



ارزیابی خواص مکانیکی ورق‌های هایلایت (آلومینیوم AA5182/ پلی‌پروپیلن/ آلومینیوم AA5052) و آلومینیوم یکپارچه AA5052

احمد قاسم الربیعی، محمد جواد میرنیا^{*}، مجید الیاسی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: mirnia@nit.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
ورق‌های آلومینیومی هایلایت، از ترکیب لایه‌های آلومینیومی و هسته پلیمری ساخته می‌شوند و معمولاً با نام ورق‌های کامپوزیت آلومینیوم شناخته می‌شوند. این ورق‌ها از دو لایه نازک آلومینیوم در طرفین تشکیل شده‌اند که میان آن‌ها یک هسته پلیمری قرار دارد. ترکیب این ساختار چندلایه سبب می‌شود ورق در عین سبکی، استحکام بالا، مقاومت مناسب در برابر ضربه و قابلیت شکل‌دهی عالی داشته باشد. این مطالعه، یک تحلیل تجربی جامع از خواص مکانیکی ورق آلومینیوم AA5182 ساندویچی هایلایت با هسته پلی‌پروپیلن در مقایسه با ورق یکپارچه آلومینیوم AA5052 ارائه داده است. بدین منظور، تست‌های مکانیکی شامل کشش تک‌محوره، برش درون‌صفحه، کشش شکافدار و کشش کرنش‌صفحه‌ای برای ارزیابی عملکرد در هر دو حالت انجام شد. نتایج نشان داد که ورق‌های هایلایت در شرایط برش درون‌صفحه تنها ۱۹/۶٪ کاهش در ظرفیت باربری نشان دادند، در حالی که در شرایط کرنش‌صفحه‌ای این کاهش به ۵۵/۱٪ رسید. مشاهدات شکست نشان داد که هایلایت در شرایط تمرکز تنش (مانند کشش شکافدار) به جای شکست شکل‌پذیر، با شکست برشی در زاویه ۴۵ درجه و جدایش بین‌لایه‌ای گسیخته می‌شود که منجر به جذب انرژی به مراتب کمتر نسبت به آلومینیوم یکپارچه می‌شود. همچنین مقایسه نتایج حاضر با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که افزایش ضخامت لایه‌های فلزی رویه و کاهش ضخامت هسته پلیمری می‌تواند عملکرد مکانیکی این گونه ساندویچ‌ها را به طور محسوسی بهبود بخشد. اگرچه کاهش قابل‌توجهی در حداکثر ظرفیت بار (۵۵/۱٪) و انرژی جذب شده (۷۴/۸٪) برای ورق‌های هایلایت نسبت به آلومینیوم یکپارچه مشاهده شد، با این وجود ساختار ساندویچی به دلیل وزن کمتر (حدود ۴۰٪) و سفتی اولیه بالاتر در کشش، دارای نسبت عملکرد به وزن مطلوب‌تری می‌باشد.	مقاله پژوهشی دریافت: ۱۷ دی ۱۴۰۴ پذیرش: ۱ مرداد ۱۴۰۵
	کلیدواژگان: ورق هایلایت آلومینیوم-پلی‌پروپیلن فلز/پلیمر/فلز پنل ساندویچی مواد سبک‌وزن خواص مکانیکی

Comparative mechanical characterization assessment of Aluminium AA5182/ Polypropylene/ Aluminium AA5182 Hylite sheets and monolithic Aluminum AA5052

Ahmed Qasim Alrubaye¹, Mohammad Javad Mirnia^{2*}, Majid Elyasi³

Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* Corresponding Author's Email: mirnia@nit.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 7 January 2026

Accepted: 23 July 2026

Keywords:

Hylite
Aluminum-Polypropylene
Metal/Polymer/Metal (MPM)
Sandwich Panel
Lightweight Materials
Mechanical Properties

Abstract

Hylite aluminum sheets are constructed from a combination of aluminum layers and a polymer core, commonly known as aluminum composite panels. These sheets consist of two thin aluminum layers on the outside, with a polymer core sandwiched in between. This multilayer composite structure imparts the sheets with characteristics such as lightness, high strength, appropriate impact resistance, and excellent formability. This study provides a comprehensive experimental analysis of the mechanical properties of AA5182 aluminum Hylite sandwich sheets with a polypropylene core, in comparison to monolithic AA5052 aluminum sheets. For this purpose, mechanical tests including uniaxial tension, in-plane shear, notched tension, and plane strain tension were conducted to evaluate performance in both conditions. The results indicated that Hylite sheets exhibited only a 19.6% reduction in load-bearing capacity under in-plane shear conditions, while under plane strain conditions this reduction reached 55.1%. Fracture observations revealed that under stress concentration conditions (such as notched tension), Hylite sheets fail through shear failure at a 45-degree angle and interlayer separation, rather than ductile fracture, leading to significantly lower energy absorption compared to monolithic aluminum. Furthermore, a comparison of the present results with previous studies shows that increasing the thickness of the outer metal layers and reducing the thickness of the polymer core can noticeably enhance the mechanical performance of such sandwich structures. Although a significant reduction in maximum load capacity (55.1%) and absorbed energy (74.8%) was observed for the Hylite sheets compared to monolithic aluminum, the sandwich structure nevertheless exhibits a more favorable performance-to-weight ratio due to its lower weight (approximately 40%) and higher initial stiffness in tension.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Alrubaye AQ, Mirnia MJ, Elyasi M. Comparative mechanical characterization assessment of Aluminium AA5182/ Polypropylene/ Aluminium AA5182 Hylite sheets and monolithic Aluminum AA5052. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2026 Jan 21;12(11):59-77. doi: 10.22034/ijme.2026.571325.2160 [In Persian]

۱- مقدمه

سبک‌سازی در مهندسی مکانیک نقشی اساسی در افزایش بازدهی، بهبود عملکرد و کاهش مصرف انرژی سیستم‌ها دارد. کاهش جرم قطعات موجب کاهش اینرسی، بهبود شتاب‌گیری، افزایش سرعت پاسخ و کاهش تنش‌های خستگی در ماشین‌آلات و تجهیزات می‌شود. در دهه‌های اخیر، روش‌های نوین سبک‌سازی مانند استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و منیزیم، قطعات پلیمری تقویت‌شده، سازه‌های مشبک تولید شده با پرینت سه‌بعدی، و طراحی بهینه توپوگرافی به‌طور گسترده در صنایع خودروسازی، هوافضا و تجهیزات صنعتی به‌کار گرفته شده‌اند. در این میان، ورق‌های هایلایت آلومینیومی یا کامپوزیتی به دلیل وزن پایین، مقاومت مناسب، قابلیت شکل‌دهی و امکان ایجاد پوشش‌های مقاوم سطحی، گزینه‌ای مؤثر برای سبک‌سازی برخی قطعات مکانیکی هستند. این ورق‌ها در ساخت پوسته‌ها، کاورهای محافظ، شیلدهای حرارتی، پنل‌های دستگاه‌ها و بدنه تجهیزات سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند و به کاهش وزن کلی سیستم بدون افت استحکام کمک می‌کنند؛ در نتیجه راندمان تجهیزات و عمر کاری آن‌ها افزایش می‌یابد [۱، ۲].

مواد ساندویچی، به‌ویژه آن‌هایی که دارای هسته‌ای پلیمری بین دو لایه فلزی هستند، به عنوان راه‌حلی کارا جهت سبک‌سازی سازه‌ها ظهور کرده‌اند [۳]. این سازه‌ها، از استحکام و دوام بالایی لایه‌های فلزی بهره می‌برند و در عین حال هسته متراکم را با پلیمری با چگالی کمتر جایگزین می‌کنند که نتیجه آن افزایش چشمگیر سفتی و بهره (نسبت سفتی به وزن) و قابلیت‌های عالی جذب انرژی است. این دسته از مواد، مسیری امیدبخش برای ایجاد اجزای ساختاری سبک‌تر و کارآمدتر بدون کاستی‌های نامتناسب در عملکرد ارائه می‌دهند [۴، ۵].

امروزه انواع گسترده‌ای از کامپوزیت‌های فلز/پلیمر/فلز^۱ در تحقیقات دانشگاهی و صنعتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۶]. دامنه عملکرد و کاربرد این مواد لایه‌ای به‌شدت به انتخاب دقیق مواد تشکیل‌دهنده و پیکربندی هندسی آن‌ها وابسته است [۷]. محققان ترکیبات مختلفی از لایه‌های فلزی، از جمله آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای گوناگون را برای تطبیق خواصی مانند استحکام، قابلیت شکل‌دهی و مقاومت به خوردگی بررسی کرده‌اند. به‌طور مشابه، انتخاب هسته پلیمری مانند پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن یا پلی‌امید حائز اهمیت است، زیرا چسبندگی بین لایه‌ها، ویژگی‌های میراکندگی و پایداری حرارتی را کنترل می‌کند [۸]. علاوه بر این، نسبت ضخامت بین هسته و لایه‌های فلزی یک پارامتر طراحی اساسی است که به‌طور مستقیم بر سفتی خمشی، استحکام برشی و وزن کلی کامپوزیت تأثیر می‌گذارد. این سازه‌های چندمقیاسی، با لایه‌های فلزی به ضخامت حداکثر میلی‌متر و هسته‌های پلیمری به نازکی چند میکرون، برای طیف متنوعی از کاربردها مهندسی شده‌اند. اگرچه گسترش این نوع کامپوزیت‌های فلزی، امکان‌سنجی کلی کامپوزیت‌های فلز/پلیمر/فلز را ثابت کرده است، اما باید رفتار مکانیکی آنها در مقایسه با معیارهای تثبیت شده، به‌طور دقیق کمی‌سازی شود [۹].

در سال‌های اخیر تمایل فزاینده‌ای برای استفاده از این انواع ورق‌های کامپوزیت‌های فلز/پلیمر/فلز به‌وجود آمده است. هوفنباخ و همکاران [۱۰] بررسی‌های تجربی و عددی گسترده‌ای برای مشخصه‌یابی هایلایت، یک ورق ساندویچی فلز/پلیمر/فلز، به عنوان جایگزینی سبک‌وزن برای ورق‌های فلزی متعارف در کاربردهای خودرویی انجام دادند. کار آن‌ها بر ارزیابی خواص مکانیکی ماده، از جمله رفتار کششی و خمشی، و همچنین توسعه راهبردهای کارآمد مدل‌سازی المان محدود با استفاده از المان‌های پوسته‌ای و حجیم مختلف برای شبیه‌سازی دقیق پاسخ آن تحت شرایط بارگذاری مختلف، از جمله کشش، خمش سه‌نقطه‌ای و تست نفوذ متمرکز بود. در این راستا، جکسون و همکاران [۱۱] کاربرد شکل‌دهی افزایشی ورق را بر روی پنل‌های ساندویچی مختلف به عنوان جایگزینی کم‌هزینه و بدون قالب برای فرآیندهای شکل‌دهی متعارف به منظور ایجاد پوسته‌های سه‌بعدی بررسی کردند. آن‌ها پنل‌هایی با هسته‌های مختلف-پلی‌پروپیلن، الیاف فولاد زنگ‌زن و فوم آلومینیوم را آزمایش کردند و دریافتند که شکل‌دهی افزایشی ورق تنها از نظر مکانیکی برای پنل‌هایی با هسته‌های چکش‌خوار و عمدتاً تراکم‌ناپذیر، مانند پلیمرها، امکان‌پذیر است و بدون فروریزی هسته یا نازک‌شدگی قابل‌ملاحظه، شکل‌دهی را تحمل می‌کند.

کارادو و همکاران [۱۲] به بررسی توسعه و قابلیت شکل‌دهی ورق‌های ساندویچی سه‌لایه فلز/پلیمر/فلز برای کاربردهای بالقوه خودرویی پرداختند و دو فرآیند تولید در مقیاس آزمایشگاهی، اتصال نوردی و پرس حرارتی، را با نمونه تولیدی صنعتی مقایسه کردند. آن‌ها با استفاده از ترکیبات مختلفی از لایه‌های فولاد زنگ‌زن آستنیتی و آلیاژ آلومینیوم با هسته‌های پلیمری ترموپلاستیک (هر دو تقویت نشده و تقویت شده با الیاف شیشه)، این سامانه‌ها را از طریق آنالیز حرارتی، چسبندگی (تست‌های جدایش)، بررسی ریزساختار

¹ Metal/Polymer/Metal

و تست‌های قابلیت شکل‌دهی (تست کشش عمقی اریکسن و کشش عمیق) مشخصه‌یابی کردند. نتایج نشان داد که ورق‌های ساندویچی اتصال داده شده با نور، چسبندگی بین‌لایه‌ای برتر (با استحکام جدایش تا ۴۰٪ بالاتر) و قابلیت شکل‌دهی بهتری از خود نشان دادند. آنها عملکردی قابل قیاس با فلزات یکپارچه داشتند و از ورق‌های ساندویچی صنعتی پیشی گرفتند، در حالی که نمونه‌های پرس حرارتی در حین شکل‌دهی دچار جدایش لایه‌ها شدند و نشان از نیاز به بهینه‌سازی فرآیند برای دستیابی به چسبندگی قوی داشت.

هارهاش و همکاران [۲] به بررسی جامع خواص مکانیکی و قابلیت شکل‌دهی کشش عمیق ورق‌های ساندویچی سه‌لایه فولاد/پلیمر/فولاد و نمونه‌های تقویت‌شده موضعی آن‌ها پرداختند. محققان این مواد را با استفاده از اتصال نوردی تولید کردند و ضخامت هسته پلی‌پروپیلن-پلی‌اتیلن را برای تحلیل اثر آن بر سفتی و استحکام ویژه تغییر دادند و دریافتند که ترکیب مواد به‌طور دقیق خواص مکانیکی را پیش‌بینی می‌کند و کسر حجمی هسته حدود ۰/۳۷۵، تعادلی بهینه بین صرفه‌جویی در وزن و عملکرد ارائه می‌دهد. نتیجه مهم در یکپارچه‌سازی صفحات فلزی و هسته پلیمری برای افزایش تحمل تحت بارهای موضعی بود.

سانتیاگو و همکاران [۱۳] عملکرد ضربه‌ای یک کامپوزیت فلزی-فیبری ترموپلاستیک نوین متشکل از لایه‌های آلومینیوم و یک کامپوزیت پلی‌پروپیلن خودتقویت را به‌صورت تجربی تعیین کردند. این مطالعه، خواص مکانیکی مواد تشکیل‌دهنده را در محدوده وسیعی از نرخ‌های کرنش بررسی کردند و پاسخ آن‌ها را تحت شرایط ضربه با سرعت کم و بالا ارزیابی نمود. نتایج نشان داد که این کامپوزیت توانسته تا ۷۵٪ انرژی ویژه بیشتر (انرژی بر واحد چگالی سطحی) را در مقایسه با مواد سنتی بر پایه شیشه/پوکسی (مانند گلیر) در سطوح تغییرشکل کم جذب کنند و این نتیجه به رفتار ویسکوالاستیک نسبت داده شد. با این حال، این کامپوزیت‌ها حد سوراخ‌شدگی پایین‌تر و عملکرد ضعیف‌تری در سناریوهای تغییرشکل بالا و سوراخ‌شدگی به‌دلیل چسبندگی ضعیف‌تر بین لایه‌های فلز/کامپوزیت از خود نشان دادند. نویسندگان نتیجه گرفتند که این کامپوزیت مواد سبک‌وزن و قابل بازیافت امیدبخشی برای کاربردهای ضربه‌ای هستند، مشروط بر اینکه چقرمگی بین‌لایه‌ای بهبود یابد.

خاردین و همکاران [۱۴] یک بررسی مقدماتی بر روی شکل‌دهی الکترومغناطیسی ورق‌های ساندویچی آلومینیوم/پلی‌پروپیلن-پلی‌اتیلن/آلومینیوم^۱، که یک فرآیند پرسرعت و بدون قالب است، انجام دادند و نتایج را با شکل‌دهی کششی شبه‌استاتیکی متعارف مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که شکل‌دهی الکترومغناطیسی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای قابلیت شکل‌دهی ورق‌های ساندویچی را بهبود بخشیده و بدون ترک خوردن، به عمق شکل‌دهی بیش از ۳۰٪ بیشتر در مقایسه با فرآیندهای سنتی رسیده است. این بهبود به توزیع یکنواخت‌تر کرنش و عدم نازک‌شدگی موضعی تحت شرایط شکل‌دهی آزاد شکل‌دهی الکترومغناطیسی نسبت داده شد. با این حال، تست‌های خمش شکل‌دهی الکترومغناطیسی چالش‌های خاص فرآیند، از جمله ذوب جزئی لایه‌های آلومینیومی و جدایش لایه‌ها را آشکار کرد که تحت تاثیر سطح تخلیه انرژی و شرایط اولیه (آنیل شده در مقابل وضعیت اولیه) لایه‌های فلزی بودند.

هارهاش و همکاران [۱۵] به‌صورت تجربی تاثیر حیاتی استحکام چسبندگی بین‌لایه‌های فولاد/پلیمر را بر عملکرد ضربه‌ای جعبه‌های جاذب انرژی (کرش‌باکس) ساندویچی فولاد/پلیمر/فولاد^۲ بررسی کردند. با ساخت کرش‌باکس‌ها با سه سطح چسبندگی میان لایه‌ها، بدون چسبندگی، چسبندگی ضعیف (۵/۲ مگاپاسکال) و چسبندگی قوی (۱۰/۷ مگاپاسکال) برای کلاه ایمنی دولایه و یک لایه سعی کردند تست‌های لهیدگی محوری و خمش سه‌نقطه‌ای را تحت شرایط بارگذاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی بررسی نمایند. نتایج نشان داد که کیفیت چسبندگی یک عامل برتر است، به‌طوری‌که کرش‌باکس‌های بدون چسبندگی، تخریب عملکرد شدیدی، از جمله کاهش بیش از ۵۰٪ در جذب انرژی، کماتش کلی زودرس و جدایش لایه‌ها، در مقایسه با نمونه‌های دارای چسبندگی قوی از خود نشان دادند. چسبندگی ضعیف میان لایه‌ها نشان‌دهنده کاهش ۵۰٪ در استحکام برش لبه بود که منجر به کاهش جزئی (حدود ۱۰٪) در عملکرد ساختاری کلی داشت.

خانی و همکاران [۱۶] قابلیت شکل‌دهی و وضعیت تنش‌های پسماند در ورق‌های ساندویچی فولاد/پلی‌پروپیلن-پلی‌اتیلن/فولاد که با استفاده از فرآیند شکل‌دهی افزایشی تک‌نقطه‌ای^۳ شکل‌دهی شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه به‌طور سیستماتیک اثرات ضخامت هسته و لایه سطحی، قطر ابزار و اندازه گام افزایشی را تجزیه و تحلیل کرد. یافته‌ها نشان داد که ورق‌های ساندویچی به دلیل افزایش سفتی خمشی، به نیروهای شکل‌دهی به مراتب بالاتری نسبت به فولاد یکپارچه نیاز دارند، به طوری که برای ورق با هسته

¹ Al/PP-PE/Al

² Steel/Polymer/Steel (SPS)

³ SPIF

1/2 mm، نیروهای مورد نیاز تقریباً دو برابر شده است. تحلیل آماری، ضخامت هسته را به عنوان موثرترین پارامتر بر قابلیت شکل‌دهی شناسایی کرد، به طوری که هسته‌های ضخیم‌تر منجر به ترک‌خوردگی زودرس و کاهش عمق شکل‌دهی گردیده است. نکته کلیدی این که هسته پلیمری باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های پسماند در سرتاسر ضخامت و کاهش پدیده بازگشت فنی در مقایسه با فولاد یکپارچه شد. هسته‌های ضخیم‌تر، این اثر یکنواخت‌کنندگی تنش را بیشتر تقویت کرده و در نتیجه دقت ابعادی قطعات شکل‌دهی شده را بهبود بخشیده است.

در زمینه اهمیت جذب انرژی توسط ورق‌های کامپوزیتی دارای هسته غیرفولادی، تحقیقات مشابه زیادی انجام شده است که هریک بر اهمیت مواد مورد استفاده در هسته این ورق‌ها تاکید داشته اند. در این زمینه بیرانوند و همکاران [۱۷] دریافتند که پارامترهای مختلف ورق‌های آلومینیوم-پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با الیاف شیشه بر کیفیت فرآیند سوراخ‌کاری این ورق‌ها تاثیر دارد. وحیدی و همکاران [۱۸] به طور آزمایشگاهی رفتار مکانیکی ساندویچ‌پنل‌هایی با هسته چوب‌پنبه متراکم‌شده تحت آزمون‌های نفوذ شبه‌استاتیک و خمش سه‌نقطه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دو نوع هسته چوب‌پنبه، شامل چوب‌پنبه خشک و چوب‌پنبه با پرکننده لاستیک استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با وجود استحکام خمشی بالاتر نمونه مرجع، ساندویچ‌پنل‌های با هسته چوب‌پنبه به دلیل جذب انرژی قابل توجه در تست نفوذ و رفتار نرم‌تر در خمش، پتانسیل کاربردی مناسبی در صنایع مختلف از خود نشان می‌دهند.

نصیری و عطریان [۱۹] تاثیر محرک‌های هندسی بر رفتار تغییرشکلی و جذب انرژی نمونه‌های کشش عمیق شده سه لایه‌ای آلومینیوم/ پلی‌پروپیلن/ فولاد را مورد بررسی قرار دادند. آنها از دو ورق فلزی (آلومینیومی و فولادی) به عنوان پوسته و یک ورق پلی‌پروپیلنی به عنوان هسته استفاده نمودند. آنها دریافتند که افزایش ضخامت لایه پلیمری از ۱ mm به ۲ mm موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی در حدود ۶٪ شده است.

عسکری و همکاران [۲۰] تاثیر اعمال سیکل‌های حرارتی بر قابلیت جذب انرژی چند لایه الیاف- فلز ساخته شده با پوسته آلومینیومی و هسته کامپوزیتی اپوکسی- الیاف شیشه با چیدمان‌های متفاوت الیاف شیشه را مورد بررسی دقیق قرار دادند. نتایج ماکروسکوپی آنها نشان داد که پس از اعمال ۹۰ سیکل حرارتی، جدایش بین لایه‌های الیاف شیشه مکانیزم اصلی شکست در چندلایه‌های الیاف فلز بود. همچنین آنها مشاهده کردند که سیکل‌های حرارتی بالا باعث کاهش چسبندگی بین الیاف شیشه و زمینه اپوکسی در چند لایه الیاف- فلز می‌شود.

رضایت و همکاران [۲۱] جذب انرژی و استحکام پنل‌های ساندویچ با صفحه آلومینیومی AA2024-T3 به عنوان پوسته و لانه زنبوری آلومینیومی ۵۰۵۲ به عنوان هسته آن تحت بارگذاری پانچ شبه‌استاتیک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که حداقل میزان جذب انرژی نمونه‌های پنل ساندویچی در تست نفوذ سنبه ۲۱/۴۲ ژول و حداکثر ۲۵/۱۳ ژول می‌باشد.

زال و همکاران [۲۲] تاثیر افزودن پرکننده فومی بر قابلیت جذب انرژی لوله‌های هیبریدی با ضخامت‌های مختلف لایه کامپوزیتی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که در ضخامت‌های پایین لایه کامپوزیتی، افزودن فوم پلی‌یورتان موجب بهبود موثر جذب انرژی ویژه و بهره‌وری نیروی لهیدگی لوله هیبریدی شده است. با این وجود، آنها دریافتند که در ضخامت‌های بالای لایه کامپوزیتی این روند مثبت از بین رفته و حتی تاثیر فوم بر قابلیت جذب انرژی ویژه منفی گردیده است.

ندرلی و همکاران [۲۳] قابلیت اتصال ورق سه لایه آلومینیوم/ پلیمر/ آلومینیوم به یک ورق تک لایه آلومینیوم به ضخامت ۱ mm توسط فرایند کلینچینگ، که یک فرایند اتصال با شکل‌دهی است را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش عمق نفوذ پین تا یک مقدار بهینه باعث افزایش قفل مکانیکی و استحکام اتصال شده است. همچنین در تمامی شرایط تست، شرایط مناسب‌تر اتصال زمانی حاصل شد که نحوه شکست، ایجاد گلویی از کف قطعه و پارگی بوده است.

عبداللهی و همکاران [۲۴] تاثیر سیکل سرمایشی بر خواص خمشی کامپوزیت لایه‌ای الیاف- فلز را بررسی کردند. آن‌ها از دو لایه آلومینیوم AA2024-T3 و یک لایه کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت به روش لایه گذاری دستی استفاده کردند. مطالعات میکروسکوپی آنها نشان داد که علت کاهش خواص خمشی برای نمونه‌های با آلومینیوم حکاکی‌شده و کاهش استحکام خمشی برای نمونه با آلومینیوم سنباده‌زده‌شده بعد از سیکل سرمایشی، تغییر مکانیزم شکست از شکست کامپوزیت به جدایش بین لایه‌های کامپوزیت است، در حالی که برای کامپوزیت‌های با آلومینیوم آندایز شده، این مکانیزم، شکست کامپوزیت بوده که با انجام سیکل سرمایشی تغییری نکرد. همچنین مطالعات گسترده‌ای هم بر روی کیفیت آلیاژ آلومینیوم برای روندهای ساخت و تولید انجام شده است.

مریدی و همکاران [۲۵] دو استراتژی تغییر شکل مختلف شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای برای تولید فلنج دایره‌ای از ورق آلومینیوم AA6061 با ضخامت ۱ mm را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که استراتژی‌های چند مرحله‌ای دقت ابعادی قطعات را به نسبت شکل‌دهی در استراتژی یک مرحله‌ای بهبود داده است.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات متعددی بر روی ورق‌های ساندویچی فلز/پلیمر/فلز، به‌ویژه با پوسته‌های فولادی، انجام شده است، اما تحقیقات محدودی به ارزیابی سیستماتیک خواص مکانیکی ورق‌های فوق سبک آلومینیوم/پلیمر/آلومینیوم با هسته پلی‌پروپیلن پرداخته‌اند و اغلب این مطالعات نیز عمدتاً به آزمون کشش تک‌محوری بسنده کرده‌اند. از این رو، پژوهش حاضر به مطالعه جامع رفتار مکانیکی ورق تجاری هایلایت با چیدمان AA5182/پلی‌پروپیلن/AA5182 اختصاص یافته است. در این راستا، خواص مکانیکی ورق هایلایت تحت چهار حالت بارگذاری متفاوت شامل کشش تک‌محوری، برش درون‌صفحه، کشش شکاف‌دار و کشش کرنش‌صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با ورق آلومینیوم یکپارچه AA5052 مقایسه شده است. انتخاب این مجموعه آزمون‌ها با هدف تحلیل عملکرد ماده در طیف وسیعی از شرایط تنش‌ی شامل حالت‌های تک‌محوره، برشی و چندمحوره صورت پذیرفته است.

۲- مراحل آزمایشگاهی

۲-۱- مواد اولیه

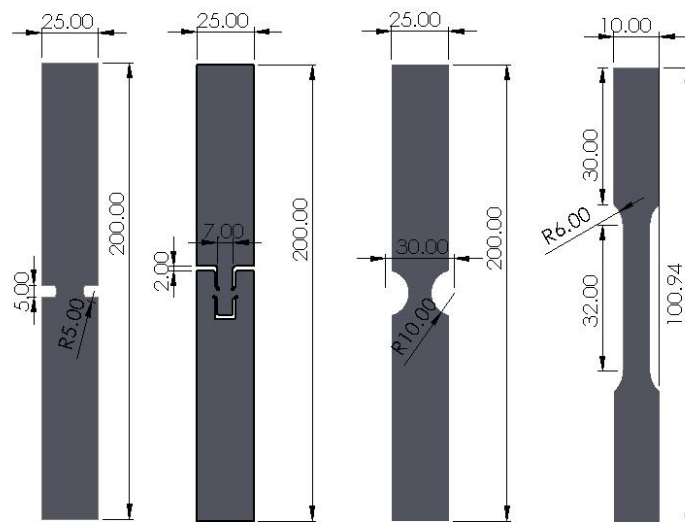
مشخصات مکانیکی ورق‌های مورد بررسی در این مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. ورق هایلایت مورد مطالعه دارای یک هسته پلی‌پروپیلن به ضخامت ۰/۸ mm و دو رویه آلومینیومی به ضخامت ۰/۲ mm بود که در مجموع ضخامت کلی ۱/۲ mm را تشکیل می‌داد. این ترکیب منجر به وزن بسیار پایین پنل، معادل ۱/۸ kg/m² شده است. در مقایسه، یک ورق آلومینیوم یکپارچه با ضخامت ۱ mm ساخته شده از آلیاژ رایج خودرویی (AlMg2.5) AA5052، حدود ۲/۷ kg/m² وزن دارد که ورق هایلایت منجر شده، با همان حجم و ضخامت یکسان، تقریباً ۴۵-۴۰ درصد نسبت به ورق آلومینیوم سبک‌تر گردد. شایان ذکر است که انتخاب ضخامت‌ها در این مطالعه بر اساس دسترسی تجاری و ملاحظات کاربردی صورت پذیرفته است. ورق هایلایت با ضخامت کلی ۱/۲ mm، مطابق اطلاعات کارخانه سازنده، کمترین ضخامت موجود از این خانواده ساندویچی است، حال آنکه ورق یکپارچه آلومینیوم با ضخامت ۱ mm به‌عنوان یک انتخاب صنعتی متداول برای پوسته‌های سبک در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که ورق هایلایت به‌صورت یک محصول تجاری آماده تهیه گردید و جزئیات فنی مربوط به نوع چسب و فرآیند اتصال لایه‌ها از سوی شرکت سازنده در دسترس نمی‌باشد.

جدول ۱ خواص ورق‌های تست شده در مطالعه حاضر

خواص	ماده هسته	ورق‌های آلومینیومی
مواد	Polypropylene (PP)	EN AW-5182 (AlMg4.5Mn0.4)
ضخامت (mm)	0.8	0.2
ضخامت کل (mm)		1.2
وزن پنل (kg/m ²)		1.8
سختی خمشی (kNcm ² /m) [۲۶]		80
ضریب انبساط حرارتی (1/K) [۲۶]		24×10 ⁻⁶

۲-۲- مراحل آزمایشگاهی

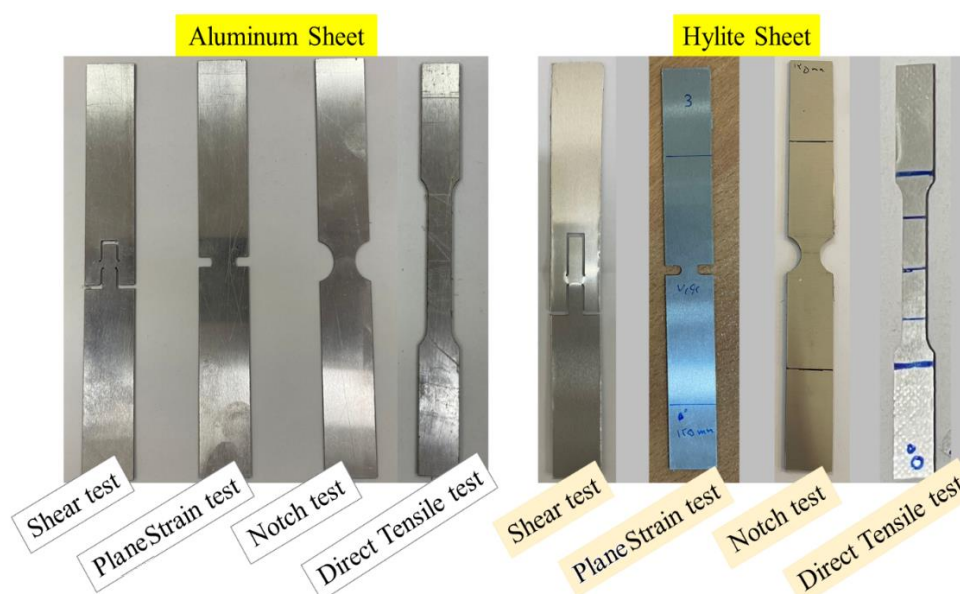
برای ارزیابی خواص مکانیکی ورق‌ها، چهار نوع آزمایش مکانیکی مختلف در این مطالعه در نظر گرفته شده است. ابعاد نمونه‌های هر چهار آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که آزمون کشش تک‌محوری مطابق با استاندارد ASTM E8/E8M انجام پذیرفت. برای سه آزمون دیگر، با توجه به فقدان استانداردهای مدون برای ورق‌های ساندویچی فوق‌نازک با هسته پلیمری، هندسه نمونه‌ها از پژوهش میرنیا و شمسانی [۲۷] اقتباس گردید. در آن مرجع، این هندسه‌ها از طریق شبیه‌سازی‌های اجزای محدود به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که حالت‌های تنش هدف (برش درون‌صفحه و کرنش صفحه‌ای) را با کمترین انحراف از شرایط ایده‌آل فراهم سازند.



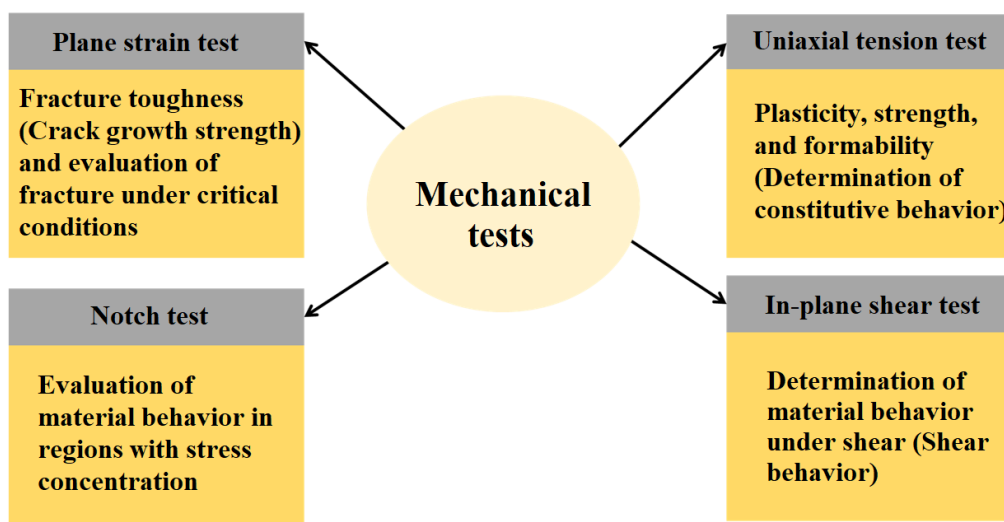
شکل ۱ ابعاد نمونه‌های آماده‌شده جهت آزمون‌های برش درون صفحه، کرنش صفحه‌ای، کشش شکاف‌دار و کشش تک‌محوری

این آزمایش‌ها، برای ورق‌های هایلایت و ورق تک لایه آلومینیوم بررسی گردید. تصاویر نمونه‌های برش داده شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده، بررسی رفتار مکانیکی با تست‌های مختلف بگونه‌ای طراحی شد که پاسخ رفتار ماده در حالت‌های تنشی اساساً متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. این موضوع از آن جهت حیاتی است که یک ماده می‌تواند بسته به نحوه اعمال بار، رفتار کاملاً متفاوتی از خود نشان دهد. تست کشش تک‌محوری که بر روی نمونه‌های استاندارد دوطرفه انجام گردید، به عنوان معیار و مبنا اصلی جهت بررسی خواص مهمی مانند مدول یانگ، استحکام تسلیم (σ_y)، مقاومت نهایی کشش و کرنش یکنواخت را فراهم کرد.

در مقابل، ورق هایلایت به دلیل ساختار کامپوزیتی خود پیچیدگی‌هایی را نشان می‌دهد. رفتار کشسانی اولیه عمدتاً تحت تأثیر پوشش‌های آلومینیومی است، در حالی که مراحل بعدی شامل تسلیم پلاستیک، کرنش سختی و شکست نهایی توسط پلاستیسیته هسته، یکپارچگی فصل مشترک بین پوشش و هسته و وقوع احتمالی کمانش پوشش یا برش هسته تعیین می‌شود که در نهایت نسبت استحکام به وزن کلی ورق را مشخص می‌کند.



شکل ۲ تصاویر نمونه‌های آماده‌شده جهت آزمون‌های برش درون صفحه، کرنش صفحه‌ای، کشش شکاف‌دار و کشش تک‌محوری

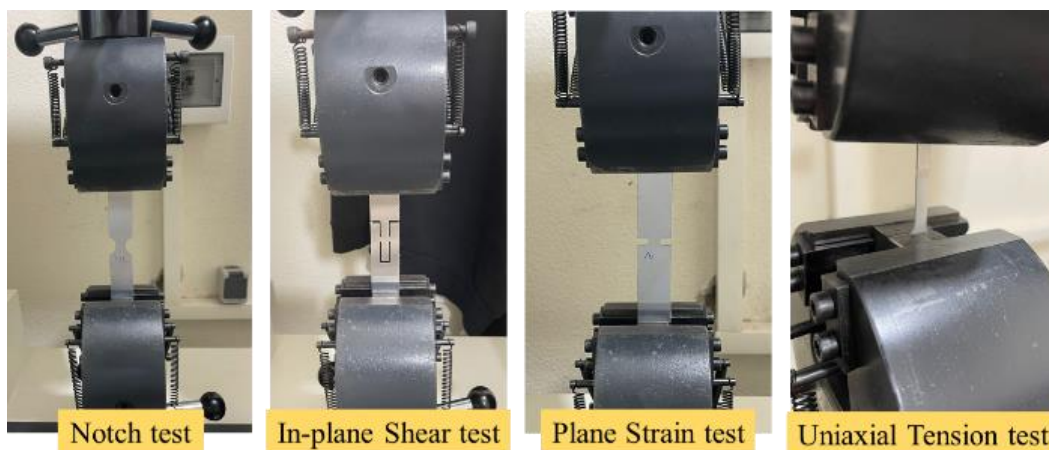


شکل ۳ اهداف کلی هر یک از تست‌های مکانیکی در نظر گرفته‌شده در این مطالعه

تست برش درون صفحه که معمولاً با استفاده از فیکسچر آرکان یا نمونه پروانه‌ای طراحی شده برای ایجاد تنش برش محض انجام می‌شود و برای ارزیابی رفتار هسته هایلایت حیاتی است. استحکام برشی و مدول برشی به طور مستقیم از این تست به دست می‌آیند که برای پیش‌بینی رفتار تحت بارهای خمشی و پیچشی ضروری هستند. در حالی که آلومینیوم از طریق لغزش بین صفحات خود در برابر برش تغییر شکل می‌دهد، پاسخ ورق هایلایت تحت تاثیر راستا و استحکام زنجیره‌های پلیمری هسته پلی‌پروپیلن و به طور مشخص، قابلیت چسب در انتقال تنش‌ها بین هسته و رویه‌ها بدون وقوع لایه‌لایه شدن، که یک حالت شکست بحرانی در پل‌های ساندویچی است، قرار دارد.

برای ارزیابی رفتار این مواد تحت شرایط محدودکننده‌ای که جریان پلاستیک را مهار می‌کنند، تست کشش کرنش صفحه از نمونه‌ای با عرض بسیار زیاد استفاده می‌کند تا شرایط تنشی ایجاد کند که در آن کرنش در جهت عرض عملاً صفر باقی بماند. حالت سه‌محوری بالای تنش در سطح تسلیم، تمایل به شکست ترد را تشدید می‌کند. برای آلومینیوم چکش‌خوار، این تست مقاومت آن در برابر شکست در قطعات صلب یا مقاطع ضخیم را ارزیابی می‌کند. برای ورق‌های هایلایت، این تست، یکپارچگی فصل مشترک بین رویه‌ها و هسته را آزموده و جدایش زودرس یا ترک‌خوردگی هسته که تحت تنش تک‌محوری رخ نمی‌دهد در این تست قابل ارزیابی است. در نهایت، تست کشش دارای شکاف که از نمونه‌ای با یک شکاف تیز و از پیش تعیین شده استفاده می‌کند، یک میدان تنش کششی سه‌محوره موضعی در ریشه شکاف ایجاد می‌کند که تمرکزدهنده‌های تنش مانند سوراخ‌ها یا ترک‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. این تست حساسیت ماده به شکاف و تحمل آسیب آن را ارزیابی می‌کند. آلومینیوم یکپارچه در این تست، اثر استحکام‌دهی ناشی از شکاف را نشان می‌دهد و کاهش چقرمگی موضعی از خود بروز می‌دهد. برای ورق هایلایت، این تست یک ارزیابی برای بررسی چقرمگی فصل مشترک محسوب می‌شود. تمرکز تنش می‌تواند یک ترک را مستقیماً به درون هسته آغاز کند یا، به طور بحرانی‌تر، باعث ایجاد شکست جدایشی در فصل مشترک بین هسته و پوشش شود که حساسیت کامپوزیت به آسیب موضعی را برجسته می‌سازد.

در مجموع، سعی گردید که با تعریف آزمایش‌های ذکر شده، تحلیل جامعی از رفتار مکانیکی ورق تک لایه و ورق هایلایت تحت حالت‌های مختلف تنشی بررسی گردد. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، تمامی تست‌های مکانیکی با استفاده از دستگاه انیورسال سنتام ۵۰kN با سرعت کشش ۱mm/min انجام شدند. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، دو تکرار برای هر نوع حالت آزمایش‌ها و ورق‌ها در نظر گرفته شد که با عناوین Al-1 و Al-2 برای ورق‌های آلومینیوم یکپارچه و Hyl-1 و Hyl-2 برای ورق‌های کامپوزیتی هایلایت نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است که به دلیل دسترسی محدود به ورق‌های تجاری هایلایت، انجام سه تکرار برای هر آزمون در این مطالعه میسر نگردید و نتایج بر اساس دو تکرار گزارش می‌شوند. بدیهی است این موضوع یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر محسوب شده و تعمیم‌پذیری آماری یافته‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و انجام آزمون‌ها با تعداد تکرار بالاتر در مطالعات آتی توصیه می‌شود.

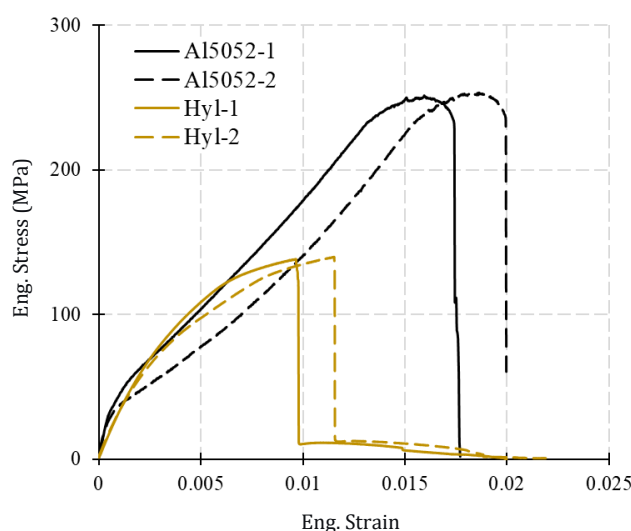


شکل ۴ تست‌های مکانیکی مختلف در نظر گرفته شده در این مطالعه

۳- نتایج

۳-۱- نتایج تست کشش شکاف‌دار^۱

شکل ۵ نتایج تست کشش دارای شکاف را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. به طور کلی، تا 0.2 mm کشیدگی (معادل با کرنش 0.005)، ورق آلومینیوم یکپارچه و ورق‌های کامپوزیتی هایلایت روند مشابهی داشتند. پس از آن، با اعمال نیرو، ملاحظه می‌شود که روند نمودارهای تنش-کرنش مهندسی متفاوت بوده است. حداکثر ظرفیت تحمل ورق‌های آلومینیوم یکپارچه به‌طور قابل توجهی بالاتر از ورق‌های هایلایت بود. ورق‌های هایلایت به ترتیب کاهش‌های 45% ، 49% درصدی، و 61% درصدی را در حداکثر ظرفیت، شیب اولیه و انرژی جذب شده در تست کشش شکاف‌دار (ناحیه زیر منحنی) در مقایسه با ورق‌های آلومینیوم یکپارچه نشان دادند. رفتار مشابه اولیه و کاهش متعاقب شیب نمودار را می‌توان با توالی‌های متفاوت آغاز آسیب در دو ماده توضیح داد. پاسخ خطی-کشسان اولیه (تا حدود کرنش 0.005) عمدتاً تحت تاثیر پوشش‌های آلومینیومی در ورق هایلایت است که مشابه ورق‌های آلومینیوم یکپارچه می‌باشد. با این حال، آلومینیوم یکپارچه که فلزی چکش‌خوار است، بلافاصله پس از این فاز کشسان شروع به تسلیم پلاستیک در ریشه شکاف کرده که منجر به کاهش محسوس در شیب منحنی در حین انتقال به تغییر شکل پلاستیک شده است. در ادامه، دیده شد که پلیمر درون ورق هایلایت، حالت پلاستیک خود را ادامه داده و با سطح تنش کمتری نسبت به آلومینیوم تغییر کرنش بیشتری داشته تا به شکست کامل منجر گردد.



شکل ۵ نتایج تست کشش دارای شکاف برای کل نمونه‌ها

¹ Notch Test

الگوهای شکست متمایز نمونه‌های دارای شکاف که در شکل ۶ نشان داده شده است. با ملاحظه این شکل دیده می‌شود که ورق‌های آلومینیومی یکپارچه، ترک خوردگی افقی کلاسیک در ریشه شکاف رخ داده است که نشان‌دهنده شکست شکل‌پذیر تحت تنش سه‌محوره است (شکل ۶-الف). این حالت شکست با مشخصه‌های محدودیت پلاستیک قابل توجه و همچنین رشد حفره‌ها در ناحیه با کرنش بالا همراه است که به جذب انرژی قابل توجهی نیاز داشته و سهم عمده‌ای در ظرفیت بالای بار ماکزیمم و انرژی ماده دارد. در مقابل و به طور کاملاً آشکارا، در ورق‌های هایلایت الگوهای ترک خوردگی مایل ۴۵ درجه مشاهده شد که به وضوح شکست غالب برشی را نشان می‌دهد (شکل ۶-ب). این زاویه با صفحات حداکثر تنش برشی نسبت به جهت بارگذاری مطابقت دارد. این الگو نشان می‌دهد که تمرکز تنش در ناحیه شکاف، یک شکست برشی درون هسته پلی‌پروپیلن را آغاز کرده، یا مهم‌تر از آن، یک جدایش ناشی از برش را در فصل مشترک بین پوشش‌های آلومینیومی و هسته ایجاد کرده است. چنین شکست برشی، بر استحکام کششی بالای پوشش‌ها غلبه کرده و از استحکام برشی نسبتاً پایین‌تر هر دو جزء هسته و فصل مشترک بهره برده است.



(ب)

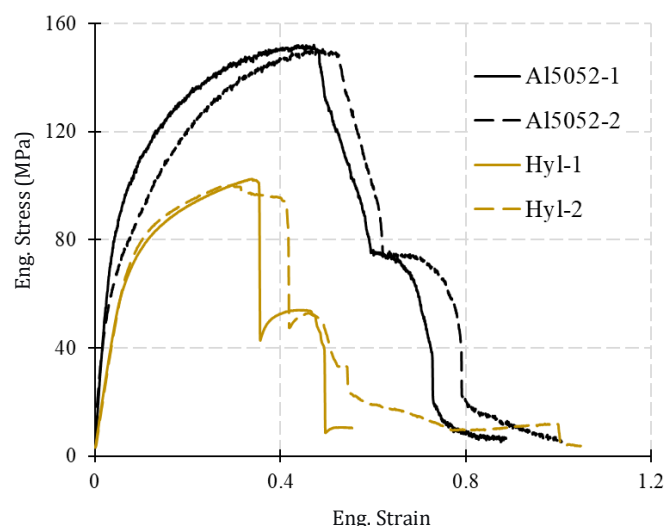
(الف)

شکل ۶ الگوهای شکست نمونه‌ها پس از تست کشش شکاف‌دار: (الف) ورق آلومینیوم؛ (ب) ورق هایلایت

۳-۲- نتایج تست برش درون صفحه

نتایج حاصل از تست برش درون صفحه برای تمامی نمونه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. به طور کلی، یافته‌های تجربی نشان می‌دهند که شیب اولیه نمونه‌های هایلایت و همچنین بیشینه نیروی برشی آن‌ها، پایین‌تر از ورق‌های آلومینیوم یکپارچه است. با این حال، این کاهش‌ها در مقایسه با نتایج تست کشش دارای شکاف (شکل ۵)، در تست برش (شکل ۷) به مراتب کم‌تر هستند. ورق‌های هایلایت در مقایسه با ورق‌های آلومینیوم یکپارچه، به ترتیب کاهش‌هایی در حدود ۱۹/۶٪، ۴۷/۱٪ و ۴۱/۸٪ را در بیشینه ظرفیت بار، شیب اولیه و انرژی جذب شده نشان دادند.

الگوهای شکست نمونه‌های برش در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند. با ملاحظه شکل ۸-الف دیده می‌شود که در طول تست برش، شکست ناشی از کاهش سطح مقطع در نواحی میانی برش ورق‌های آلومینیوم یکپارچه رخ داده است. در حالی که در ورق‌های هایلایت هیچ‌گونه کاهش سطح مقطعی مشاهده نشد و تنها شکست موضعی اصلی در نواحی فصل مشترک رخ داد (شکل ۸-ب). کاهش به مراتب کمتر در بیشینه ظرفیت بار (۱۹/۶٪ در مقایسه با ۳۳/۹۶٪ در تست شکاف) به این دلیل است که تست برش درون صفحه، بارگذاری را اعمال می‌کند که مستقیماً عملکرد اصلی هسته هایلایت، یعنی مقاومت در برابر برش را داشته است. اگرچه هسته پلی‌پروپیلن و پیوندهای چسبی در مقایسه با آلومینیوم یکپارچه نقاط آسیب‌پذیر هستند، اما به طور خاص برای تحمل این نوع تنش مهندسی شده‌اند که منجر به عملکردی بالاتر در مقایسه با تست شکاف که القاکننده شرایط سخت جدایش است، می‌شود.



شکل ۷ نتایج تست برش درون صفحه برای کل نمونه‌ها



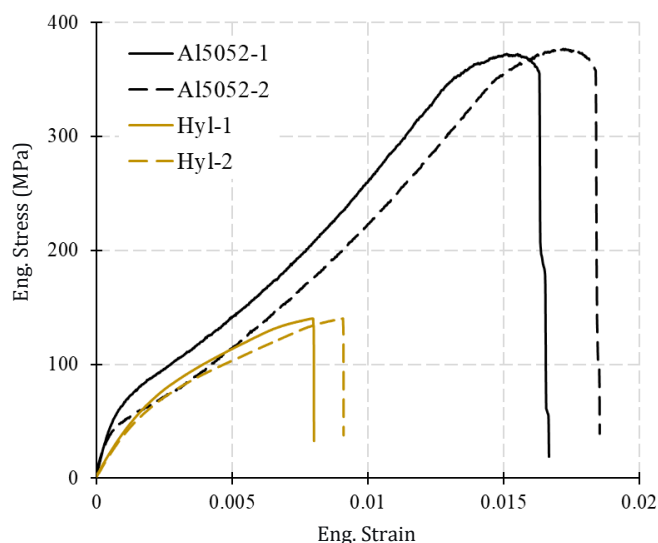
شکل ۸ الگوهای شکست نمونه‌ها پس از تست برش درون صفحه: الف) ورق آلومینیوم؛ ب) ورق هایلایت

افت محسوس در شیب اولیه (۴۷/۱٪) عمدتاً ناشی از تاثیر قابل توجه هسته پلی‌پروپیلن با مدول برشی پایین بر تغییر شکل کلی برشی ساختار ساندویچی است، برخلاف مدول برشی بالای آلیاژ آلومینیوم. کاهش سطح مقطع در آلومینیوم یکپارچه ناشی از ناپایداری پلاستیک تحت تنش برشی است که مقادیر قابل توجهی انرژی جذب می‌کند. در مقابل، شکست در ورق هایلایت در نواحی فصل مشترک رخ داده است که نشان‌دهنده یک شکست معمول برشی چسب یا هسته است. این جدایش موضعی یا ترک خوردگی هسته با تغییر شکل پلاستیک بسیار کمتری همراه است که دلیل کاهش ۴۱/۸٪ انرژی جذب شده محسوب می‌شود، زیرا این مکانیزم شکست، ظرفیت جذب انرژی پوشش‌های آلومینیومی را نشان می‌دهد.

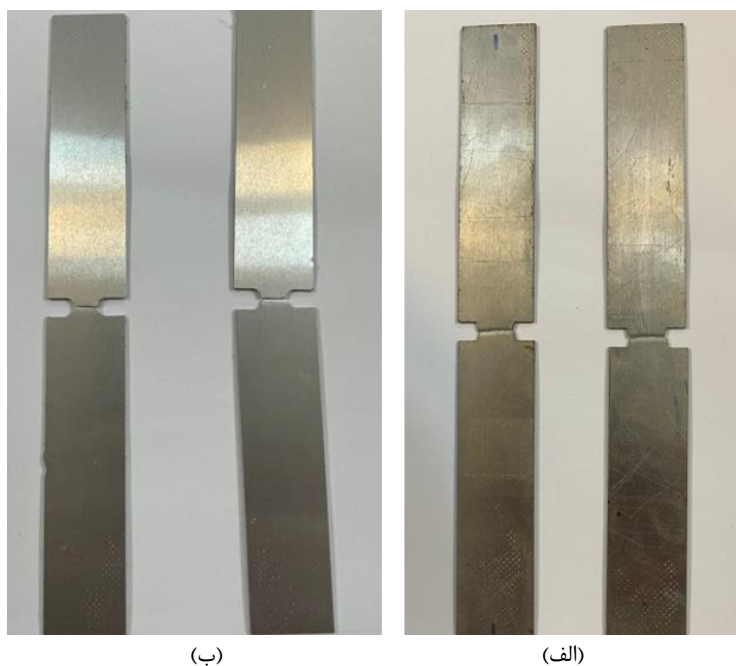
۳-۳- نتایج تست کرنش صفحه‌ای

نتایج حاصل از تست کرنش صفحه‌ای در شکل ۹ نشان داده شده است. نتیجه این آزمایش نشان داد که هر دو ورق آلومینیوم یکپارچه و ورق‌های کامپوزیتی هایلایت، تا کرنش ۰/۰۵ رفتار تقریباً مشابهی داشتند، در حالی که بیشینه ظرفیت بار، سختی اولیه و انرژی

جذب‌شده ورق‌های هایلایت به ترتیب ۵۵/۱٪، ۳۹/۷٪ و ۷۴/۸٪ کمتر از ورق‌های آلومینیوم یکپارچه بود. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، هیچ تفاوتی در الگوهای شکست نمونه‌ها مشاهده نشد و برای هر دو نمونه، مسیر شکست مشابهی شامل کاهش سطح مقطع افقی و ترک خوردگی رخ داده است.



شکل ۹ نتایج تست کرنش صفحه‌ای برای کل نمونه‌ها



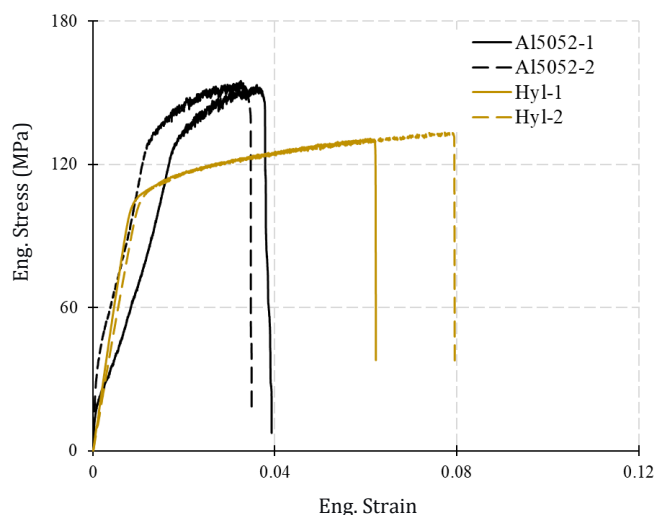
شکل ۱۰ الگوهای شکست نمونه‌ها پس از تست کرنش صفحه‌ای: (الف) ورق آلومینیوم؛ (ب) ورق هایلایت

رفتار مشابه اولیه را می‌توان به این موضوع نسبت داد که پاسخ کشسان و آغازین پلاستیک، عمدتاً تحت تاثیر لایه‌های آلومینیومی در ورق هایلایت قرار دارد که از ماده‌ای مشابه ورق یکپارچه تشکیل شده‌اند. با این حال، شرایط کرنش صفحه‌ای، انقباض جانبی را محدود کرده و تنش سه‌محوره بالایی را ایجاد کرده است. این موضوع، ضعف‌های کامپوزیت هایلایت را تحت این بارگذاری نشان می‌دهد. کاهش‌های قابل توجه در حداکثر ظرفیت بار (۵۵/۱٪) و انرژی جذب شده (۷۴/۸٪) که در بین تمامی تست‌ها قابل ملاحظه بوده است به این دلیل رخ داده که حالت کرنش صفحه‌ای نه تنها بر لایه‌های فلزی فشار وارد کرده، بلکه تنش‌های بالاتری ایجاد کرده که منجر به جدایش در فصل مشترک بین هسته و لایه‌ها شده است.

اگرچه الگوی شکست در هر دو ماده به صورت یک ترک افقی دیده می‌شود، اما علت اصلی در هایلایت، احتمالاً شکست شکل‌پذیر لایه‌ها است که توسط یک شکست داخلی در هسته یا جدایش در فصل مشترک ایجاد گردیده است. هسته که قادر به تحمل این شرایط سخت نیست، یا می‌شکند یا جدا می‌شود، که این امر منجر به از دست دادن اتصال توسط لایه رویی و شکست زودرس آن با تغییر شکل پلاستیک ناچیز شده است. کاهش ۷۴/۸٪ انرژی، حتی از تست کشش شکاف‌دار (۵۳/۶٪) نیز چشمگیرتر است که تایید می‌کند چقرمگی کمتری برای ورق هایلایت رخ داده است. علاوه بر این، در حالی که تست برش درون صفحه نشان داد که ورق هایلایت توانسته یک عملکرد خاص را ایفا کند و تست کرنش صفحه‌ای ضعف آن را تحت شرایط چندمحوری نشان داده است. بعلاوه، عملکرد ضعیف‌تر آن را در آزمون شکاف که حالت تنش سه‌محوره دارد توجیه می‌نماید. در مقابل، آلومینیوم یکپارچه به دلیل قابلیت یکنواخت کرنش سختی آن، حتی تحت شرایط محدودکننده، یکپارچگی ساختاری بهتری را حفظ کرده و منجر به عملکرد کلی مطلوب‌تری شده است.

۳-۴- نتایج تست کشش تک محوره

نتایج حاصل از تست کشش تک‌محوره برای تمامی نمونه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج این آزمون نشان داد که شیب اولیه ورق‌های هایلایت به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از ورق‌های آلومینیوم یکپارچه است، در حالی که ورق‌های هایلایت کاهش زودتر شیب در منحنی‌ها را تجربه کردند که در نهایت منجر به ظرفیت حداکثری به‌طور محسوس پایین‌تر در مقایسه با ورق‌های آلومینیوم یکپارچه شد. اگرچه ورق‌های هایلایت دارای ۲/۶٪ شیب اولیه بالاتر بودند، اما کاهش‌هایی در حدود ۳۹/۱٪ و ۵۷/۸٪ به‌ترتیب برای ظرفیت حداکثری و انرژی جذب‌شده در مقایسه با ورق‌های آلومینیوم یکپارچه مشاهده شد.



شکل ۱۱ نتایج تست کشش تک‌محوره برای کل نمونه‌ها

شیب اولیه بالاتر ورق هایلایت را می‌توان به ساختار کامپوزیتی آن نسبت داد، که در آن جداسازی دو پوشش سخت آلومینیومی توسط هسته، به‌طور قابل‌توجهی مقاومت کششی را افزایش داده است و این موضوع توانسته بر نتیجه کلی تست کشش تأثیر بگذارد. با این حال، این مزیت ساختاری کوتاه‌مدت بوده است. با ادامه روند در نمودار، کاهش محسوس در ظرفیت حداکثری ۳۹/۱٪ نشان می‌دهد که استحکام کلی در نهایت، به مقاومت تسلیم پایین‌تر هسته پلی‌پروپیلن و همچنین استحکام اتصالات چسبی بین هسته و پوسته‌ها منجر شده است. کاهش چشمگیر ۷۵/۸٪ در انرژی جذب‌شده که شدیدترین کاهش در بین تمامی آزمون‌های قبلی است، مستقیماً از مکانیزم شکست ناشی شده است. در مورد آلومینیوم یکپارچه (۱۲-الف)، تغییر شکل پلاستیک قابل‌توجه و کاهش سطح مشهودی در مرکز نمونه مشاهده شد، فرآیندی که مقدار قابل‌توجهی انرژی صرف آن شده است. در مقابل، کامپوزیت هایلایت در نقطه میانی خود بدون هیچ گونه کاهش سطح مقطع محسوسی در پوشش‌ها گسیخته شده است (۱۲-ب). این امر نشان‌دهنده یک شکست ترد است که احتمالاً توسط شکست یا برش هسته پلیمری آغاز شده و به دنبال آن، گسیختگی سریع و غیرشکل‌پذیر پوشش‌های آلومینیومی بدون

حمایت هسته پلیمری رخ داده است. شایان ذکر است که تعیین دقیق توالی مکانیزم‌های شکست (گسیختگی هسته در برابر جدایش بین‌لایه‌ای) و نقش هر یک به عنوان محرک اصلی، نیازمند مطالعات تکمیلی با استفاده از آزمون میکروسکوپی سطح مقطع شکست است که در چهارچوب پژوهش حاضر نمی‌گنجد. عدم وجود کاهش سطح مقطع پلاستیک که مکانیزم کلیدی جذب انرژی در فلزات است، دلیل جذب انرژی به شدت پایین ورق هایلایت تحت کشش تک‌محوره می‌باشد.



شکل ۱۲ الگوهای شکست نمونه‌ها پس از تست کشش تک‌محوره: الف) ورق آلومینیوم؛ ب) ورق هایلایت

۴- بحث

در این بخش، مقایسه‌ای بین عملکرد مکانیکی ورق‌های آلومینیوم یکپارچه و ورق‌های کامپوزیتی هایلایت انجام شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳-الف نشان داده شده است، در مورد نتایج حداکثر ظرفیت بار، ورق‌های هایلایت در تست‌های کرنش صفحه‌ای و شکاف، ظرفیت به مراتب پایین‌تری را در مقایسه با آلومینیوم یکپارچه نشان داده است، درحالی‌که برای تست کشش تک‌محوره کاهش کمی مشاهده شد. همچنین، ورق‌های هایلایت در تست برش درون‌صفحه، ظرفیت بار قابل مقایسه‌ای داشتند. دلیل عملکرد مشاهده‌شده در تعامل بین شرایط تنش و ساختار کامپوزیتی ورق هایلایت نهفته است. عملکرد مشابه در تست برش درون‌صفحه به این واقعیت نسبت داده می‌شود که این بار عمدتاً توسط هسته پلی‌پروپیلن جذب شده است. بنابراین اگرچه استحکام برشی هسته از آلومینیوم کمتر است، اما در مقایسه با سایر شرایط تنش، تأثیر کمتری متحمل شده است. کاهش جزیی عملکرد در تست کشش تک‌محوره نیز به این دلیل است که پوشش‌های آلومینیومی بخش عمده‌ای از تنش را تحمل کرده‌اند.

در مورد نتایج شیب اولیه نمودار، همان‌طور که در شکل ۱۳-ب نشان داده شده است، ورق‌های هایلایت در تمامی تست‌ها کاهش شیب مشابهی داشتند و تنها در تست کشش تک‌محوره عملکرد بهتری در مقایسه با آلومینیوم یکپارچه نشان داده‌اند. این الگو به طور ذاتی مرتبط با سناریوهای بارگذاری مختلف یک کامپوزیت ساندویچی است. شیب استثنایی هایلایت در تست کشش تک‌محوره، نمونه بارزی از اثر ساندویچی این ورق را نشان می‌دهد. با این حال، این مزیت ساختاری به شدت به نوع بار اعمال شده وابسته است. در طول تست برش درون‌صفحه، سختی برشی مشاهده شده عمدتاً تحت تأثیر مدول برشی پایین هسته پلی‌پروپیلن قرار دارد که منجر به کاهش محسوس شده است. به طور مشابه، در تست‌های شکاف و کرنش صفحه‌ای، تمرکز تنش بسیار موضعی و چندمحوری، در عملکرد ایده‌آل کامپوزیت اختلال ایجاد کرده است.

مقایسه بین نتایج انرژی جذب‌شده استخراج شده برای هر نوع تست در شکل ۱۳-ج نشان داده شده است. برای تمامی تست‌ها، ورق‌های هایلایت انرژی جذب شده کمتری (ناحیه زیر منحنی) داشتند. این کاهش برای تست‌های کشش تک‌محوره و کرنش

صفحه‌ای قابل توجه بود. با این وجود، در تست برش، هر دو نمونه مقادیر انرژی جذب‌شده قابل مقایسه‌ای داشتند. کاهش چشمگیر در جذب انرژی مشاهده شده در طول تست‌های کشش تک‌محوره و کرنش صفحه‌ای، یک ضعف بحرانی در ساختار هایلایت را نشان می‌دهد و ظرفیت این ورق را برای تغییر شکل پلاستیک در مقیاس بزرگ محدود می‌کند. در مقابل، آلومینیوم یکپارچه از طریق جریان پلاستیک گسترده، کاهش سطح مقطع و شکست شکل‌پذیر در حجم بزرگی از ماده را داشته و انرژی جذب کرده است. این رویکرد مشابه در ورق هایلایت محدود شده است. هسته پلیمری تمایل به شکست به صورت ترد داشته یا به طور زودرس از پوشش‌ها جدا شده است که این امر منجر به شکست پوشش‌های آلومینیومی با شکل‌پذیری کم و بدون کاهش سطح مقطع محسوس بوده است. این امر منجر به کاهش شدید در ناحیه زیر منحنی شده است. در مقابل، جذب انرژی مشابه در طول تست برش، به عنوان یک پارامتر کلیدی تأثیرگذار بوده است. این امر نشان می‌دهد که تحت بارگذاری برشی محض، حالت‌های شکست هر دو ماده، شباهت بیشتری از نظر اتلاف انرژی از خود نشان داده‌اند. آلومینیوم یکپارچه، تغییر شکل و شکست را در یک نوار برشی تجربه کرده و نشان داده که اگرچه ورق شکل‌پذیر بوده، اما تغییر شکل آن در یک ناحیه باریک متمرکز شده و در نتیجه جذب انرژی کلی را محدود شده است.

به منظور مقایسه نتایج مقاله حاضر با کار دیگر محققان قبلی، این نتایج با مرجع [۲۷] که توسط میرنیا و شمساری انجام شده بود مقایسه گردید و نتایج مقایسه آن در شکل‌های شکل ۱۴ و شکل ۱۵ نشان داده شده است.

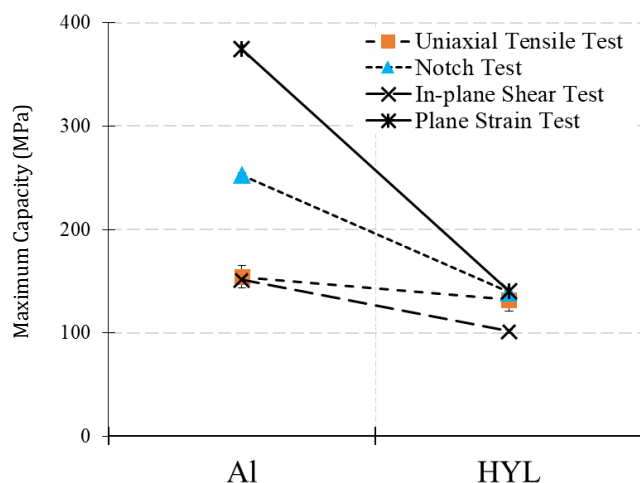
لازم به ذکر است که نتایج پژوهش میرنیا و شمساری [۲۷] به صورت منحنی‌های نیرو-جابجایی گزارش شده‌اند و امکان تبدیل دقیق آن‌ها به تنش-کرنش یا نرمال‌سازی با ضخامت، به دلیل عدم دسترسی به کلیه پارامترهای ابعادی نمونه‌ها، میسر نبوده است. از این رو، مقایسه حاضر بر اساس همان داده‌های اولیه و در قالب نیرو-جابجایی صورت پذیرفته است. همچنین شایان یادآوری است که انتخاب ضخامت‌های مورد بررسی در این پژوهش (۱ mm برای ورق یکپارچه و ۱/۲ mm برای هایلایت) بر مبنای محصولات تجاری واقعی و متداول در کاربردهای صنعتی سبک‌وزن انجام شده و ارائه مقادیر مطلق، با هدف فراهم آوردن یک تصویر کاربردی برای فرآیند انتخاب مواد مهندسی بوده است. بدیهی است که برای مقایسه علمی دقیق‌تر، مطالعات آتی می‌بایست از نمونه‌هایی با ضخامت یکسان یا نرمال‌سازی کامل داده‌ها بهره ببرند. شایان ذکر است که AA6061-T6 یک آلیاژ آلومینیوم عملیات حرارتی‌پذیر با استحکام بالاتر نسبت به AA5052 بوده و بنابراین، این مقایسه نه به معنای رقابت هم‌ارز، بلکه با هدف ترسیم یک تصویر کلی از جایگاه ورق هایلایت در میان مواد مهندسی متداول انجام شده است. بدیهی است که تفسیر نتایج این بخش باید با در نظر گرفتن تفاوت‌های ذاتی دو آلیاژ صورت پذیرد.

در مورد تست کشش شکاف‌دار، تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که ورق‌های هایلایت دارای حداکثر ظرفیت بار به طور قابل توجهی پایین‌تر هستند، در حالی که انرژی جذب‌شده قابل مقایسه و حتی بیشتر برای ورق هایلایت در مقایسه با ورق AA6061-T6 به دست آمده است (شکل ۱۴-الف و ۱۵-الف). در مورد برش درون صفحه، انحراف بین حداکثر ظرفیت بار ورق‌های هایلایت و ورق AA6061-T6 کاهش یافته است. با این حال، هر دو شاخص حداکثر ظرفیت بار و انرژی جذب‌شده ورق AA6061-T6 بالاتر از ورق‌های هایلایت است (شکل ۱۴-ب و ۱۵-ب).

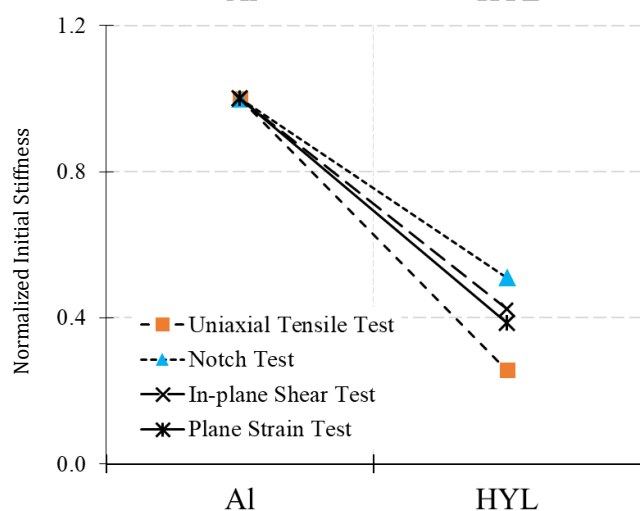
به طور مشابه، مطابق شکل‌های ۱۴-ج یا ۱۵-ج، نتایج کرنش صفحه‌ای نشان می‌دهد که حداکثر ظرفیت بار ورق AA6061-T6 بالاتر از هایلایت است، در حالی که تفاوت کمتری برای انرژی جذب‌شده را می‌توان مشاهده کرد. ظرفیت حداکثری پایین‌تر ورق هایلایت در تمامی ارزیابی‌ها، مستقیماً ناشی از ساختار کامپوزیتی آن است. اگرچه ضخامت کلی ورق هایلایت ۱/۲ mm کمی بیشتر از ورق AA6061-T6 با ضخامت ۱ mm است، اما هسته آن از پلی‌پروپیلن با استحکام پایین ساخته شده است. در نتیجه، ظرفیت نهایی تحمل بار نه توسط ضخامت کلی، بلکه توسط استحکام هسته پلیمری و اتصالات چسبی تعیین شده است و این آزمون نشان داده که پیش از آنکه پوشش‌های آلومینیومی بتوانند از استحکام کششی کامل خود استفاده کنند، گسیخته شده است.

این موضوع به‌ویژه در تست‌های شکاف و کرنش صفحه‌ای نیز مشهود است، جایی که تمرکز تنش و محدودیت‌ها، از این نقاط ضعف داخلی بهره می‌برند. در مقابل، عملکرد قابل توجه در جذب انرژی، که در آن ورق هایلایت گاهی نتایج قابل مقایسه یا تغییرات کمتری نشان می‌دهد، ویژگی متفاوتی از عملکرد آن را برجسته می‌سازد. علیرغم استحکام پایین‌تر، ساختار ساندویچی می‌تواند از طریق مکانیزم‌های شکست مختلفی مانند خردشدگی هسته، تغییر شکل پلاستیک پوشش‌های نازک و جدایش تدریجی، انرژی جذب کند. در مورد تست کشش شکاف‌دار، اگرچه این مکانیزم‌ها منجر به نیروی اوج پایین‌تر شده است، اما توانسته به یک ناحیه فرآیند شکست

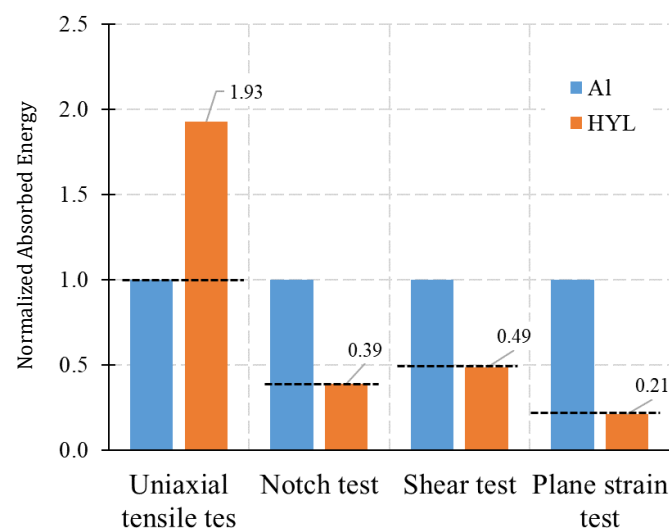
وسیع‌تر منجر شده و انرژی جذب شده مشابهی با آلیاژ AA6061-T6 ایجاد کنند. به طور مشابه، تغییرات کاهش یافته در انرژی جذب شده مشاهده شده در طول تست کرنش صفحه‌ای، حاکی از آن است که شکست کامپوزیتی هایلایت، اگرچه زودرس است، اما تردشدگی قابل ملاحظه مشابه آلیاژ آلومینیوم با استحکام بالا تحت شرایط محدودیت شدید را نشان نمی‌دهد. در نهایت، این مقایسه نشان می‌دهد که ورق هایلایت بررسی شده در این پژوهش، دارای نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی قابل قبولی بوده اما برای استحکام بالا به نسبت فلزات یکپارچه طراحی نشده است.



(الف)

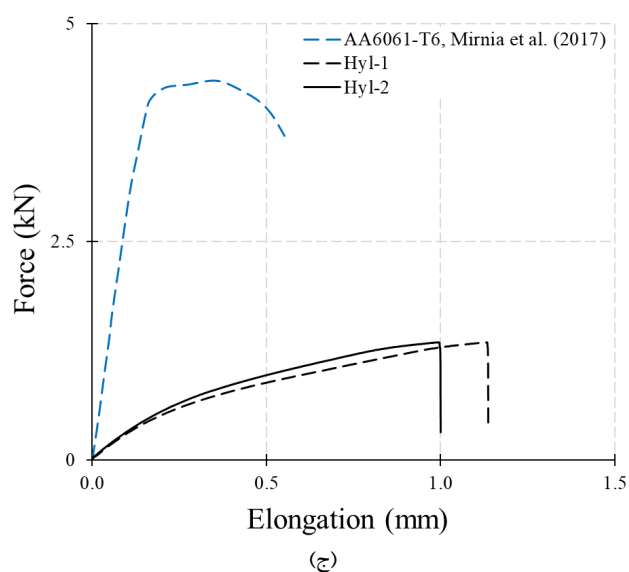
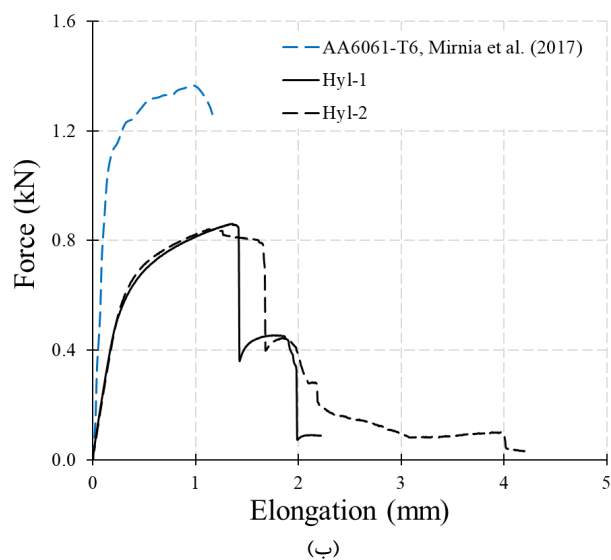
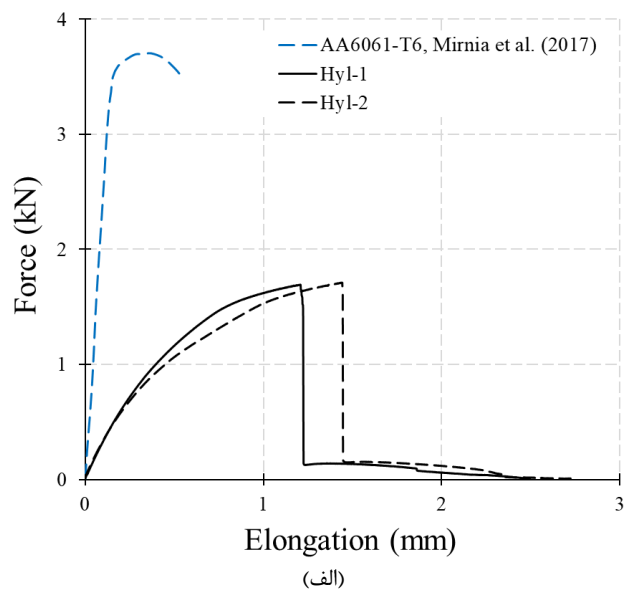


(ب)

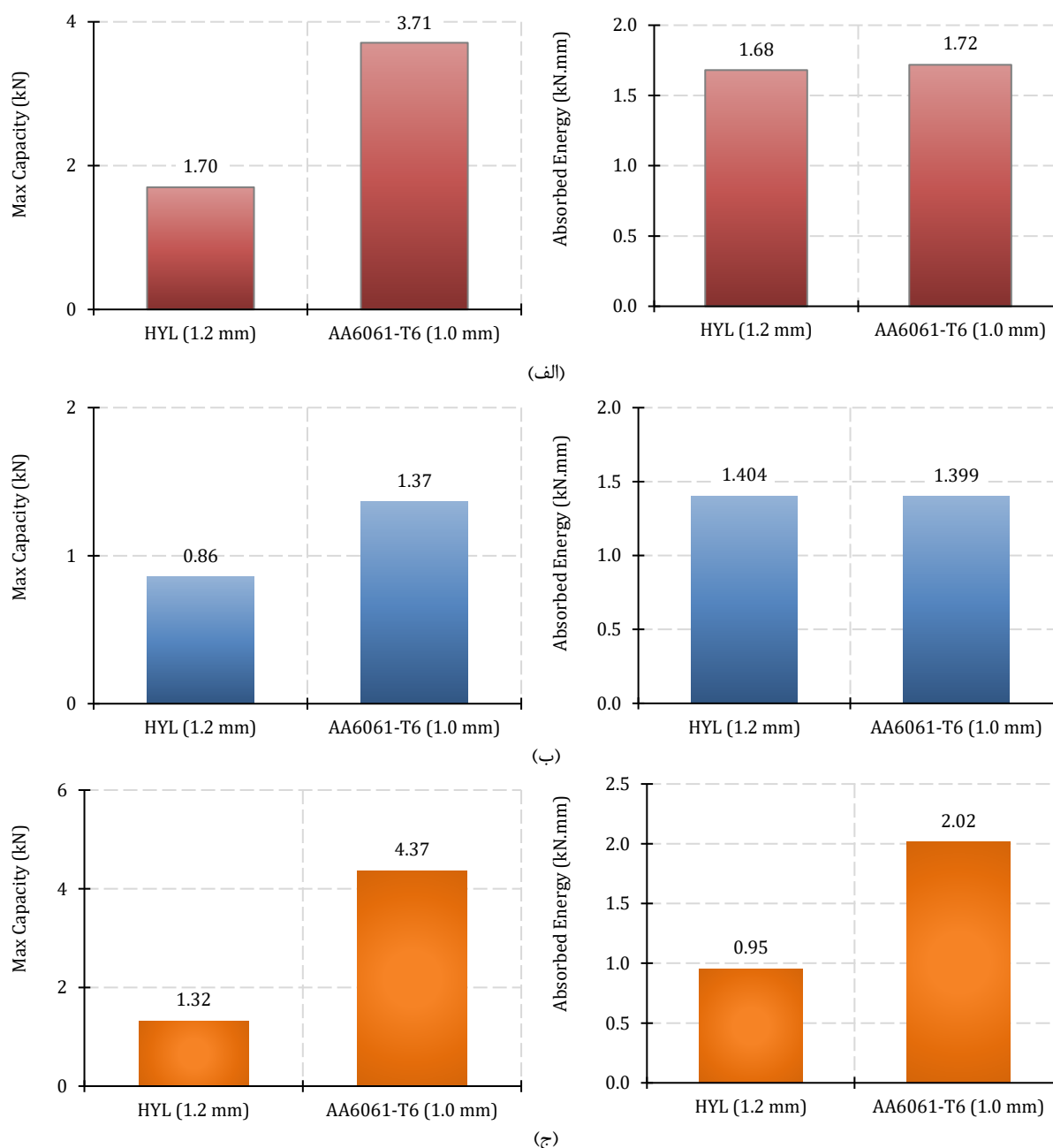


(ج)

شکل ۱۳ مقایسه نتایج مکانیکی: (الف) حداکثر ظرفیت بار؛ (ب) سفتی اولیه نرمالیزه شده؛ (ج) انرژی جذب شده نرمالیزه شده



شکل ۱۴ نمودار ظرفیت کششی ورق‌های هایلایت آزمایش شده در این مطالعه با ورق‌های AA6061-T6 آزمایش شده توسط میرنیا و همکاران (۲۰۱۷) برای تست‌های مختلف: الف) تست کشش شکاف‌دار؛ ب) برش درون صفحه؛ ج) کرنش صفحه‌ای



شکل ۱۵ مقایسه نتایج خواص مکانیکی ورق‌های هایلایت آزمایش شده در این مطالعه با ورق‌های AA6061-T6 آزمایش شده توسط میرنیا و همکاران (۲۰۱۷) برای تست‌های مختلف: الف) تست کشش شکاف‌دار؛ ب) برش درون صفحه؛ ج) کرنش صفحه‌ای

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش، یک بررسی تجربی سیستماتیک در مورد ویژگی‌های مکانیکی ورق‌های ساندویچی هایلایت با ضخامت کل ۱/۲ mm تحت شرایط تنش مختلف ارائه کرده و آن‌ها را با آلومینیوم یکپارچه به ضخامت ۱ mm مقایسه نموده است. ورق‌های کامپوزیتی هایلایت دارای لایه‌های رویه‌ای به ضخامت ۰/۲ mm و لایه هسته به ضخامت ۰/۸ mm بودند. تست‌های مکانیکی مختلف مرتبط با حالت‌های تنشی گوناگون در این مطالعه در نظر گرفته شد. بر اساس یافته‌های تجربی، نتایج کلی این مقاله بصورت زیر جمع‌بندی شده است:

- کامپوزیت هایلایت بهترین عملکرد خود را در طول تست برش درون صفحه نشان داد و تنها کاهش جزئی در ظرفیت حداکثر ۱۹/۶٪ و جذب انرژی مشابه با آلومینیوم یکپارچه از خود بروز داد. این موضوع تایید می‌کند که هدف طراحی اصلی هسته پلی‌پروپیلن برای مقاومت در برابر نیروهای برشی بین لایه‌های رویه، موثر است.

- بارزترین محدودیت‌های ورق هایلایت تحت شرایط تنش چندمحوری آشکار شد. آزمایش‌های کرنش صفحه‌ای و شکاف منجر به کاهش‌های شدید در ظرفیت باربری تا ۵۵/۱٪ و جذب انرژی تا ۷۴/۸٪ شدند. این امر به دلیل آسیب‌پذیری هسته و فصل مشترک هسته-لایه رویه در برابر شکست تحت کشش و محدودیت‌های سه‌محوره است که باعث جدایش زودرس و شکست‌های ترد گردیده است.
 - تحلیل شکست به وضوح نشان داد که آلومینیوم یکپارچه از طریق کاهش سطح مقطع و حالت شکل‌پذیر گسیخته شده است و در نتیجه مقدار قابل توجهی انرژی جذب کرده است. در مقابل، ورق هایلایت به طور مداوم از طریق ترک‌خوردگی زاویه ۴۵ درجه ناشی از برش و جدایش در فصل مشترک دچار شکست شده که دلیل آن، تحمل آسیب به مراتب پایین‌تر علیرغم نسبت مطلوب سختی به وزن است.
 - یافته‌های این پژوهش به وضوح محدودیت‌های کاربرد ورق‌های هایلایت را در بارگذاری‌های مختلف نشان داده است. آن‌ها یک جایگزین عالی برای سبک‌سازی پل‌های تحت بارگذاری‌های مختلف هستند. با این حال، استفاده از آن‌ها در قطعات دارای شکاف‌های تیز، سوراخ‌ها یا سایر تمرکزدهنده‌های تنش، بدون اعمال تغییرات طراحی قابل توجه برای تقویت فصل مشترک و کنترل سه‌محوری تنش، توصیه نمی‌شود.
- لازم به ذکر است که استخراج مستقیم ثوابت مکانیکی مستقل نظیر مدول یانگ، استحکام تسلیم، استحکام نهایی کشش، درصد ازدیاد طول، چقرمگی شکست و همچنین مدول و استحکام برشی برای ورق هایلایت، در مطالعه حاضر به دلیل محدودیت‌های تجربی و تمرکز بر تحلیل تطبیقی منحنی‌های کامل انجام نپذیرفت. از این رو، به کارگیری سامانه‌های نوری دقیق نظیر پردازش تصویر دیجیتال (DIC) جهت اندازه‌گیری میدان‌های کرنش موضعی و استخراج این مشخصات، به‌عنوان یکی از اولویت‌های تحقیقاتی آتی می‌باشد. همچنین تعیین پنجره کاری امن و محدوده بارگذاری مجاز برای ورق‌های هایلایت، مستلزم به‌کارگیری داده‌های تجربی حاضر در قالب مدل‌های عددی و معیارهای شکست است که به‌عنوان گام بعدی این پژوهش در دست پیگیری می‌باشد.

تقدیر و تشکر

محققین مطالعه حاضر کمال تشکر و قدردانی را از زحمات اساتید دانشکده مهندسی مکانیک، به ویژه آزمایشگاه شکل‌دهی فلزات دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل دارند.

References

- [1] Askarian Khoob A, Ramezani MJ, Mousavi SS. Low-Velocity impact resistance of glass laminate aluminium reinforced epoxy (GLARE) composite. *Recent Progress in Materials*. 2023 May;5(2):1-26. doi: 10.21926/rpm.2302021
- [2] Harhash M, Sokolova O, Carradó A, Palkowski H. Mechanical properties and forming behaviour of laminated steel/polymer sandwich systems with local inlays-Part 1. *Composite Structures*. 2014 Dec 1;118:112-20. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.07.011
- [3] Chandel R, Sharma N, Bansal SA. A review on recent developments of aluminum-based hybrid composites for automotive applications. *Emergent Materials*. 2021 Oct;4(5):1243-57. doi: 10.1007/s42247-021-00186-6
- [4] Palomba G, Epasto G, Crupi V. Lightweight sandwich structures for marine applications: a review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022 Oct 26;29(26):4839-64. doi: 10.1080/15376494.2021.1941448
- [5] Harms V, Harhash M, Carrado A, Palkowski H. Energy Absorption Behavior of Metal/Polymer/Metal Sandwich Crash Structures. *Key Engineering Materials*. 2017 Aug 17;746:275-81. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.275
- [6] Christke S, Gibson AG, Grigoriou K, Mouritz AP. Multi-layer polymer metal laminates for the fire protection of lightweight structures. *Materials & Design*. 2016 May 5;97:349-56. doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.105
- [7] Naik RK, Das AK, Mahale PR, Panda SK, Racherla V. Design optimization of high interface strength metal-polymer-metal sandwich panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2023 Aug 1;171:107544. doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107544
- [8] Carradó A, Ravindra NM. Metal/Polymer/Metal Sandwich Systems: An Overview: Carradó and Ravindra. *JOM*. 2023 Dec;75(12):5126-40. doi: 10.1007/s11837-023-06207-5

- [9] Forcellese A, Simoncini M. Mechanical properties and formability of metal-polymer-metal sandwich composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Apr;107(7):3333-49. doi: 10.1007/s00170-020-05245-6
- [10] Hufenbach W, Jaschinski J, Weber T, Weck D. Numerical and experimental investigations on HYLITE sandwich sheets as an alternative sheet metal. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2008 Jun;8(2):67-80. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60194-0
- [11] Jackson KP, Allwood JM, Landert M. Incremental forming of sandwich panels. *Journal of materials processing technology*. 2008 Aug 11;204(1-3):290-303. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.117
- [12] Carradò A, Faerber J, Niemeyer S, Ziegmann G, Palkowski H. Metal/polymer/metal hybrid systems: Towards potential formability applications. *Composite Structures*. 2011 Jan 1;93(2):715-21. doi: 10.1016/j.compstruct.2010.07.016
- [13] Santiago R, Cantwell W, Alves M. Impact on thermoplastic fibre-metal laminates: Experimental observations. *Composite structures*. 2017 Jan 1;159:800-17. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.10.011
- [14] Khardin M, Harhash M, Chernikov D, Glushchenkov V, Palkowski H. Preliminary studies on electromagnetic forming of aluminum/polymer/aluminum sandwich sheets. *Composite Structures*. 2020 Nov 15;252:112729. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112729
- [15] Harhash M, Kuhtz M, Richter J, Hornig A, Gude M, Palkowski H. Influence of adhesion properties on the crash behavior of steel/polymer/steel sandwich crashboxes: An experimental study. *Metals*. 2021 Sep 4;11(9):1400. doi: 10.3390/met11091400
- [16] Khani S, Harhash M, Palkowski H, Buhl J. Incremental Sheet Forming on Tailored Hybrid Steel/Polymer/Steel Sandwich Materials; Formability and Residual Stress Investigation: Khani, Harhash, Palkowski, and Buhl. *JOM*. 2025 Oct;77(10):7505-18. doi: 10.1007/s11837-025-07486-w
- [17] Beyranvand R, Ansari M, Deilami Azodi H, Jafari MM. Effect of drilling parameters on fiber delamination, surface quality, and drilling force in curved luminum/Glass/Polypropylene composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Sep 23;12(7):81-95. doi: 10.22034/ijme.2025.543487.2126 [In Persian]
- [18] Vahidi H, Gerami A, Ahmadi H, Liaghat, GH. Behavior of sandwich panels with expanded cork agglomerate cores under quasi-Static indentation and three-point bending. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 June 1;12(4):16-27. doi: 10.22034/ijme.2025.507790.2050 [In Persian]
- [19] Nassiri A, Atrian A. Investigation of the energy absorption in three-layer Al/Polypropylene/Steel deep drawn cups. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Aug 22;7(6):34-43. [In Persian]
- [20] Askari M, Javadi M, Eslami Farsani R, Geranmayeh A. The assessment of energy absorption capability of aluminum/epoxy-glass fibers laminates after exposre to the thermal cycling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 May;9(2):30-40. doi: 10.22034/ijme.2022.157560 [In Persian]
- [21] Rezayat HR, Toozandehjani H, Zakeri A. Investigating the energy absorption of sandwich panel with aluminum core and skin under Quasi-static loading: A numerical and experimental study. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 March;11(1):61-75. doi: 10.22034/ijme.2024.434159.1900 [In Persian]
- [22] Zal V, Talebi-Ghadikolaee H, Mirzamohammadi S. Investigating the effect of polyurethane foam filling on the energy absorption of hybrid tubes with different thickness of composite layer. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 April;11(2):58-68. doi: 10.22034/ijme.2024.433178.1893 [In Persian]
- [23] Naderli R, Soltanpour M, Asadi P. Experimental investigation of the joinability of three-layer aluminum/polymer/ aluminum composite sheets by the clinching process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 June;8(4):27-38. [In Persian]
- [24] Abdollahi Azghan M, Asghari Arpatappeh F, Eslami-Farsani R. Experimental study of the effect of cryogenic cycling and metal surface treatment on flexural properties of aluminum-epoxy/basalt fibers laminate composite. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2017 Sep 22;4(1):15-24. [In Persian]
- [25] Moridi K, Mirnia MJ, Elyasi M. Experimental investigation of AA6061 sheet metal deformation strategy for flange edge forming using single point incremental forming process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 August;11(6):66-77. doi: 10.22034/ijme.2024.465287.1979 [In Persian]
- [26] 3A Composites. Hylite – Aluminium Composite Sheets. 3A Composites; 2024 [cited 2024 Jul]. Available from: <https://www.3acomposites.com/en/products/hylite/>
- [27] Mirnia MJ, Shamsari M. Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Jun 1;244:17-43. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029