسبت پواسون و مدول الاستیسیته را با ۰،۴۵ و -۰،۳۵ درصد خطا پیش‌بینی کند. یکی از چالش‌های اندازه‌گیری خواص مکانیکی گلار آن است که خواص لایه‌های جدا شده با خواص لایه‌های به هم چسبیده شده برابر نمی‌باشد. علاوه بر این خواص لایه آلومینیومی به تنهایی قابل محاسبه است اما خواص مکانیکی لایه میانی به صورت مستقیم قابل محاسبه نمی‌باشد؛ زیرا اگر نمونه لایه میانی به صورت جدا تولید شود، مقدار حباب‌ها و درصد الیاف متفاوت از خواص نهایی لایه میانی در نمونه گلار مورد آزمایش می‌باشد. همچنین اگر لایه میانی جدا شده و سپس آزمایش شود، اثرات تنش‌های پسماند در آن نادیده گرفته شده است. بنابراین در این پژوهش، از قانون اختلاط برای پیش‌بینی خواص مکانیکی اپوکسی تقویت شده با الیاف استفاده شده است.

۴- نتیجه گیری

- در پژوهش حاضر رفتار مکانیکی ورق‌های فلزی الیافی 1/2 و 2/3 تحت آزمایش کشش با استفاده از روش پردازش تصویر از طریق بررسی دقیق توزیع جابه‌جایی و کرنش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر می‌باشند:
- با مقایسه نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های گلار 1/2 و 2/3 مشاهده می‌شود که قله اولیه به وجود آمده در نمونه 2/3، ۸،۸ درصد نسبت به نمونه 1/2 افزایش داشته که دلیل آن افزایش تعداد لایه‌های بکار رفته در نمونه است به عبارت دیگر با افزایش تعداد لایه‌ها کیفیت ساخت نمونه‌ها بالاتر رفته و سطح تنش واماندگی افزایش می‌یابد.
 - نتایج نشان داد با واماندگی لایه ماده مرکب در نمونه 2/3، سطح تنش ۴۱،۸ درصد کاهش می‌یابد و برای نمونه 1/2، این کاهش ۴۲،۲ درصد است. بنابراین زمانی که لایه‌های ماده مرکب گسیخته می‌شوند، ماده دیگر گلار نبوده و خواص به صورت مشابه تنها بیان‌گر لایه آلومینیومی هستند.
 - نتایج نشان داد که با کاهش MVF، در گلار 1/2 و 3/2 نسبت به آلومینیوم، مقدار نسبت پواسون به ترتیب ۱۶،۵۸ و ۲۶،۸۶ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین، مدول الاستیسیته نیز به ترتیب ۲۳،۱۶ و ۲۵،۴۲ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین اثر MVF بر روی نسبت پواسون تاثیر بیشتری در مقایسه با مدول الاستیسیته دارد.
 - همان‌گونه که اشاره شد یکی از چالش‌های اندازه‌گیری خواص مکانیکی گلار آن است که خواص مکانیکی لایه‌های جدا شده با خواص مکانیکی لایه‌های به هم چسبیده شده برابر نیست، که با استفاده از قانون اختلاط با دقت مناسبی پیش بینی شد. با استفاده از قانون اختلاط، نسبت پواسون برابر ۰،۱۴۴۶ و مدول الاستیسیته لایه میانی ۲۶،۷۴ مگاپاسکال پیش‌بینی شد.

References

- [1] Majzoobi G, Kashfi M, Keshavarzan M, Riazalhosseini M. Effect of projectile nose on high - velocity impact behavior of fiber metal laminates. *Polymer Composites*. 2022 Feb;43(2):1177-85. doi: 2010.1002/pc.26446
- [2] Ding Z, Wang H, Luo J, Li N. A review on forming technologies of fibre metal laminates. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2021 Mar 1;4(1):110-26. doi: 2010.1016/j.ijlmm.2020.06.006
- [3] Kazemi ME, Shanmugam L, Yang L, Yang J. A review on the hybrid titanium composite laminates (HTCLs) with focuses on surface treatments, fabrications, and mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020 Jan 1;128:105679. doi: 2010.1016/j.compositesa.2019.105679
- [4] Sinmazçelik T, Avcu E, Bora MÖ, Çoban O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials & Design*. 2011 Aug 1;32(7):3671-85. doi: 2010.1016/j.matdes.2011.03.011
- [5] 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: 2010.1016/j.ijmecsci.2017.06.045
- [6] Lee BE, Park ET, Kim J, Kang BS, Song WJ. Analytical evaluation on uniaxial tensile deformation behavior of fiber metal laminate based on SRPP and its experimental confirmation. *Composites Part B: Engineering*. 2014 Dec 1;67:154-9. doi: 2010.1016/j.compositesb.2014.06.031
- [7] Khan SU, Alderliesten RC, Benedictus R. Delamination in fiber metal laminates (GLARE) during fatigue crack growth under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*. 2011 Sep 1;33(9):1292-303. doi: 2010.1016/j.ijfatigue.2011.04.002
- [8] He W, Wang C, Wang S, Yao L, Wang L, Xie D. Characterizing and predicting the tensile mechanical behavior and failure mechanisms of notched FMLs—Combined with DIC and numerical techniques. *Composite Structures*. 2020 Dec 15;254:112893. doi: 2010.1016/j.compstruct.2020.112893
- [9] Sun J, Xu S, Lu G, Ruan D, Wang Q. Mechanical response of fibre metal laminates (FMLs) under low to intermediate strain rate tension. *Composite Structures*. 2023 Feb 1;305:116493. doi: 2010.1016/j.compstruct.2022.116493
- [10] Khalid MY, Arif ZU, Ahmed W, Arshad H. Evaluation of tensile properties of fiber metal laminates under different strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2022 Apr;236(2):556-64. doi: 2010.1177/09544089211053063
- [11] Sharma AP, Khan SH, Parameswaran V. Experimental and numerical investigation on the uni-axial tensile response and failure of fiber metal laminates. *Composites Part B: Engineering*. 2017 Sep 15;125:259-74. doi: 2010.1016/j.compositesb.2017.05.072
- [12] Cantwell WJ. The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene. *Composites science and technology*. 2000 May 1;60(7):1085-94. doi: 2010.1016/S0266-3538(00)00002-6

- [13] Kashfi M, Majzoubi GH, Bonora N, Iannitti G, Ruggiero A, Khademi E. A new overall nonlinear damage model for fiber metal laminates based on continuum damage mechanics. *Engineering Fracture Mechanics*. 2019 Feb 1;206:21-33. doi: [10.1016/j.engfracmech.2018.11.043](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.11.043)
- [14] Zhang C, Chu X, Guines D, Leotoing L, Ding J, Zhao G. Dedicated linear-Voigt model and its application in investigating temperature and strain rate effects on sheet formability of aluminum alloys. *Materials & Design*. 2015 Feb 15;67:522-30. doi: [2010.1016/j.matdes.2014.10.074](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.074)
- [15] Tham MW, Fazita MN, Abdul Khalil HP, Mahmud Zuhudi NZ, Jaafar M, Rizal S, Haafiz MM. Tensile properties prediction of natural fibre composites using rule of mixtures: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2019 Mar;38(5):211-48. doi: [2010.1177/0731684418813650](https://doi.org/10.1177/0731684418813650)