



بررسی تجربی و عددی تأثیر ورق آلومینیوم 2024 و کامپوزیت الیاف شیشه بر روی قطعات PLA لانه زنبوری ساخته شده با پرینتر سه بعدی تحت ضربه سرعت پایین

سید مرتضی رضوی^{1*}، علی خشنودراد²، احمد صمدی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

3- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

* تهران، صندوق پستی 14619-68151، m.razavi@usc.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان

نمونه PLA،

کامپوزیت،

ضربه سرعت پایین،

انرژی جذب شده،

جابجایی نمونه،

لایه گذاری دستی

در این پژوهش، رفتار دینامیکی سازه های ساندویچی با هسته لانه زنبوری پلی لاکتیک اسید PLA ساخته شده به روش پرینت سه بعدی و پوسته های تقویت کننده ناهمگن، تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین ارزیابی شد. نوآوری اصلی تحقیق، تحلیل تقابل ساختاری و مقایسه عملکرد دینامیکی هسته پلیمری با دو رویه متمایز شامل ورق آلومینیوم 2024 با رفتار الاستوپلاستیک و کامپوزیت الیاف شیشه اپوکسی دوجبه با رفتار الاستیک-ترد در سطوح انرژی 10، 21 و 30 ژول است. جهت ارزیابی کارایی مستقل از وزن سازه ها، شاخص انرژی جذب شده ویژه معرفی گردید و نمودارهای پاسخ دینامیکی و مکانیزم های شکست نمونه ها PLA/AL، PLA/Glass و PLA مقایسه شدند. علاوه بر فرآیند تجربی، یک مدل اجزاء محدود سه بعدی با اعمال معیارهای آسیب پیشرونده توسعه یافت. مدل عددی توانست منحنی های نیرو-جابجایی و ظرفیت جذب انرژی را با خطای کمتر از 10% نسبت به مستندات آزمایشگاهی پیش بینی و اعتبارسنجی کند. در نهایت، یک مطالعه پارامتریک جهت ارزیابی اثر ضخامت پوسته های تقویت کننده بر ظرفیت جذب انرژی سازه صورت پذیرفت. همچنین، تحلیل روند به کمک رگرسیون ریاضی نشان داد که نرخ جذب انرژی در نمونه های با رویه آلومینیومی الگویی غیرخطی و اشباع شونده دارد، در حالی که نمونه های تقویت شده با الیاف شیشه، رفتاری کاملاً خطی و پایدار در بازه انرژی های آزمایش شده ارائه می دهند.

Experimental and numerical investigation of the effect of 2024 aluminum sheet and glass fiber composite on the low-velocity impact behavior of 3D-printed PLA honeycomb structures

Seyed Morteza Razavi^{1*}, Ali Khoshnoudrad¹, Ahmad Samadi¹

1- Department of Mechanical Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14619-68151, Tehran, Iran, m.razavi@usc.ac.ir

Keywords

PLA specimen,
Composite,
Low-velocity impact,
Energy absorption,
Specimen displacement,
Hand lay-up

Abstract

In this research, the dynamic behavior of sandwich structures with 3D-printed polylactic acid (PLA) honeycomb cores and heterogeneous reinforcing skins was evaluated under low-velocity impact loading. The primary novelty of this study lies in the structural interaction analysis and dynamic performance comparison of the polymeric core with two distinct skins: 2024 aluminum alloy (elasto-plastic behavior) and bidirectional glass fiber/epoxy composite (elastic-brittle behavior) at energy levels of 10, 21, and 30 Joules. To assess weight-independent efficiency, the Specific Energy Absorption (SEA) index was introduced, and the dynamic response curves and failure mechanisms of the PLA, PLA/AL, and PLA/Glass specimens were compared. In addition to the experimental process, a 3D finite element model (3D-FEA) was developed using advanced progressive damage criteria. The numerical model successfully predicted and validated the force-displacement curves and energy absorption capacity with an error of less than 10% compared to experimental data. Finally, a parametric study was conducted to evaluate the effect of reinforcement skin thickness on the energy absorption capacity. Furthermore, mathematical trend analysis using regression revealed that the energy absorption rate in specimens with aluminum face sheets follows a non-linear, saturating pattern, whereas the glass-fiber reinforced structures exhibit a strictly linear and stable efficiency within the tested energy range.

1- مقدمه

چندلایه‌های فلز-کامپوزیت¹ به دلیل تلفیق هم‌زمان چقرمگی فلزات با استحکام ویژه بالای مواد کامپوزیتی، جایگاه ویژه‌ای در صنایع جاذب انرژی یافته‌اند. [1] از سوی دیگر، تولید ساختارهای سلولی سبک‌وزن مانند هسته‌های لانه‌زنبوری به کمک پرینت سه‌بعدی، انعطاف‌پذیری هندسی بالایی ایجاد کرده است؛ به طوری که حتی تغییر در تقارن شبکه‌های لانه‌زنبوری می‌تواند به طور پیشرفته‌ای چقرمگی شکست سازه را تغییر دهد [2]. ترکیب این دو فناوری، یعنی استفاده از پوسته‌های تقویت‌کننده کامپوزیتی روی هسته‌های مشبک پرینت‌شده، راهبردی نوین برای دستیابی به سازه‌های ساندویچی فوق‌سبک تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین است [3].

رفتار دینامیکی و خواص ویسکوالاستیک این سازه‌های ساندویچی تحت بارگذاری‌های ضربه‌ای و نفوذ شبه‌استاتیک موضوع تحقیقات متعددی بوده است [4, 5]. نور آنین و همکاران [6] نشان دادند که هسته‌های لانه‌زنبوری پرینت‌شده با PLA پتانسیل بالایی در جذب انرژی دارند. صدیقی و همکاران [7] نیز نشان داده‌اند که تغییر جنس لایه‌های فلزی و کامپوزیتی نقشی تعیین‌کننده در تغییر مکانیزم‌های شکست دارد. با این حال، یک خلأ پژوهشی اساسی در درک رفتار متقابل هسته‌های مشبک با پوسته‌های ناهمگن وجود دارد. مسئله اصلی این است که وقتی یک هسته لانه‌زنبوری PLA با دو پوسته کاملاً متفاوت، یکی از جنس ورق فلزی آلومینیوم 2024 با رفتار الاستوپلاستیک و دیگری از جنس کامپوزیت الیاف شیشه با رفتار الاستیک ترد پوشانده می‌شود، مقایسه عملکرد آن‌ها تنها بر اساس ابعاد هندسی یکسان، به دلیل تفاوت بنیادین در جرم و مکانیزم‌های جذب انرژی، از اعتبار علمی کافی برخوردار نیست.

بر این اساس، سؤال اصلی این پژوهش به این صورت تعریف می‌شود که پوسته‌های تقویت‌کننده آلومینیومی و کامپوزیت الیاف شیشه، چگونه مکانیزم‌های شکست دینامیکی را در هسته دگرگون می‌کنند و به چه روشی کارایی آن‌ها بر اساس شاخص‌های نرمال‌شده جرمی، انرژی جذب‌شده ویژه ارزیابی می‌شود؟ هدف از این پژوهش، ارزیابی تجربی رفتار ضربه سرعت پایین سه ساختار متمایز شامل PLA خالص، PLA/AL و PLA/Glass در سطوح انرژی 10، 21 و 30 ژول است.

در این پژوهش، به بررسی تجربی و عددی اثر حضور پوسته‌های ناهمگن (ورق آلومینیوم 2024 و کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی) بر روی رفتار ضربه سرعت پایین هسته‌های PLA لانه‌زنبوری پرینت شده پرداخته شده است. فرآیند عددی واسنجی شده و در نهایت، با توسعه یک مدل ریاضی رگرسیون، روند تغییرات بازدهی و راندمان جذب انرژی این سیستم‌های هیبریدی در فواصل انرژی‌های آزمایش‌نشده (نقاط کور آزمایشگاهی) درونیابی و تحلیل گردیده است.

امروزه مواد مرکب به دلیل قابلیت تنظیم خواص، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف یافته‌اند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به بهبود استحکام خمشی و ضربه و توسعه کامپوزیت‌های هوشمند با استفاده از نانوذرات اشاره کرد. [8,9]

علاوه بر رویکردهای تجربی، بهره‌گیری از ابزارهای محاسباتی نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی دقیق رفتار این مواد، نقشی کلیدی در طراحی بهینه قطعات پیشرفته ایفا می‌کند [10-12]. با این وجود، در کنار این ویژگی‌های عملکردی، درک دقیق رفتار مکانیکی و مقاومت به آسیب این ساختارها تحت بارهای دینامیکی، به ویژه ضربه سرعت پایین،

برای تضمین ایمنی و یکپارچگی سازه‌های مهندسی امری حیاتی و اجتناب‌ناپذیر است. رزقی ملکی و پرونده [13]، به مقایسه خواص مکانیکی و رفتار ضربه سرعت پایین در خصوص نمونه‌های کامپوزیت‌های بازالت/اپوکسی و بازالت/وینیل استر پرداختند که نتایج نشان داد که کامپوزیت زمینه اپوکسی به دلیل خواص مکانیکی برتر، در آزمون‌های کشش و خمش عملکرد بهتری نسبت به کامپوزیت زمینه وینیل استر داشت. در آزمون ضربه، نمونه بازالت/اپوکسی انرژی بیشتری جذب کرد اما تمامی انرژی جذب‌شده صرف گسترش آسیب‌های پیچیده داخلی مانند ترک خوردگی ماتریسی، لایه‌لایه‌شدن و شکست الیاف شد. رضوانی توکل، محمد توسکی و همکاران [14]، به بررسی اثر نانوذرات گرافن بر مقاومت ساختار پانل ساندویچی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک و ضربه سرعت پایین پرداختند که نتایج نشان داد که این نوع از ساختار رگه‌ای ساندویچی با هسته فوم پلی‌اورتان، می‌تواند انتشار آسیب در بارگذاری شبه‌استاتیک و تست سقوط وزنه را محدود کند و ساختار ساندویچی را سالم نگه دارد. از طرفی، مشاهده شده است که در اثر ضربه چندین حالت شکست مختلف از جمله شکست الیاف، ترک ماتریس، لایه‌لایه شدگی، جداشدگی بین الیاف و فوم، شکست فوم و له شدن فوم رخ داده است. بعد از آنالیز FE-SEM مشاهده شد که ساختار ساندویچی با 0.3 درصد نانوذرات، دارای تراکم بیشتری نسبت به سایر ساختارهای آزمایش شده می‌باشد. وانگ و همکاران [15] به بررسی رفتار حرارتی کامپوزیت PLA تقویت شده با الیاف شیشه با خواص مکانیکی بهبود یافته پرداختند که نتیجه آن تهیه اجزای ساختاری سبک وزن مورد استفاده در بسیاری از کاربردها مانند صنایع خودروسازی را نشان می‌دهد. فذضالله و همکاران [16] به بررسی عملکرد ضربه‌ای بر روی بیوکامپوزیت‌های ساخته شده از PLA تقویت شده با الیاف برگ آناناس که تحت تست ضربه سرعت پایین قرار دارد، پرداختند که مشخص شد که حداکثر نیروی ضربه و کل انرژی جذب شده به صورت خطی با افزایش سرعت ضربه افزایش می‌یابد. نور آنین و همکاران [6] به رفتار ساختار کامپوزیت ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری شش‌ضلعی با سلول‌های واحد مختلف (6 و 8 و 10) چاپ شده توسط پرینتر سه‌بعدی تحت ضربه سرعت پایین پرداختند که به مقایسه ساختارهای مشبک PLA، PLA-Wood و PLA-Carbon تحت سه سطح انرژی و میزان انرژی جذب شده پرداختند با مقایسه سلول‌های واحد مواد استفاده شده، مشاهده می‌شود که سلول واحد 8 میلی‌متری PLA-Wood بهترین پیکربندی برای مواد سبک وزن با قابلیت جذب انرژی چشمگیر است و به سفتی بهتر منجر می‌شود. ژانگ و دیویس [17] نشان دادند که الیاف کربنی دارای رفتار کشسان هستند، اما بسیاری شکننده‌اند. با توجه به این موضوع آنها پیشنهاد کردند که از الیاف شیشه به جای کربن استفاده می‌شود. ژو و همکاران [18] به این موضوع پی بردند که اصل‌ترین تفاوت بین الیاف تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها و نانومواد تقویت‌کننده کامپوزیت‌ها، درصد کم نانومواد است (2-5 درصد وزنی). بحث ضربه و مقاومت یک سازه در برابر بارهای ضربه‌ای یکی از مهم‌ترین بحث‌های علم مکانیک است. بیشتر نظریه‌های موجود در زمینه ضربه به ویژه بحث ضربه در ورقه‌های کامپوزیتی مربوط به کامپوزیت‌های معمولی است و در ساختار آن‌ها از موادی در ابعاد نانو استفاده نشده است. تکیه معروف و باقری [19] درباره رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی- خاک رس اثر وجود خاک رس اصلاح شده بر کارایی مکانیکی رزین اپوکسی را مورد ارزیابی قرار دادند. بررسی نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که وجود خاک رس اصلاح شده در زمینه اپوکسی موجب افزایش استحکام تسلیم فشاری، مدول کششی و چقرمگی شکست نانوکامپوزیت نسبت به اپوکسی

منفی) و غیرآکوستیک تحت ضربه سرعت پایین پرداختند که بررسی‌ها نشان می‌دهد که طرح ساختاری غیرآکوستیک به لطف سطح تماس بیشتر می‌تواند در تغییر شکل نسبت به ساختار آکوستیک برتری داشته باشد.

2- مواد و روش‌ها

2-1- ساخت نمونه‌ها

هسته‌های مشبک لانه‌زنبوری با هندسه سلولی 1 سانتی‌متری و ابعاد کلی 10×10 سانتی‌متر، با استفاده از فیلامنت PLA خالص (قطر 1.75 میلی‌متر) و دستگاه پرینتر سه‌بعدی FDM مدل Marbin300 ساخته شدند. پارامترهای پرینت شامل دمای نازل 210 درجه سانتی‌گراد، دمای بستر 60 درجه سانتی‌گراد، ضخامت لایه‌گذاری 0.2 میلی‌متر، چگالی پرشدگی هسته 100% و سرعت پرینت 50 میلی‌متر بر ثانیه تنظیم گردید. جهت تقویت ساختار، ورق آلومینیوم 2024-T3 با ضخامت 0.7 میلی‌متر و کامپوزیت الیاف شیشه دوجته با رزین اپوکسی به روش لایه‌گذاری دستی¹ تحت فشار یکنواخت به هسته متصل شدند (شکل 1). رویه آلومینیومی با ضخامت 0.7 میلی‌متر و کامپوزیت الیاف شیشه دو جته بر روی نمونه‌ها قرار داده شد. رویه‌های آلومینیومی از جنس T3-2024 انتخاب شد. به طور کلی سه نوع نمونه PLA بدون تقویت کننده و همچنین PLA پوشانده شده با ورق آلومینیوم 2024 و در نهایت PLA پوشانده شده با پارچه کامپوزیتی الیاف شیشه دو جته مورد بررسی قرار گرفت. که با ضخامت 13.8 میلیمتر و تیرانس 1 درصد به روش ساخت لایه‌گذاری دستی ساخته شده‌اند.

رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی و ساخت شرکت مکرر با نام تجاری ML506 و با سخت‌کننده HA11 انتخاب گردید [28]. واکنش شیمیایی و پخت این رزین در دمای 25 تا 80 درجه سانتیگراد انجام می‌گردد. نسبت سخت‌کننده به رزین، 15% در مقیاس وزنی بوده و پس از ساخت نمونه‌ها، پخت در دمای 25 درجه سانتیگراد انجام گردید. شکل 2 نمونه قطعات مونتاژ شده مشخص می‌باشد که ساخته شده‌اند.

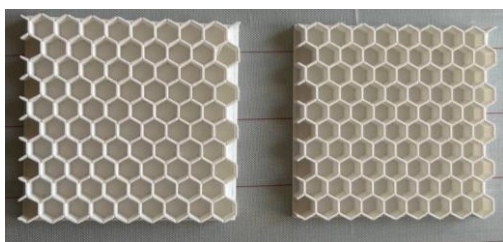


Fig. 1 Samples of 3D-printed honeycomb PLA cores

شکل 1 نمونه هسته‌های لانه‌زنبوری PLA تولیدشده به روش پرینت سه‌بعدی

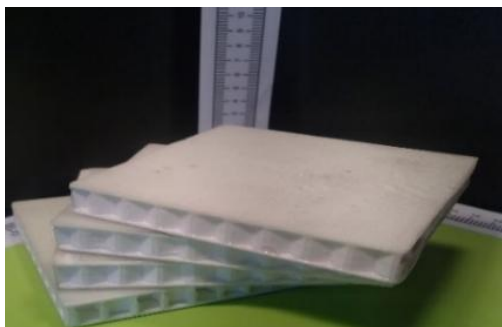


Fig. 2 Final assembled sandwich structures with reinforcing skins

شکل 2 قطعات نهایی ساندویچی مونتاژشده با پوسته‌های تقویت‌کننده

خالص می‌شود. آویلا و همکاران [20] رفتار ورقه‌های کامپوزیتی را به طور آزمایشی در اثر ضربه در سرعت‌های کم مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اثر تغییر مقدار درصد حجمی ذرات را در مقدار نیروی تماس در سطوح مختلف انرژی ضربه بررسی کردند. در این پژوهش نشان داده شد، نمونه‌های دارای 5% کسر حجمی نانوذرات بهترین کارایی را نسبت به میرایی نیروی تماس نشان می‌دهند. جی فان و همکاران [21] پاسخ ضربه سرعت کم را در کامپوزیت‌های چند لایه فیبر-فلز و کامپوزیت‌های ساده مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز نسبت به کامپوزیت‌های ساده مقاومت در برابر سوراخ‌شدگی بالاتری دارند. تساریس و همکاران [22] به بررسی مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز تحت ضربه سرعت پایین پرداخته، سپس توانستند طراحی بهینه‌ای را برای مقاومت به ضربه کاربردهای هوافضا ارائه کنند، همچنین نشان دادند که کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز قادر به جذب انرژی، از طریق تغییر شکل پلاستیک و شکست، بین سطح مشترک لایه‌ها هستند. صدیقی و همکاران [7] مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت چندلایه فیبر-فلز را با انواع فلز و ضخامت‌های مختلف تحت ضربه سرعت پایین مورد بررسی قرار داده و مشاهده کردند که افزایش ضخامت آلومینیوم موجب بهبود عملکرد کامپوزیت فیبر-فلز تحت ضربه شده است. لین [23] به موضوع ضربه‌ها بخصوص ضربه سرعت پایین از جمله بارگذاری‌های دینامیکی پرداختند که در طراحی و تحلیل سازه‌ها نقش بسیار مهمی دارند. لین درباره رفتار ضربه‌ای نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده سیلیکاتی مطالعاتی انجام داد. وی در پژوهش خود افزون بر مشخص کردن خواص مکانیکی، اثر ساختار و نحوه آرایش نانوذرات در ماتریس و مشخصات ماتریس را بر بارگذاری ضربه‌ای نانوکامپوزیت بررسی کرده و نشان داد که سطح ترک بین‌لایه‌ای در تمام نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات سیلیکاتی در اثر بارهای ضربه‌ای با انرژی کم، کاهش می‌یابد. گو و همکاران [24] کامپوزیت‌های چندلایه فیبر-فلز، کارال و گلیر را تحت ضربه سرعت پایین به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند که نتایج شبیه‌سازی برای کارال، بارهای بحرانی بزرگتری و جابه‌جایی کوچکتری تحت انرژی ضربه یکسان نشان می‌دهد، همچنین تأثیر الیاف‌های مختلف آلومینیوم در مقاومت به ضربه را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که با افزایش استحکام تسلیم الیاف آلومینیوم، خواص مقاومت به ضربه بهبود می‌یابد. جاسم محمد بلحدیلی و بشار اوید [25] به اندازه‌گیری تجربی و عددی رفتار مکانیکی PLA از طریق ضربه با سرعت پایین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که نمونه‌ها صفحاتی بودند که به طور کامل با دو لبه توسط فیکسچر گیره محدود شده بودند که نتایج مناطق آسیب و تحمل مکانیکی نمونه را نشان داد و بین نتایج تجربی و عددی تطابق وجود داشت. بنابراین به تعریف خواص پلیمرهای مورد استفاده در کاربردهای حیاتی مانند پزشکی کمک می‌کند. شاداب سدیگوی و همکاران [26] به موضوع پاسخ ضربه‌ای سرعت پایین کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف طبیعی و بررسی جامع پارامترهای تأثیرگذار پرداختند که این بررسی بهترین گزینه‌ها را برای عواملی مانند جهت‌گیری فیبر، توالی انباشتگی، هیبریداسیون، هندسه، اندازه، انرژی جنبشی و سرعت ضربه‌گیر، درمان شیمیایی و اثرات ماتریس که بر پاسخ کامپوزیت فیبر طبیعی تحت شرایط ضربه سرعت پایین تأثیر می‌گذارد، بررسی، خلاصه و پیشنهاد می‌کند. این یافته‌ها مفاهیم مهمی را برای استفاده از کامپوزیت‌های الیاف طبیعی در صنایع وسایل نقلیه، دریایی و تجهیزات ورزشی ارائه می‌دهد. فتح اوستا و همکاران [27] به پژوهش در مقاومت پانل‌های کامپوزیت با انواع هسته منشوری آکوستیک (نسبت پواسون

¹ Hand lay-up

2-2- آزمایش ضربه سرعت پایین و نتایج و بحث‌ها

به منظور بررسی رفتار دینامیکی و مقاومت به آسیب نمونه‌ها، آزمون ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه ضربه افتان مدل SDWT-100 (نمایش داده شده در شکل 3) انجام گرفت. این آزمایش‌ها دقیقاً منطبق بر الزامات استاندارد بین‌المللی ASTM D7136/D7136M-15 [29] اجرا گردید. طبق این استاندارد، تمامی پارامترهای فنی دستگاه شامل صلبیت بالای تکیه‌گاه جهت جلوگیری از اتلاف انرژی، مشخصات وزنه سقوط و استفاده از ضربه‌زننده فولادی با سر کروی به قطر 16 میلی‌متر (8/5 اینچ) به دقت تنظیم شد تا از انتقال کامل انرژی جنبشی به مرکز نمونه‌ها اطمینان حاصل شود. در شرایط تست ضربه سرعت پایین در این پژوهش ارتفاع ضربه‌زننده به میزان ثابت و 37.2 سانتیمتر در نظر گرفته شد و جرم ضربه‌زننده در سطح انرژی اول مقدار 2.733 کیلوگرم، در سطح انرژی دوم مقدار 5.797 کیلوگرم و در سطح انرژی سوم مقدار 8.229 کیلوگرم قرار داده شد.

نمونه‌ها در هر مرحله از تست، توسط گیره پایین دستگاه به صورت ثابت قرار داده شدند و چهار گوشه آنها فیکس گردید و سطح وسط هر نمونه مورد هدف آزمایش قرار گرفت.

پدیده ضربه سرعت پایین به دلیل ماهیت دینامیکی خود، مواد را تحت نرخ کرنش‌های متوسط قرار می‌دهد. در آزمایش‌های انجام شده، با توجه به سرعت اولیه پرتابه صلب 16 میلی‌متری (در بازه 2.7 تا 3.8 متر بر ثانیه)، نرخ کرنش دینامیکی حاکم بر نمونه‌ها در بازه فشرده‌شدن هسته لانه‌زنبوری، در محدوده تخمین زده می‌شود. در این محدوده از نرخ کرنش، رفتار پلیمر PLA و لایه‌های کامپوزیتی به شدت وابسته به زمان بوده و مکانیزم‌های شکست متفاوتی نسبت به بارگذاری شبه‌استاتیکی فعال می‌شوند.



Fig. 3 Drop-weight impact testing machine

شکل 3 دستگاه آزمون ضربه سقوط وزنه (وزنه افتان)

یک حسگر شتاب‌سنج پیزوالکتریک در دستگاه تعبیه شده است که در لحظه برخورد، داده‌های شتاب-زمان را ثبت و به دیتالاگر منتقل می‌کند. به منظور استخراج دقیق نمودارهای نیرو-جابجایی و جلوگیری از انباشت خطای عددی، فرآیند پردازش داده‌ها در سه مرحله انجام شد: ابتدا خطای آفست اولیه¹ سیگنال شتاب صفر گردید. سپس، جهت حذف نویزهای فرکانس بالا ناشی از

ارتعاشات سازه‌ای بدنه دستگاه، یک فیلتر دیجیتال پایین‌گذر باترورث² اعمال شد. در نهایت، سرعت اولیه برخورد پرتابه (V_0) بر اساس رابطه پتانسیل سقوط آزاد در ارتفاع ثابت 37.2 سانتی‌متر و استیجی شده و به عنوان شرط مرزی اولیه در انتگرال‌گیری اول (شتاب به سرعت) لحاظ گردید. با انتگرال‌گیری مجدد از نمودار سرعت-زمان، جابجایی دقیق پرتابه در هر لحظه استخراج شد. برای به دست آوردن تأثیر ورق آلومینیوم و الیاف شیشه بر روی قطعات PLA ضربه سرعت پایین در سه سطح انرژی 10، 21 و 30 ژول انجام گرفت.

برای به دست آوردن حداکثر میزان انرژی که نمونه تخریب نشود، آزمون شبه‌استاتیکی انجام شد و نتایج به‌گونه‌ای به دست آمد که ارتفاع ضربه‌زننده را به میزان 37.2 سانتیمتر برای تمامی ضربه‌زننده‌ها تعیین گردید. با استفاده از رابطه انرژی پتانسیل به روابط زیر می‌رسد:

$$u = mgh \quad (g = 9.81 \text{ m/s}^2, h = 37.2 \text{ cm}) \quad (1)$$

$$m_1 = 2.733 \text{ kg} \ \& \ g = 9.81 \text{ m/s}^2 \xrightarrow{u=mgh} u = 10 \text{ J} \quad (1-a)$$

$$m_2 = 5.797 \text{ kg} \ \& \ g = 9.81 \text{ m/s}^2 \xrightarrow{u=mgh} u = 21 \text{ J} \quad (1-b)$$

$$m_3 = 8.229 \text{ kg} \ \& \ g = 9.81 \text{ m/s}^2 \xrightarrow{u=mgh} u = 30 \text{ J} \quad (1-c)$$

2-3- مدل‌سازی اجزاء محدود³

هندسه سه‌بعدی هسته لانه‌زنبوری کاملاً مطابق با نمونه پرینت‌شده مدل‌سازی گردید. برای پرتابه از المان‌های صلب و برای هسته پلیمری و پوسته‌ها از المان‌های سه‌بعدی هشت‌گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته⁴ استفاده شد. ریزش مش در ناحیه برخورد برای تضمین همگرایی نتایج اعمال گردید. جهت تعریف رفتار مواد: برای ورق آلومینیوم 2024 از مدل الاستوپلاستیک همراه با معیار آسیب پیشرونده جانسون-کوک⁵؛ برای پوسته کامپوزیت الیاف شیشه از معیار آسیب درون‌لایه‌ای هاشین⁶؛ و برای هسته PLA از مدل پلاستیسیته مجزا با قابلیت حذف المان⁷ در کرنش شکست پلیمری استفاده شد. اتصال بین پوسته‌ها و هسته لانه‌زنبوری با استفاده از المان‌های چسبنده⁸ با معیار خواص خطی فیکسچر آزمایشگاهی شبه‌سازی شد. سرعت اولیه پرتابه متناسب با سطوح انرژی آزمایشگاهی 10، 21 و 30 ژول به عنوان شرط مرزی دینامیکی به نقطه مرجع پرتابه اعمال گردید.

3- نتایج و بحث

3-1- پاسخ دینامیکی و مکانیزم‌های شکست تجربی

نمودار نیرو - زمان و نیرو - جابجایی تأثیر ورق آلومینیوم و الیاف شیشه را در نمونه‌ها نشان می‌دهد. شکل 4 نمودار نیرو - زمان مربوط به انرژی 10 ژول می‌باشد. همانطور که از نمودار پیداست، نمونه PLA بدون تقویت‌کننده مقاومت به ضربه بیشتری نسبت به نمونه‌های PLA/AL و PLA/Glass می‌باشد. با انتگرال‌گیری از نمودار نیرو - زمان، نمودار نیرو - جابجایی به دست می‌آید که در شکل 5 مشخص می‌باشد، در این نمودار نمونه PLA هم مقدار انرژی جذب

⁵ Johnson-Cook

⁶ Hashin

⁷ Element Deletion

⁸ Cohesive Behavior

¹ Offset Removal

² Butterworth Low-pass Filter

³ Finite Element Modeling

⁴ C3D8R

اولیه برخورد، سازه تنش ماکزیمم کمی را تحمل کرده و فوراً سوراخ یا خرد می‌شود؛ پس از این تخریب آنی، مقاومت قطعه در برابر نفوذ عملاً به نزدیک صفر می‌رسد و پرتابه بدون مواجهه با نیروی واکنش بزرگ، جابجایی بالایی را تا انتهای بازه حرکتی خود طی می‌کند. این امر کوتاه بودن زمان تماس مؤثر نیرو را در عین بالا بودن جابجایی توجیه می‌کند.

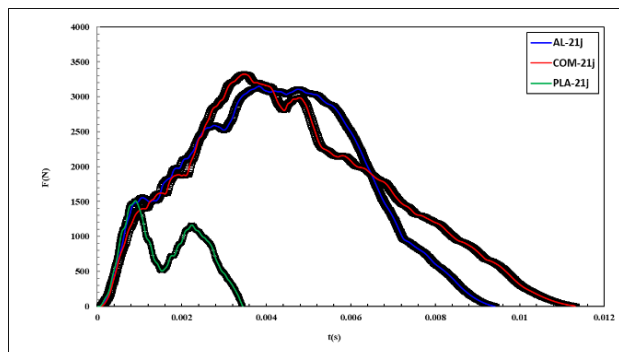


Fig. 6 Comparison of force-time curves for different specimens under 21 J impact energy

شکل 6 نمودار مقایسه‌ای نیرو-زمان نمونه‌های مختلف تحت انرژی ضربه 21 ژول

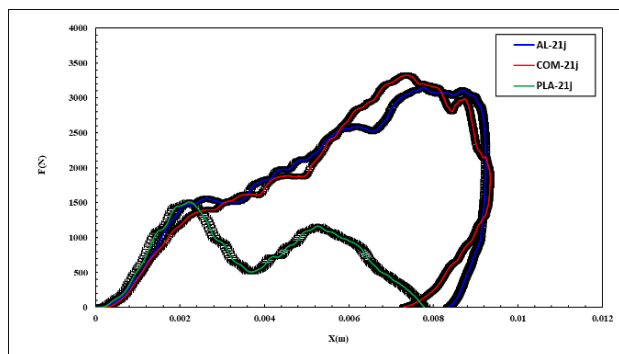


Fig. 7 Comparison of force-displacement curves for different specimens under 21 J impact energy

شکل 7 نمودار مقایسه‌ای نیرو-جابجایی نمونه‌های مختلف تحت انرژی ضربه 21 ژول

لازم به ذکر است به دلیل تخریب کامل نمونه PLA بدون تقویت کننده در سطح انرژی 21 ژول، آزمایش در سطوح انرژی بالاتر برای این نمونه انجام نگردید.

اما زمانی که سطح انرژی بالا می‌رود نمونه‌ها رفتار متفاوت‌تری را در برابر پاسخ به ضربه پایین از خود نشان می‌دهند. در شکل 8 نمودار مربوط به سطح انرژی ضربه‌زننده 30 ژول است. در این نمودار نمونه PLA/Glass دارای نیروی تماسی بیشینه نسبت به نمونه PLA/AL می‌باشد. این مطلب بیانگر این است که مقاومت به ضربه نمونه PLA/Glass نیز بیشتر می‌باشد. با به دست آوردن نمودار نیرو - جابجایی که در شکل 9 نمایش داده شده است، مشخص می‌شود که نمونه PLA/Glass هم انرژی جذب شده بیشتر و هم جابجایی بیشتر نسبت به نمونه PLA/AL را دارد.

نتایج به دست آمده از تحلیل نمودارهای فوق در جدول 1 تنظیم شده است و مساحت زیر نمودارهای نیرو-جابجایی نشانگر میزان انرژی جذب شده هر نمونه در هر سطح انرژی می‌باشد.

شده بزرگتر و هم مقدار جابجایی کوچکتر نسبت به نمونه‌های دیگر را دارد. مقدار انرژی جذب شده سطح زیر نمودار نیرو - جابجایی می‌باشد. این نتیجه می‌تواند به دلیل این باشد که در آزمایش شبه‌استاتیکی انجام شده، نمونه PLA دارای حد تحمل انرژی بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها بود و در سطوح انرژی پایین میزان انرژی بیشتری را جذب کرده است. ولی به دلیل شکننده و ترد بودن نسبت به سایر نمونه‌ها، در انرژی ضربه در سطوح انرژی بالاتر رفتار PLA بدون تقویت کننده معکوس دیده شد و به تخریب کامل رسید.

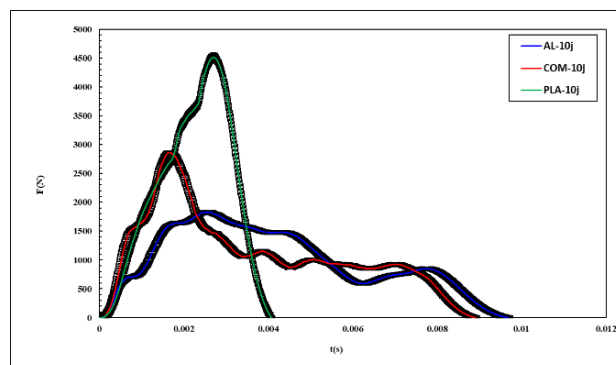


Fig. 4 Comparison of force-time curves for different specimens under 10 J impact energy

شکل 4 نمودار مقایسه‌ای نیرو-زمان نمونه‌های مختلف تحت انرژی ضربه 10 ژول

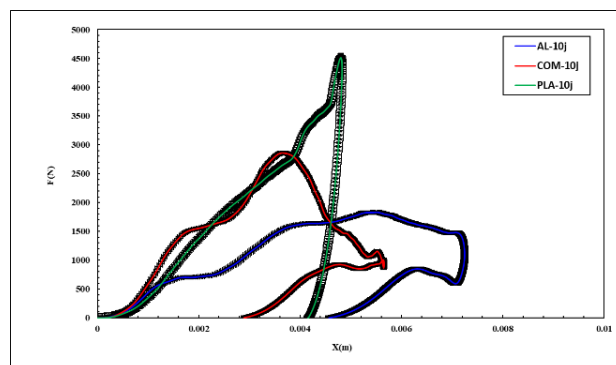


Fig. 5 Comparison of force-displacement curves for different specimens under 10 J impact energy

شکل 5 نمودار مقایسه‌ای نیرو-جابجایی نمونه‌های مختلف تحت انرژی ضربه 10 ژول

شکل 6 نشان‌دهنده این است که نمونه PLA/AL دارای مقاومت به ضربه بیشتری نسبت به نمونه PLA/Glass است. سطح انرژی ضربه‌زننده در این آزمایش 21 ژول می‌باشد. زمانی که سطح ضربه‌زننده بالا می‌رود، تأثیر افزودن تقویت کننده‌ها نمایان می‌شود. در شکل 7 که نمودار نیرو - جابجایی مربوط به سطح انرژی 21 ژول است، نشان می‌دهد که نمونه PLA/AL دارای جذب انرژی بیشتری می‌باشد، همچنین مقدار جابجایی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است. طبق انتظارات فیزیکی اولیه، نمونه‌ای با زمان تماس کوتاه‌تر و نیروی ماکزیمم کمتر باید جابجایی کمتری ثبت کند. اما مشاهده می‌شود نمونه PLA خالص در انرژی 21 ژول جابجایی تقریباً یکسانی با دو نمونه دیگر داشته است. این روند به دلیل پدیده کاهش شدید سفتی ناگهانی¹ در اثر شکست ترد و متلاشی شدن ناگهانی دیواره‌های لانه زنبوری PLA رخ داده است. در لحظات

¹ Sudden Stiffness Degradation

جدول 1 مشخصات هندسی و نتایج تجربی حاصل از آزمون ضربه سرعت پایین نمونه‌ها

Table 1 Geometric specifications and experimental results of low-velocity impact tests on the specimens.

کد نمونه	ضخامت نمونه (میلی‌متر)	انرژی ضربه (ژول)	جرم ضربه‌زننده (کیلوگرم)	تقویت کننده	جرم نمونه (گرم)	جابجایی بیشینه (میلی‌متر)	میزان انرژی جذب شده (ژول)	میزان انرژی جذب شده ویژه (ژول بر گرم)
P01	13.70	10	2.733	بدون پوسته	70.945	4.83	7.468	0.1052
PA01	13.74	10	2.733	آلومینیوم	91.501	7.25	7.081	0.0773
PG01	13.90	10	2.733	الیاف شیشه	78.565	5.66	6.741	0.0858
P11	13.70	21	5.797	بدون پوسته	71	-	(نفوذ)	-
PA11	13.74	21	5.797	آلومینیوم	92.191	9.24	17.466	0.1894
PG11	13.90	21	5.797	الیاف شیشه	80.44	9.35	16.782	0.2086
P21	13.70	0	0	بدون پوسته	70.578	-	(نفوذ)	-
PA21	13.74	30	8.229	آلومینیوم	91.147	10.57	24.372	0.2673
PG21	13.90	30	8.229	الیاف شیشه	81.872	9.69	25.516	0.3116

ضربه در هر سطح انرژی روی هر نمونه 3 مرتبه صورت پذیرفت. به عنوان مثال PA11 یعنی آزمایش ضربه با انرژی 21 ژول و جرم ضربه‌زننده 5.797 کیلوگرم و با تقویت کننده آلومینیوم و 1 بار ضربه انجام شده است. سطوح جلو و پشت مربوط به هر نمونه بررسی شده و در شکل‌های 10 تا 17 آمده است و میزان آسیب دیدگی آنها نمایش داده شده است.

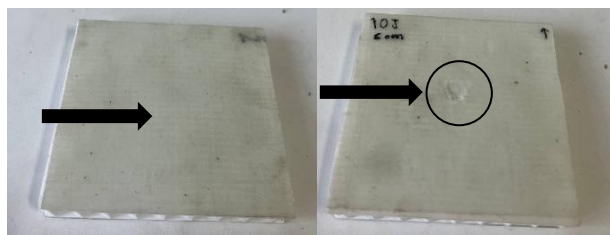


Fig. 10 Failure mechanisms and experimental surfaces of PLA/Glass specimen under 10 J impact energy

شکل 10 مکانیزم شکست و سطوح تجربی نمونه PLA/Glass تحت انرژی 10 ژول ضربه سرعت پایین

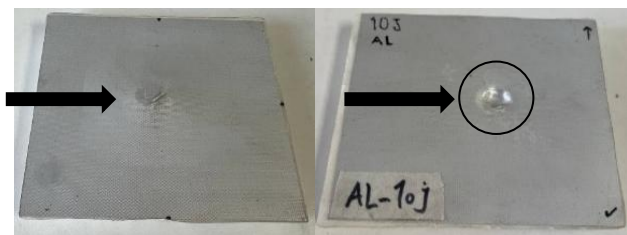


Fig. 11 Failure mechanisms and experimental surfaces of PLA/AL specimen under 10 J impact energy

شکل 11 مکانیزم شکست و سطوح تجربی نمونه PLA/AL تحت انرژی ضربه 10 ژول

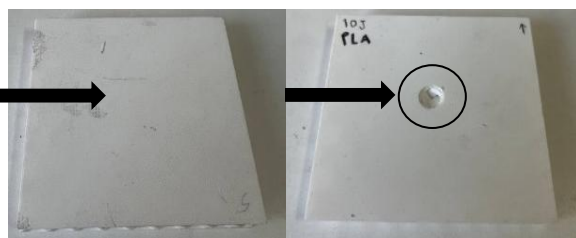


Fig. 12 Failure mechanisms and experimental surfaces of pure PLA specimen under 10 J impact energy

شکل 12 مکانیزم شکست و سطوح تجربی نمونه PLA خالص تحت انرژی ضربه 10 ژول

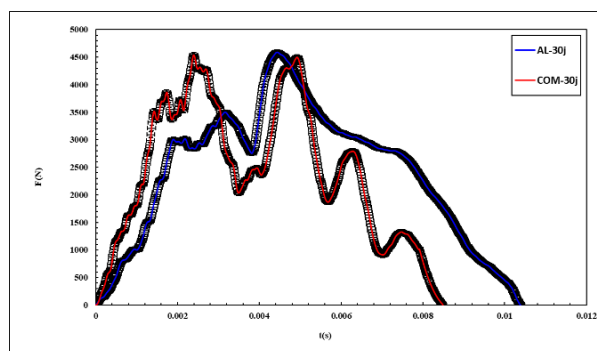


Fig. 8 Comparison of force-time curves for PLA/AL and PLA/Glass specimens under 30 J impact energy

شکل 8 نمودار مقایسه‌ای نیرو-زمان نمونه‌های PLA/AL و PLA/Glass تحت انرژی ضربه 30 ژول

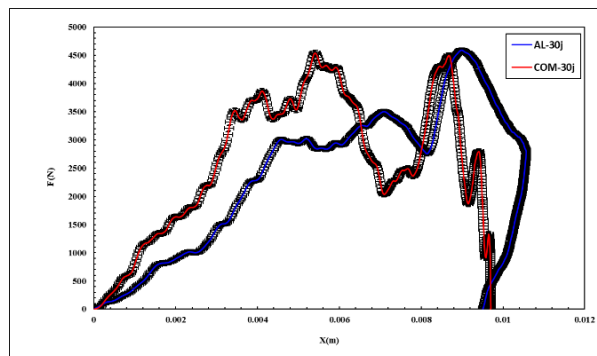


Fig. 9 Comparison of force-displacement curves for PLA/AL and PLA/Glass specimens under 30 J impact energy

شکل 9 نمودار مقایسه‌ای نیرو-جابجایی نمونه‌های PLA/AL و PLA/Glass تحت انرژی ضربه 30 ژول

در جدول 1، وضعیت نمونه‌های PLA خالص در انرژی‌های 21 و 30 ژول به عنوان تخریب کامل (نفوذ) گزارش شده است. عدد صفر نمایانگر تسلیم آبی و عبور (نفوذ) کامل پرتابه از ضخامت قطعه است. در نتیجه سنسور دستگاه قادر به ثبت دایره کامل بارگذاری نبوده و بخش عمده انرژی به صورت پسماند حرکتی در پرتابه باقی مانده است. قبل از هر تست ضربه در هر سطح انرژی، ابتدا دستگاه با انجام یک ضربه روی صفحه آزمایشی کالیبره می‌گردید (سنسورها، داده‌ها و ...) و سپس نمونه اصلی قرار داده می‌شد و تست انجام می‌گردید. همچنین به دلیل محدودیت زمان و هزینه ساخت بالای قطعات، تست

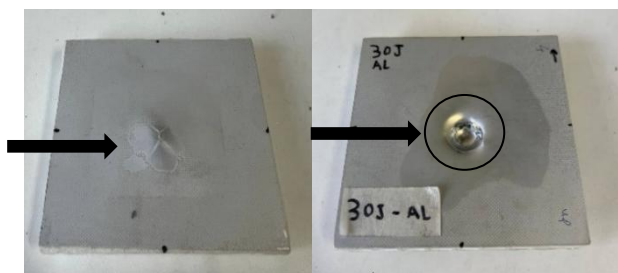


Fig. 17 Front and back surfaces of PLA/AL specimen after low-velocity impact at 30 J

شکل 17 سطوح رویی و پشتی نمونه PLA/AL پس از ضربه سرعت پایین تحت انرژی 30 ژول

2-3- اعتبارسنجی مدل عددی و مطالعه پارامتریک

به منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل اجزاء محدود توسعه یافته، نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از شبیه سازی با نتایج تجربی مقایسه شدند. شکل 18 تطابق منحنی های تجربی و عددی را برای نمونه های مختلف نشان می دهد. مدل عددی به خوبی توانسته است صلبیت اولیه، نیروی ماکزیمم ضربه (F_{max}) و میزان فاز باربرداری را پیش بینی کند. جدول 2 مقادیر عددی استخراج شده و میزان خطای نسبی مدل را نشان می دهد که نشان دهنده اعتبار بالای مدل عددی است.

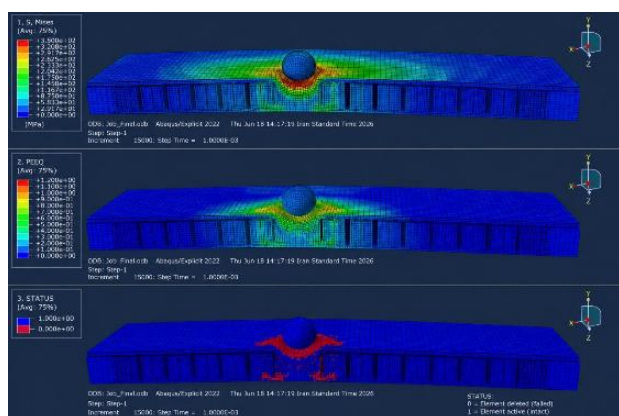


Fig. 18 Finite element simulation contours of stress distribution and progressive damage criteria at different energy levels

شکل 18 کانتورهای شبیه سازی اجزاء محدود توزیع تنش و معیارهای آسیب پیشرونده در سطوح مختلف انرژی

شکل 18 کانتورهای توزیع تنش فون مایزس¹ و نحوه انتشار آسیب پیشرونده را در هسته و پوسته ها تحت سطوح مختلف انرژی (10، 21 و 30 ژول) نشان می دهد. تحلیل این کانتورها، تفاوت بنیادین مکانیزم های موضعی تسلیم و تخریب را در دو ساختار فلزی و کامپوزیتی به تصویر می کشد.

در نمونه های با رویه آلومینیومی PLA/AL، کانتورهای تنش به صورت متقارن و دایره ای حول نقطه برخورد پرتابه شکل گرفته اند که این امر ناشی از ماهیت همسانگرد² ورق آلومینیوم 2024 است. با افزایش انرژی ضربه از 10 به 30 ژول، تمرکز تنش در ناحیه مرکزی به شدت افزایش یافته و مدل عددی به خوبی توانسته است پدیده تسلیم پلاستیک گسترده و شکل گیری فرو رفتگی

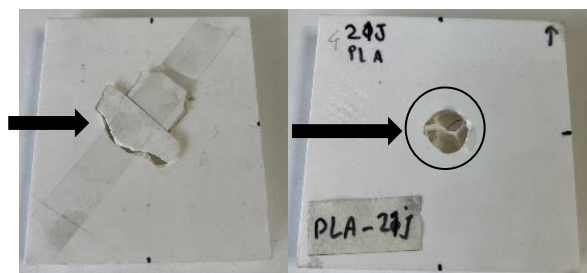


Fig. 13 Complete penetration and catastrophic failure of pure PLA specimen under 21 J and 30 J impact energies

شکل 13 نفوذ کامل و تخریب فاجعه بار در نمونه PLA خالص تحت انرژی های ضربه 21 و 30 ژول

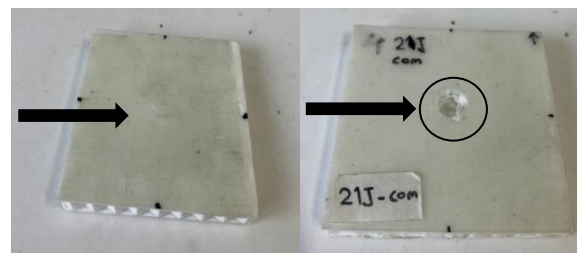


Fig. 14 Front and back surfaces of PLA/Glass specimen after low-velocity impact at 21 J

شکل 14 سطوح رویی و پشتی نمونه PLA/Glass پس از ضربه سرعت پایین تحت انرژی 21 ژول

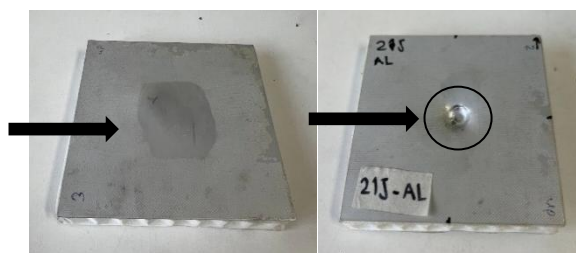


Fig. 15 Front and back surfaces of PLA/AL specimen after low-velocity impact at 21 J

شکل 15 سطوح رویی و پشتی نمونه PLA/AL پس از ضربه سرعت پایین تحت انرژی 21 ژول

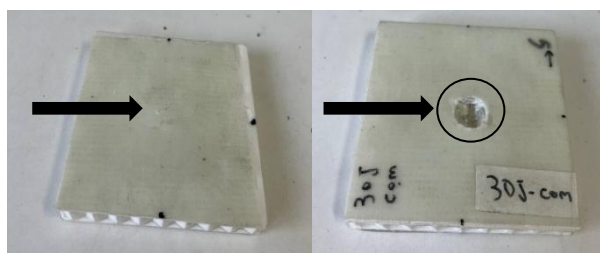


Fig. 16 Front and back surfaces of PLA/Glass specimen after low-velocity impact at 30 J

شکل 16 سطوح رویی و پشتی نمونه PLA/Glass پس از ضربه سرعت پایین تحت انرژی 30 ژول

لایه لایه شدگی از حالت های رایج در ساختار کامپوزیت های چندلایه فیبر - فلز تحت ضربه سرعت پایین است که میان لایه های کامپوزیتی یا لایه کامپوزیتی با فلز گسترش می یابد. گسترش لایه لایه شدگی در لایه های کامپوزیتی بافت ساده به عوامل متعددی مانند کرنش الیاف، چقرمگی رزین و ضخامت کلی نمونه بستگی دارد.

² Isotropic

¹ von Mises

جدول 2 مقایسه تجربی و عددی (FEA) پارامترهای ضربه جهت اعتبارسنجی مدل

Table 2 Comparison of experimental and FEA impact parameters for model validation

کد نمونه	انرژی ضربه (ژول)	نیروی ماکزیمم تجربی (kN)	نیروی ماکزیمم عددی (kN)	خطای نیروی ماکزیمم (%)	انرژی جذب شده تجربی (J)	انرژی جذب شده عددی (J)	خطای انرژی جذب شده (%)
P01	10	1.85	1.96	5.9%	7.46	7.81	4.6%
PA01	10	2.91	3.12	7.2%	7.08	7.35	3.8%
PG01	10	3.45	3.62	4.9%	6.74	7.01	4.0%
PA11	21	4.12	4.41	7.0%	17.46	18.22	4.3%
PG11	21	4.95	5.23	5.6%	16.78	17.50	4.2%
PA21	30	5.32	5.71	7.3%	24.37	25.60	5.0%
PG21	30	6.21	6.55	5.4%	25.51	26.44	3.6%

موضعی¹ را در پوسته فلزی بازسازی کند. این تمرکز تنش شدید در مرکز، مستقیماً به دیواره‌های سلولی هسته لانه‌زنبوری PLA در زیر پرتابه منتقل شده و منجر به بارگذاری بیش از حد موضعی و لهیدگی فاجعه‌بار سلول‌ها در یک ناحیه محدود شده است که تطابق بالایی با نتایج تجربی دارد.

در نقطه مقابل، در نمونه‌های تقویت‌شده با کامپوزیت الیاف شیشه PLA/Glass، الگوی توزیع تنش کاملاً غیرمتقارن بوده و به موازات راستای چیدمان الیاف (طولی و عرضی) گسترش یافته است که بازتاب‌دهنده رفتار ناهمسانگرد² لایه‌های کامپوزیتی است. کانتورهای حاصل از معیار آسیب پیش‌رونده هشین نشان می‌دهند که در انرژی پایین (10 ژول)، معیار آسیب ماتریس و الیاف در بازه الاستیک قرار دارد؛ اما با افزایش انرژی به 21 و به‌ویژه 30 ژول، ناحیه تحت تنش به شدت وسیع‌تر می‌شود. این پدیده گویای آن است که پوسته کامپوزیتی بر خلاف آلومینیوم، بار دینامیکی ضربه را در مساحت بسیار بزرگتری تسهیم³ می‌کند. انتشار آسیب به صورت ترک‌خوردگی ماتریس و جدایش بین‌لایه‌ای⁴ در فواصل دورتر از مرکز برخورد، ظرفیت بسیار بالایی برای استهلاک انرژی آزاد کرده و با کاهش تمرکز تنش حاد بر روی هسته لانه‌زنبوری، مانع از نفوذ کامل پرتابه در انرژی 30 ژول می‌گردد.

پس از تأیید اعتبار مدل با خطای کمتر از 10 درصد، یک مطالعه پارامتریک روی اثر ضخامت پوسته‌های تقویت‌کننده (تغییر ضخامت از 0.5 میلی‌متر به 1.5 میلی‌متر) انجام شد. نتایج عددی نشان داد که با دو برابر شدن ضخامت پوسته آلومینیومی در نمونه PA21، نیروی ماکزیمم ضربه به میزان 34٪ افزایش و جابجایی بیشینه پرتابه 22٪ کاهش می‌یابد. در مقابل، افزایش ضخامت پوسته کامپوزیت الیاف شیشه در نمونه PG21 منجر به تأخیر در وقوع آسیب بین‌لایه‌ای شده و شاخص انرژی جذب‌شده ویژه⁵ سازه را تا 18٪ بهبود می‌بخشد. این امر نشان می‌دهد ضخامت پوسته کامپوزیت کارایی بهتری در بهینه‌سازی وزن سازه در انرژی‌های بالا دارد.

در یک تحلیل یکپارچه، نقش پدیده تردی⁶ بر اساس آستانه انرژی شکست دینامیکی قابل تفسیر است. مواد ترد مانند PLA خالص دارای سفتی اولیه بالا اما کرنش شکست پایین هستند. در سطح انرژی 10 ژول، تنش‌ها زیر آستانه تخریب بوده و قطعه صلبیت خود را حفظ می‌کند. اما با افزایش انرژی به 21 ژول، از آنجا که ماده پتانسیل کرنش پلاستیک ندارد، دچار شکست فاجعه‌بار و متلاشی‌شدن آنی می‌گردد. در انرژی بالا 30 ژول، برتری نمونه PLA/Glass به دلیل تفاوت در توزیع تنش توسط رویه رخ می‌دهد. پوسته الیاف شیشه سبب

فعال شدن هم‌زمان مکانیزم‌های شکست میکرومکانیکی ترد متعدد (نظیر ترک‌خوردگی ماتریس، لایه‌لایه‌شدگی و بیرون کشیدگی الیاف) در سطح وسیعی می‌شود که کلید اصلی استهلاک بالای انرژی است.

3-3- تحلیل روند و درون‌یابی ریاضی مکانیزم‌های جذب انرژی با استفاده از مدل‌سازی رگرسیون

3-3-1- معرفی متغیرها و تحلیل فیزیکی ضرایب استخراج شده

پدیده ضربه سرعت پایین به دلیل ماهیت دینامیکی و وابستگی شدید به نرخ کرنش، رفتاری کاملاً غیرخطی دارد. در این بخش، به منظور ارزیابی نرخ رشد قابلیت بازبری⁷ و درون‌یابی⁸ رفتار مکانیکی سازه‌های تقویت‌شده در فواصل سطوح انرژی آزمایش‌شده، یک مدل‌سازی محاسباتی ریاضی بر پایه روش کمترین مربعات خطا توسعه یافته است. همچنین بهره‌گیری از ابزارهای آماری، مدل‌سازی ریاضی و تحلیل روند برای ارزیابی دقیق بازدهی و راندمان جذب انرژی در صفحات کامپوزیتی و پانل‌های ساندویچی تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین، یک رویکرد استاندارد، کارآمد و اثبات‌شده در مراجع معتبر بین‌المللی محسوب می‌شود [30,31]. در این مدل‌سازی، متغیر مستقل پژوهش، انرژی ورودی پرتابه (U_{in}) بر حسب ژول و متغیر وابسته، میزان انرژی جذب‌شده توسط سازه ساندویچی (U_{abs}) بر حسب ژول در نظر گرفته شده است. با توجه به رفتار غیرخطی سازه در مواجهه با آسیب، از یک تابع چندجمله‌ای درجه دوم به صورت رابطه (2) جهت تبیین رفتار قطعات استفاده شد:

$$U_{abs} = a \cdot (U_{in})^2 + b \cdot (U_{in}) + c \quad (2)$$

در این رابطه، ضرایب عددی a, b, c دارای مفاهیم فیزیکی و مکانیکی مشخصی در فیزیک ضربه هستند. ضریب درجه دوم (a) نشان‌دهنده شتاب یا نرخ تغییرات راندمان جذب انرژی سازه است. مثبت یا منفی بودن این ضریب، صعودی یا نزولی بودن بازدهی سازه در انرژی‌های بالاتر را مشخص می‌کند. ضریب خطی (b) نشان‌دهنده حساسیت اولیه و نرخ رشد خطی جذب انرژی به ازای افزایش مبنای بارگذاری است. ضریب ثابت (c) از نظر ریاضی عرض از مبدأ منحنی بوده و بیانگر حد آستانه انرژی یا اثر پس‌ماند ساختاری⁹ در لحظات اولیه برخورد است. با برازش دقیق مراجع آزمایشگاهی، معادلات حاکم بر دو ساختار تقویت‌شده به صورت روابط (3) و (4) استخراج گردیدند:

¹ Permanent Indentation

² Anisotropic

³ Distribute

⁴ Delamination

⁵ SEA

⁶ Brittleness

⁷ Trend Analysis

⁸ Interpolation

⁹ Residual Energy Threshold

جدول 3 مقادیر درونیابی شده و تحلیل راندمان محاسباتی جذب انرژی سازه‌ها

Table 3 Interpolated values and computational efficiency analysis of energy absorption

نوع پوسته تقویت کننده	a	b	c	ضریب تبیین (R ²)	انرژی ورودی درونیابی (U _{in})	انرژی جذب شده محاسباتی (U _{abs})	راندمان جذب انرژی (%)
PLA/AL	-0.0071	1.1281	-3.1145	1.00	15J	12.21J	81.4%
PLA/AL	-0.0071	1.1281	-3.1145	1.00	25J	20.65J	82.6%
PLA/Glass	+0.0029	0.8239	-1.7855	1.00	15J	11.23J	74.9%
PLA/Glass	+0.0029	0.8239	-1.7855	1.00	25J	20.62J	82.5%

سطوح بارگذاری بالاتر، به دلیل توزیع تنش پیشرونده، بازدهی جرمی به مراتب پایدارتر و بهینه‌تری را نسبت به فلز آلومینیوم از خود ارائه می‌دهد.

$$U_{PLA/AL} = -0.0071(U_{in})^2 + 1.1281(U_{in}) - 3.1145 \quad R^2 = 1.00 \quad (3)$$

$$U_{PLA/Gls} = +0.0029(U_{in})^2 + 0.8239(U_{in}) - 1.7855 \quad R^2 = 1.00 \quad (4)$$

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار دینامیکی سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری PLA پرینت شده و رویه‌های ناهمگن شامل ورق آلومینیوم 2024 و کامپوزیت الیاف شیشه، تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین ارزیابی شد. بررسی‌های تجربی نشان داد که در سطوح انرژی پایین (10 ژول)، هسته PLA خالص به دلیل یکپارچگی ساختاری، مقاومت اولیه مناسبی از خود نشان می‌دهد؛ اما با افزایش شدت ضربه (21 و 30 ژول)، ماهیت ترد ماده پلیمری منجر به فروپاشی فاجعه‌بار و نفوذ کامل پرتابه می‌گردد. در مقابل، افزودن پوسته‌های تقویت کننده عملکرد سازه را کاملاً دگرگون ساخت. اگرچه انعطاف‌پذیری ورق آلومینیوم در نمونه‌های PLA/AL در انرژی 21 ژول منجر به جذب انرژی مناسبی شد، اما در بالاترین سطح بارگذاری (30 ژول)، نمونه تقویت شده با الیاف شیشه PLA/Glass با جذب انرژی 25.51 ژول عملکرد برتری از خود نشان داد. ارزیابی شاخص انرژی جذب شده ویژه ثابت کرد که این برتری ناشی از فعال شدن هم‌زمان مکانیزم‌های متعدد شکست میکرومکانیکی، نظیر لایه‌لایه‌شدگی و شکست ماتریس، در ساختار کامپوزیت است که کلید اصلی استهلاک انرژی محسوب می‌شود.

علاوه بر مشاهدات آزمایشگاهی، توسعه یک مدل سه‌بعدی اجزاء محدود با بهره‌گیری از معیارهای آسیب پیشرونده هاشین و جانسون-کوک، توانست رفتار دینامیکی سازه‌ها را با خطای کمتر از 10 درصد پیش‌بینی نماید. نتایج حاصل از مطالعه پارامتریک روی این مدل اعتبارسنجی شده نشان داد که تأثیر افزایش ضخامت در رویه‌های ناهمگن یکسان نیست؛ به طوری که افزایش ضخامت ورق آلومینیوم عمده‌تأ به افزایش نیروی ماکزیمم برخورد می‌انجامد، در حالی که افزایش ضخامت پوسته کامپوزیت الیاف شیشه با ایجاد تأخیر در وقوع آسیب‌های بین‌لایه‌ای، شاخص بازدهی جرمی سازه را در سطوح انرژی بالا تا 18 درصد ارتقا می‌دهد. در نهایت، تحلیل آماری و درونیابی ریاضی داده‌ها در محدوده آزمایش، تأیید کرد که روند جذب انرژی در نمونه‌های PLA/AL از الگوی غیرخطی اشباع‌شونده پیروی می‌کند، در حالی که در نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه، این رفتار در محدوده عملیاتی کاملاً خطی و پایدار است.

5- فهرست علائم

U انرژی (J)
m جرم جسم (kg)
g شتاب گرانش زمین (m/s²)

تحلیل مقایسه‌ای ضرایب این دو معادله، تفاوت بنیادین در مکانیزم‌های شکست پوسته‌های فلزی و کامپوزیتی را آشکار می‌سازد. در نمونه PLA/AL (رابطه 3)، منفی بودن ضریب درجه دوم ($a = -0.0071$) نشان‌دهنده تقعر رو به پایین منحنی است. این رفتار از نظر فیزیکی اثبات می‌کند که ورق آلومینیوم 2024 پس از تحمل کرنش‌های پلاستیک اولیه، با نزدیک شدن به سطوح انرژی بالاتر (30 ژول) دچار پدیده کارسختی، تسلیم موضعی و در نهایت اشباع ظرفیت¹ شده و نرخ رشد جذب انرژی آن کاهش می‌یابد. در نقطه مقابل، در نمونه PLA/Glass (رابطه 4)، ضریب درجه دوم مثبت حاصل شده است ($a = +0.0029$) که نشان‌دهنده تقعر رو به بالای منحنی است. این پدیده نشانه آن است که سازه حاوی رویه کامپوزیتی الیاف شیشه، برعکس نمونه آلومینیومی، در سطوح انرژی بالاتر نه تنها دچار اشباع نمی‌شود، بلکه راندمان جذب انرژی آن افزایش می‌یابد. دلیل فیزیکی این امر، فعال شدن متوالی و تصاعدی مکانیزم‌های شکست میکرومکانیکی درون‌لایه‌ای و بین‌لایه‌ای (مانند ترک‌خوردگی گسترده در ماتریس اپوکسی، لایه‌لایه‌شدگی و بیرون کشیدگی الیاف) در درگیری‌های شدیدتر دینامیکی است که ظرفیت جدیدی را برای استهلاک انرژی آزاد می‌کند.

3-3-2- درونیابی راندمان سیستم‌های هیبریدی در انرژی‌های میانی

یکی از مزایای بارز این مدل‌سازی ریاضی، توانایی درونیابی رفتار سازه در نقاط کور آزمایشگاهی (انرژی‌های آزموده نشده میان 10 تا 30 ژول) است. بدین منظور، مقادیر انرژی جذب شده و شاخص راندمان جذب انرژی ($U_{abs}/(U_{in} \times 100\%)$) برای دو سطح انرژی میانی 15 و 25 ژول محاسبه و در جدول 3 آورده شده است.

مستندات عددی جدول 3 تأییدکننده تحلیل‌های فیزیکی پیشین است. در انرژی میانی 15 ژول، نمونه تقویت شده با آلومینیوم به دلیل صلبیت و تسلیم اولیه سریع، راندمان بالاتری (81.4٪) نسبت به نمونه کامپوزیتی (74.9٪) دارد. اما با افزایش انرژی درونیابی شده به 25 ژول، مشاهده می‌شود که راندمان جذب انرژی در نمونه کامپوزیتی با جهشی چشمگیر به 82.5٪ رسیده و کاملاً خود را به سطح نمونه آلومینیومی (82.6٪) نزدیک می‌کند. این تحلیل ریاضی و درونیابی روند، اثبات می‌کند که ساختار هیبریدی کامپوزیت الیاف شیشه در

¹ Saturation Effect

h ارتفاع (cm)

$RMSE$ متوسط ریشه مربع خطا

R^2 ضریب تعیین

Ave مقدار متوسط

6- مراجع

- Impact," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 3, pp. 1994–2005, 2022.
- [15] Wang, G., Zhang, D., Wan, G., Li, B., Zhao, G., "Glass Fiber Reinforced PLA Composite With Enhanced Mechanical Properties, Thermal Behavior, And Foaming Ability," Polymer, Vol. 181, Art. 121803, 2019.
- [16] Fadzullah, S. H. S. M., Ramli, S. N. N., Mustafa, Z., Razali, A. S., Sivakumar, D., Ismail, I., "Low Velocity Impact Behaviour Of Pineapple Leaf Fibre Reinforced Polylactic Acid Biocomposites," Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, No. 1, 2020.
- [17] Davies, G. A. O., Zhang, X., "Impact Damage Prediction In Carbon Composite Structures," International Journal of Impact Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 149–170, 1995.
- [18] Zhu, R., Pan, E., Roy, A. K., "Molecular Dynamics Study Of The Stress-Strain Behavior Of Carbon-Nanotube Reinforced Epon 862 Composites," Materials Science and Engineering A, Vol. 447, No. 1–2, pp. 51–57, 2007.
- [19] Bagheri, R., Takieh Marouf, B., "Studies On The Mechanical Behavior Of Epoxy-Clay Nanocomposite," Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 59–64, 2007.
- [20] Avila, A. F., Soares, M. I., Silva Neto, A., "A Study On Nanostructured Laminated Plates Behavior Under Low-Velocity Impact Loadings," International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, No. 1, pp. 28–41, 2007.
- [21] Fan, J., Cantwell, W., Guan, Z., "The Low-Velocity Impact Response Of Fiber-Metal Laminates," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, No. 1, pp. 26–35, 2011.
- [22] Tsartsaris, N., Meo, M., Dolce, F., Polimeno, U., Guida, M., Marulo, F., "Low-Velocity Impact Behavior Of Fiber Metal Laminates," Journal of Composite Materials, Vol. 45, No. 7, pp. 803–814, 2011.
- [23] Lin, J. C., "Investigation Of Various Silica-Reinforced Polymeric Matrix Nanocomposites," Composite Structures, Vol. 84, pp. 125–131, 2008.
- [24] Yu, G. C., Wu, L. Z., Ma, L., Xiong, J., "Low Velocity Impact Of Carbon Fiber Aluminum Laminates," Composite Structures, Vol. 119, pp. 757–766, 2015.
- [25] Al-Behadili, A. J. M., Bedaiwi, B. O., "Experimental And Numerical Measurement Of The Impact Strength Of Poly-Lactic Acid Through A Low-Velocity Impact," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1094, No. 1, Art. 012171, 2021.
- [26] Siddiqui, M. A. S., Rabbi, M. S., Dewanjee, S., "Low-Velocity Impact Response Of Natural Fiber Reinforced Composites: A Comprehensive Review On Influential Parameters," Composites Part C: Open Access, Vol. 12, Art. 100422, 2023.
- [27] Usta, F., Türkmen, H. S., Scarpa, F., "Low-Velocity Impact Resistance Of Composite Sandwich Panels With Various Types Of Auxetic And Non-Auxetic Core Structures," Thin-Walled Structures, Vol. 163, Art. 107738, 2021.
- [28] Mokarrar Industrial Group, "Mokarrar Industrial Group Official Website," Available: <http://mokarrar.com/en>.
- [29] ASTM International, "Standard Test Method For Measuring The Damage Resistance Of A Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite To A Drop-Weight Impact Event," ASTM D7136/D7136M-15, West Conshohocken, PA, 2015.
- [30] Ray, A. K., "Regression Analysis And Curve-Fitting Of Energy Absorption Attributes In Composite Laminates Under Low-Velocity Impact," Journal of Composite Materials, Vol. 52, No. 12, pp. 1645–1658, 2018.
- [31] Tarfaoui, M., Moustabchir, H., "Mathematical Modeling And Trend Analysis Of Dynamic Response And Efficiency Of Sandwich Panels," Composite Structures, Vol. 210, pp. 432–445, 2019.
- [1] Mohammadi, I., Haghighi-Yazdi, M., Safarabadi, M., and Yousefi, A., "Crashworthiness Analysis Of A Composite Guardrail Under Impact Loading," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 237, No. 7, pp. 1651–1664, 2023.
- [2] Montazeri, A., Ahmadian, I., Bahmanpour, E., Saeedi, A., Safarabadi, M., "Mechanical Behaviors Of Star Honeycombs With Symmetry-Broken Lattices," European Journal of Mechanics - A/Solids, Vol. 113, Art. 105709, 2025.
- [3] Karami, S., Haghighi-Yazdi, M., Safarabadi, M., "Low-Velocity Impact Behavior Of 3D-Printed Sandwich Panels With Integrated Composite Face Sheets," Advanced Engineering Materials, Vol. 27, No. 4, Art. 2401923, 2025.
- [4] Montazeri, A., Rahmani, A., Safarabadi, M., "Performance And Damage Mechanism Assessment Of Sandwich Composites With Glass/Kenaf/Epoxy Skins And A Novel Core Using Quasi-Static Penetration," Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 44, No. 3, Art. 112, 2022.
- [5] Hosseinkhani, M., Haghighi-Yazdi, M., Safarabadi, M., "Investigation Of Viscoelastic Properties In Composite Sandwich Panels Subjected To Low-Velocity Impact: Experimental And Numerical Approaches," Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 25, No. 4, pp. 478–498, 2023.
- [6] Nur Ainin, F., Azaman, M. D., Abdul Majid, M. S., Ridzuan, M. J. M., "Low-Velocity Impact Behavior Of Sandwich Composite Structure With 3D Printed Hexagonal Honeycomb Core: Varying Core Materials," Functional Composites and Structures, Vol. 4, No. 3, Art. 035007, 2022.
- [7] Sadighi, M., Pamanen, T., Alderliesten, R., Sayeafabi, M., Benedictus, R., "Experimental And Numerical Investigation Of Fiber Metal Laminates," Applied Composite Materials, Vol. 19, No. 3–4, pp. 545–559, 2012.
- [8] Tabatabaee, M., Taheri-Behrooz, F., Razavi, S. M., Liaghat, G. H., "Electrical Conductivity Enhancement Of Carbon/Epoxy Composites Using Nanoparticles," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 4, pp. 605–614, 2019.
- [9] Razavi, S. M., Azhdari, S., Taheri-Behrooz, F., "Effect Of The Crude Oil Environment On The Electrical Conductivity Of The Epoxy Nanocomposites," Advances in Nano Research, Vol. 15, No. 4, pp. 285–294, 2023.
- [10] Razavi, S. M., Sadollah, A., Al-Shamiri, A. K., "Prediction And Optimization Of Electrical Conductivity For Polymer-Based Composites Using Design Of Experiment And Artificial Neural Networks," Neural Computing and Applications, Vol. 34, No. 10, pp. 7653–7671, 2022.
- [11] Sadollah, A., Razavi, S. M., Al-Shamiri, A. K., "Effect Of Bending Load On Electrical Conductivity Of Carbon/Epoxy Composites Filled With Nanoparticles Using Design Of Experiment And Artificial Neural Networks," Results in Engineering, Vol. 25, Art. 104174, 2025.
- [12] Razavi, M., Tabatabaee Ghomi, M., Taheri-Behrooz, F., Liaghat, G., "Effect Of Bending Load On The Electrical Conductivity Of Carbon/Epoxy Composites Filled With Nanoparticles," Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 32, No. 1, pp. 79–92, 2019.
- [13] Rezghi Maleki, H., Parvande, P., "Comparison Of Mechanical Properties And Low Velocity Impact Behavior Of Basalt/Epoxy And Basalt/Vinyl Ester Composites," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 11, No. 4, pp. 2584–2596, 2025.
- [14] Rezvani Tavakol, M. R., Tooski, M. Y., Jabbari, M., Javadi, M., "The Effect Of Graphene Nanoparticles On The Strength Of Sandwich Panel Structure Under Quasi-Static Loading And Low-Velocity