



Experimental and Numerical Analysis of the Response of Aluminum/Elastomer / Composite Multilayer Structure Against Impact Loading

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Jannesari Sh.¹,
Liaghat Gh¹,
Ahmadi H^{*}

How to cite this article

Jannesari Sh, Liaghat Gh, Ahmadi H, Experimental and Numerical Analysis of the Response of Aluminum/Elastomer/Composite Multilayer Structure Against Impact Loading. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(02):117-124.

¹ Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

h_ahmadi@modares.ac.ir

Article History

Received: December 29, 2024

Accepted: April 16, 2025

ePublished: May 3, 2025

ABSTRACT

The aim of the current research is to investigate the ballistic performance of the sandwich structure consisting of aluminum, glass/epoxy and elastomer composite, as well as the effect of adding a composite layer and sandwiching the structure. The investigated structure is a 4-layer structure including two layers of T-6061 aluminum as external surfaces, a glass/epoxy composite layer including 6 layers of woven glass fabric and a layer of elastomer mixed with natural rubber. The purpose of building such a structure is to benefit from all the mechanisms of energy absorption in high speed impact. The experimental part was done using a gas gun device and the numerical part was done using LsDyna software. In the following, the damage mechanisms of different layers and between layers have been investigated experimentally and numerically, and after that, the improvement of the ballistic performance of the structure compared to the two-layer structure of elastomer and aluminum has been investigated through the output speed of the impactor. Also, the efficiency of the 4-layer structure at different input velocities has been investigated, and by considering the absorbed energy, the optimal critical speed for the best performance is obtained.

Keywords Elastomer, High Velocity Impact, Sandwich Panel, Glass Epoxy Composite

CITATION LINKS

1- Characterization of glass laminate aluminium reinforced epoxy-a review 2- Fractographic observations on Dyneema® composites under ballistic impact 3- Measurements of residual strains in ceramic-elastomer composites with diffuse scattering of polarized neutrons 4- Layered polyurea of investigation numerical and... 5- Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact 6- Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating 7- Low-velocity impact response of composite laminates with steel and elastomer protective layer 8- Experimental, numerical and analytical study of ... 9- The effect of thin membrane restraint on the ballistic performance of armor grade ceramic tiles 10- Elastomer-steel laminate armor 11- Impact properties of novel corrosion resistant hybrid structures 12- Numerical and experimental study of... 13- Experimental and numerical investigation of the impact response of elastomer layered fiber metal laminates (EFMLs) 14- Numerical and experimental investigation of impact on bilayer aluminum-rubber composite plate 15- High strain-rate and quasi-static mechanical characteristics of the natural rubber-based elastomer nanocomposite reinforced with alumina nanoparticles 16- Energy absorption efficiency of carbon fiber reinforced polymer laminates under high velocity impact 17- An experimental investigation into the high velocity impact responses of S2-glass/SC15 epoxy composite panels with a gas gun

تحلیل تجربی و عددی پاسخ سازه چندلایه آلومینیوم / الاستومر/ کامپوزیت در برابر بارگذاری ضربه ای

شهیده جان نثاری^۱، غلامحسین لیاقت^۲، حامد احمدی^{۳*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

هدف پژوهش حاضر بررسی عملکرد بالستیکی سازه ساندویچی متشکل از آلومینیوم، کامپوزیت شیشه / اپوکسی و الاستومر و همچنین تأثیر ناشی از افزودن لایه کامپوزیت و ساندویچی کردن سازه می باشد. ساختار مورد بررسی یک سازه ۴ لایه شامل دو لایه آلومینیوم T-6061 به عنوان صفحات خارجی، یک لایه کامپوزیت شیشه/اپوکسی شامل ۶ لایه پارچه بافته شده شیشه و یک لایه الاستومر از نوع لاستیک طبیعی آمیخته شده است. هدف ساخت چنین سازه ای، بهره مندی از تمامی مکانیزم های جذب انرژی در ضربات سرعت بالا است. بخش تجربی با استفاده از دستگاه تفنگ گازی و بخش عددی نیز با استفاده از نرم افزار LsDyna انجام شده است. در ادامه مکانیزم های آسیب لایه های مختلف و بین لایه ای به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است و پس از آن از طریق سرعت خروجی ضربه زننده، بهبود عملکرد بالستیکی سازه در مقایسه با سازه دو لایه الاستومر و آلومینیوم بررسی شده است. همچنین بازه سازه ۴ لایه در سرعت های ورودی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و با در نظرگیری انرژی جذب شده سرعت بحرانی بهینه برای بهترین عملکرد به دست می آید.

کلیدواژه ها: الاستومر-ضربه سرعت بالا-سازه ساندویچی- کامپوزیت شیشه اپوکسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

*نویسنده مسئول: h_ahmadi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از موضوعات مهم در مهندسی مکانیک، تحلیل و بررسی حرکت و نفوذ پرتابه ها در اهداف است زیرا صنایع متعددی همچون هوایی، نظامی و شهری نیاز مبرم به سازه هایی با مقاومت بالا در برابر ضربه دارند. تاکنون تحلیل های زیادی در زمینه بررسی رفتار مواد با تمرکز بر جذب انرژی و طراحی سازه هایی با توان بالا برای تحمل ضربه انجام شده است. در گذشته در ساخت بسیاری از سازه های مقاوم در برابر ضربه از فولاد استفاده می شد اما این سازه ها با مشکل وزن زیاد به دلیل چگالی بالای فولاد برخورد می کردند (۱). در کاربردهای مهندسی، امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص موردنظر را فراهم نماید، وجود ندارد و اغلب به تلفیق خواص مواد، نیاز است. یکی از سازه هایی که در ضربات بالستیک به طور گسترده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است، لمینیت های فلزی - الیافی می باشد که یکی از پرکاربردترین آنها لمینیت تشکیل شده از آلومینیوم و الیاف شیشه است. در این نوع لمینیت که با نام تجاری گلیر شناخته می شود تعداد معینی

از لایه های کامپوزیتی اپوکسی / فیبر شیشه در بین دو یا چند لایه از فلز آلومینیوم قرار داده می شوند؛ بنابراین سازه حاصل دارای وزن پایین و سفتی بالا خواهد بود^[۱]. اما این سازه نیز به دلیل سخت بودن شکل پذیری پایینی دارد. یکی از راه حل های موجود جایگزینی یک یا چندلایه کامپوزیتی با یک لایه الاستومری می باشد. الاستومرها موادی هستند که قابلیت ارتجاعی بسیار بالایی دارند، به حدی که بعد از اعمال نیرو به آنها و حذف نیرو، قطعه الاستومری در اندک زمانی به حالت اولیه خود بازمی گردد. از این مواد به دلیل مدول پایین، قابلیت شکل پذیری، تحمل تغییر شکل های بزرگ و اتلاف انرژی بالا به عنوان عامل کاهش آسیب های ناشی از بارگذاری انفجاری و ضربه ای استفاده می شود. به طور مثال جاذب های شوک لاستیکی با جذب انرژی، شوک و نیروی انتقالی کمتر را به سطح محافظت شده منتقل می کند^[۲]. افزودن لایه الاستومری سبب بهبود خواص بالستیکی چندلایه حاصل خواهد شد به گونه ای که کاهش سرعت به ازای واحد دانسیته سطحی افزایش یافته^[۳-۴] و یا مساحت ناحیه آسیب در ورق فلزی کاهش می یابد^[۵-۶]. بررسی ها نشان می دهد که اضافه کردن لایه الاستومری به لایه های فلزی و کامپوزیتی، نه تنها بار آستانه آسیب را کم میکند، بلکه تخریب لایه های دیگر را هم به تاخیر می اندازد. تغییر شکل های موضعی ولی بزرگ در اطراف محل برخورد بار ضربه، نشان دهنده این است که سطح بحرانی آسیب بیشتری دیده است. همین امر باعث اتلاف بخش زیادی از انرژی شده که منجر می شود تا جدایش بین لایه ای هم کمتر بشود. بر اساس این نوع تخریب، انتظار میرود که سازه های همراه با لایه الاستومری نسبت به موارد مشابه که الاستومر ندارند، کارایی بیشتری داشته باشد^[۷].

تقی پور و همکاران^[۸] یک مدل تحلیلی برای پدیده برخورد و نفوذ در اهداف کامپوزیتی ارائه کردند که با بررسی مکانیزم های جذب انرژی و مقایسه با انرژی کل گلوله در هنگام برخورد، انرژی باقیمانده پرتابه را پس از خروج از هدف پیشبینی می کند سروا^[۹] در سال ۲۰۰۷ بر روی قرار دادن لایه غشایی الاستومر در کنار سرامیک تحلیل عددی انجام داد و متوجه شد قرار دادن این لایه منجر به افزایش ۰/۲۵ درصدی عملکرد سازه می شود. رولند و همکاران^[۱۰] در سال ۲۰۱۰، آزمایش هایی بر روی سازه متشکل از الاستومر و فولاد انجام دادند و دریافتند الاستومر استفاده شده روی فولاد خواص بالستیک و مقاومت در برابر نفوذ را افزایش می دهد. سارلین و همکاران^[۱۱] در سال ۲۰۱۴ آزمایش هایی بر روی کامپوزیت متشکل از الاستومر، فلز و کامپوزیت انجام دادند و مشاهده کردند استفاده از الاستومر منجر به کاهش ۵۰ درصدی مساحت تخریبی شد. خدادادی و همکاران^[۱۲] در سال ۲۰۱۹ پنل الاستومری هایپرلاستیک در ضربه سرعت بالا را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از دو نوع رابر با بخش سخت کم و زیاد استفاده کردند و شبیه سازی با نرم افزار ال اس داینا را انجام دادند. آنها به این

شتاب دهنده و اکسید روی و استتاریک اسید نقش فعال کننده سیستم پخت را دارد. تقویت کننده ها شامل دوده و کلسیم کربنات به این ترکیب اضافه شدند. دوده نیز در افزایش استحکام و سختی ترکیب موثر است. روغن اسپیندل نیز نقش نرم کننده دارد. از رزین کومارون نیز برای افزایش چسبندگی بین اجزای کامپند و همچنین لاستیک طبیعی به کار برده شده باشد. نسبت ترکیب استفاده شده به صورت جدول ۱ می باشد.

جدول ۱) ترکیب مواد استفاده شده در الاستومر^[12]

اجزا	مقدار استفاده شده	
	به درصد	به Phr
لاستیک طبیعی (NR-SMR20)	۴۵/۵۷	۱۰۰
دوده (Carbon black - N330)	۲۷/۳۴	۶۰
کلسیم کربنات (CaCO ₃)	۱۳/۶۷	۳۰
روغن اسپیندل (Spindle oil)	۶/۸۳	۱۵
اکسید روی (ZnO)	۲/۲۷	۵
رزین کومارون (Coumarone resin)	۲/۲۷	۵
سولفور (S)	۰/۹۱۱	۲
استتاریک اسید (Stearic acid)	۰/۴۵۵	۱
ولکاسیت D (Volcacit D)	۰/۳۱۹	۰/۷
ولکاسیت M (MBTS) M	۰/۳۱۹	۰/۷

ساخت الاستومر متشکل از ترکیب مواد بالا در پژوهشکده پلیمر انجام شد. در این پژوهش ۱۰ دسته درصد وزنی مختلف از آلومینا مورد بررسی قرار گرفت. نمونه ها با درصد وزنی ۵۰ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ و ۶۰ و ۷۰ و ۸۰ و ۹۰ و ۱۰۰ درصد وزنی آلومینا ساخته شدند. ابتدا تمام مواد تشکیل دهنده بر اساس نسبت جدول ۱ و همچنین محاسبه مقدار جرم لازم بر اساس درصدهای بالا از آلومینا آماده سازی شد. سپس با استفاده از غلتک آزمایشگاهی با یکدیگر ترکیب شدند. در این مرحله در ابتدا لاستیک طبیعی به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۴۰ دور بر دقیقه بر روی غلتک قرار گرفت و تا جداسازی و تبدیل به یک ورق نازک صورت گیرد. در مرحله دوم فیلرها، در مرحله سوم دوده و روغن اسپیندل در مرحله چهارم کلسیم کربنات و در مرحله آخر سیستم پخت به ترکیب اضافه شدند. تمام این مراحل در دمای ۴۰ تا ۵۰ درجه و به ترتیب به مدت ۵ و ۱۰ دقیقه مخلوط شدند. در نهایت نیز مخلوط از روی غلتک برداشته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت. رعایت دقت در اعمال دمای مطلوب در مدت زمان لازم برای ترکیب مواد بالا از اهمیت زیادی برخوردار است. چرا که عدم رعایت این موارد منجر به عدم تکمیل فرایندهای پخت و در نتیجه ایجاد نمونه های نامناسب می شود.

آلومینیوم

آلومینیوم مورد استفاده در این پژوهش از نوع 6061-T6 و با ضخامت ۰/۵ میلی متر است (تهیه شده از شرکت AMAG rolling GmbH). پس از برش ورقه های آلومینیوم در ابعاد ۱۲*۱۲ میلی

نتیجه رسیدند رابر سخت تر توان جذب انرژی بیشتری دارد. همچنین با افزایش قطر ضربه زننده میزان جذب انرژی نیز افزایش می یابد و با افزایش سرعت مساحت ضربه زننده زیاده تر می شود. طاهرزاده و همکاران^[13] در سال ۲۰۲۰ بر روی کامپوزیت شامل دو لایه آلومینیومی و یک لایه میانی ساخته شده از اپوکسی و الاستومر پژوهشی انجام دادند و اثر ضربه سرعت بالا را بر این کامپوزیت مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند استفاده از لایه الاستومری هر چه به سطح جلویی نزدیکتر باشد در جذب انرژی موثرتر است همچنین مشاهده کردند تاثیر مثبت افزودن الاستومر در ضربات سرعت بالا محسوس تر است. خدادادی و همکاران^[14] در سال ۲۰۲۰ نیز ضربه سرعت بالا بر روی کامپوزیت تشکیل شده از آلومینیوم و الاستومر را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند افزایش ضخامت لایه الاستومری نیز جذب انرژی را افزایش می دهد.

در این پژوهش سازه ای متشکل از دو لایه آلومینیوم و یک لایه کامپوزیت شیشه اپوکسی و یک لایه الاستومر طراحی شد و عملکرد بالستیک آن به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت تا تاثیر تبدیل شدن سازه دو لایه به سازه چهار لایه ساندویچی مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین با انجام آزمایش و شبیه سازی در سرعت های مختلف، جذب انرژی در حالت های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- آزمایش های تجربی

۲-۱- مواد مورد استفاده

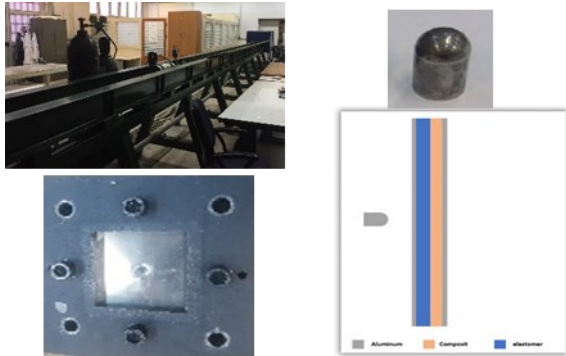
کامپوزیت شیشه اپوکسی

این کامپوزیت به صورت ۶ لایه الیاف شیشه بافته شده و رزین ML-506 است. در این سازه رزین نقش ماتریس و الیاف شیشه تقویت کننده هستند. کامپوزیت با استفاده از روش لایه چینی دستی ساخته شد لایه های الیاف با مقدار مناسبی از رزین در کنار یکدیگر قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار تقریبی ۸۰۰ مگاپاسکال قرار گرفتند. در مرحله بعد نیز به مدت یک هفته در دمای محیط قرار گرفت تا فرایند آماده سازی به صورت کامل انجام شود. کامپوزیت ها ابتدا در ابعاد ۵۰ در ۵۰ ساخته شده و سپس به اندازه ۱۲ در ۱۲ برش داده شده و مراحل آماده سازی آن بر اساس استاندارد ASTM D2093 صورت پذیرفت.

الاستومر بر پایه لاستیک طبیعی

ماده زمینه نانو کامپوزیت ساخته شده ترکیب اصلاح شده ای است که جز اصلی آن لاستیک طبیعی یا NR با ویسکوزیته مونی ۶۵ می باشد. ویژگی های لاستیک طبیعی شامل قابلیت میرایی بالا، انعطاف پذیری مناسب و مقاومت پارگی مطلوب باعث استفاده از این ماده به عنوان ماده پایه شده است. برای ایجاد یک سیستم پخت بهینه از اکسید روی، استتاریک اسید، دو نوع ولکاسیت و سولفور استفاده شده است. در این سیستم ولکاسیت ها نقش

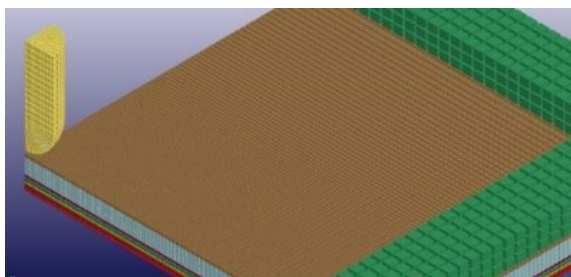
بررسی نحوه شبیه سازی و دریافتن نتایج برای نفوذ گلوله سرکروی در ساندویچ پنل متشکل از لایه های آلومینیومی و هسته کامپوزیتی و الاستومری در سرعت بالستیک پرداخته می شود. در این پژوهش، نرم افزار اجزاء محدود ال اس داین، استفاده شده است.



شکل (۱) چینش لایه ها، قالب، پرتابه و تفنگ گازی

۱-۳- ایجاد هندسه مدل و مش بندی

با توجه به تقارن هندسه مورد بررسی در دو جهت برای کاهش حجم محاسبات تنها یک چهارم از هندسه مدل شده است و شرایط مرزی متقارن بر روی صفحه تقارن اعمال می شود. برای مدلسازی هندسه سازه از نرم افزار آباکوس استفاده شد تا بتوان اندازه مش ها در نواحی مختلف را کنترل کرد به عبارتی در نقاط نزدیک تر به محل برخورد بایستی اندازه مش ها ریزتر باشد تا جواب ها دقیق تر شوند اما در نقاط دورتر اندازه مشها درشت تر باشد تا سرعت حل بالا رود. انتخاب تعداد و نوع مش بندی مناسب در حل عددی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بایستی تعداد بهینه از المان انتخاب شود تا ضمن کوتاه بودن زمان حل مساله جواب دقیقی نیز ارائه دهد. بر اساس بررسی انجام شده از تعداد المان ۳۰۰۰۰۰ به بعد در جواب مساله تغییری ایجاد نمی شود. بنابراین برای کوچکترین ابعاد المان برابر مقدار ۰/۲۱ انتخاب شد (شکل ۲).



شکل (۲) شماتیک شبیه سازی

۲-۳- مدل مواد

با توجه به نرخ کرنش بالای فرایند ضربه آلومینیوم مدل جانسون کوک استفاده شده است. برای کامپوزیت از مدل MAT-59 استفاده شده است. در نرم افزار ال اس داین مدل ماده های متعددی برای

متر مربع، با توجه به استاندارد ASTM D2651 فرایند آماد سازی سطح انجام شد. این فرایند شامل چربی زدایی با استون، شستشو با آب، ایجاد خراش ۴۵ درجه با سمباده بر روی سطح ورق و شستشوی نهایی با آب است.

۲-۲- آزمایش نمونه ها

پرتابه و قالب

گلوله مورد بررسی در این پژوهش از نوع سرکروی است. برای ساخت گلوله، فولاد ۲۲۱۰ معروف به فولاد نقره به قطر ۱۰ میلیمتر تهیه شد. طبق نقشه مشخص و استفاده از تراش CNC گلوله ها تولید و در نهایت تا ۵۳ راکول C سخت کاری می شوند. بدین ترتیب می توان گلوله ها را صلب در نظر گرفت. جرم نهایی گلوله ها ۹/۳۳ گرم می باشد. نمونه ها داخل یک فیکسچر محکم شده به صورتی که تمام لبه ها مقید می شوند. جنس فیکسچر از فولاد بوده و ابعاد ناحیه گشودگی آن ۱۰۰*۱۰۰ میلی متر مربع است.

دستگاه تفنگ گازی

دستگاه تفنگ گازی برای آزمایش های مکانیک ضربه، در گستره متنوعی از سرعت های برخورد، از ده تا چند هزار متر بر ثانیه مورد استفاده قرار می گیرد. بارگذاری نمونه ها و قطعات بوسیله شلیک پرتابه با سرعت های مختلف انجام می شود. پارامترهای سرعت بالستیک، سرعت باقی مانده پس از عبور و ظرفیت جذب انرژی بوسیله این دستگاه قابل اندازه گیری است. در این دستگاه هوا با یک فشار کنترل شده پشت یک شیشه سولونوئیدی قرار گرفته و با باز شدن شیر گلوله توسط این هوای فشرده شده وارد یک لوله ۶ متری شده و شتاب میگیرد. در انتهای لوله و دقیقا قبل از برخورد به هدف سرعت گلوله توسط یک سیستم سرعت سنج لیزری اندازه گیری خواهد شد. در پشت هدف نیز یک کرومोगراف قرارداده شده که می توان به واسطه آن سرعت خروجی را اندازه گیری کرد.

۲-۳- روش انجام آزمایش سرعت بالا

آزمایش انجام شده بوسیله تفنگ گازی در سرعت ۱۰۰ و ۱۴۵ و ۱۷۰ و ۱۸۰ و ۱۹۰ متر بر ثانیه انجام شد. بعد از برخورد پرتابه با هدف و عبور آن، سرعت توسط یک دوربین سرعت بالا اندازه گیری شد. روش کار این دوربین برای ثبت سرعت خروجی بر مبنای سایه نگاری است. بدین صورت که یک منبع نور یکنواخت روبروی دوربین و بر روی دستگاه تفنگ گازی نصب شده است و هنگامی پرتابه از قطعه خارج می شود، سایه آن توسط دوربین ضبط شده و با آنالیز نرم افزاری سرعت خروجی مشخص می شود.

۳- شبیه سازی عددی

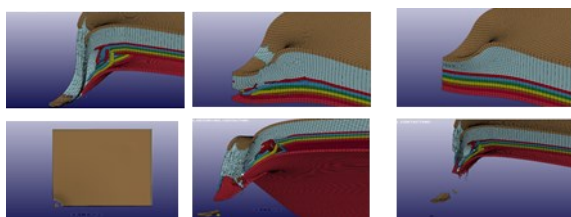
بایستی در نظر گرفته شود که امکان انجام آزمایش برای همه نمونه ها و همه شرایط وجود ندارد بنابراین با در نظرگیری پیشرفت نرم افزارهای تحلیلی و توسعه کدهای مرتبط استفاده از روش عددی نیز ضروری است. در نظرگیری شرایط به صورت صحیح در تحلیل عددی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در این بخش به

کامپوزیتی به دلیل نزدیک بودن چگالی ها موج کششی بازگشتی وجود ندارد و در نتیجه جدایش نیز بسیار جزیی است. اما اختلاف چگالی قابل توجه آلومینیوم و دو لایه دیگر منجر به افزایش میزان تنش بازگشتی و در نتیجه فراهم شدن شرایط جدایش می شود. همانطور که مشاهد می شود در وجه جلویی بر روی آلومینیوم پلاگ برشی شکل گرفته است با توجه به نیروی بسیار زیاد که در همان لحظه اول برخورد بر روی آلومینیوم وارد می شود تنش های برشی و محیطی ایجاد می شود که منجر به تخریب این لایه می شود. تنش های خارج از صفحه خمشی نیز منجر به ایجاد ترک های شعاعی در آلومینیوم می شود. در لایه پشته آلومینیوم نیز پتال های سه و چهارپر تشکیل شده است که ناشی از تنش های شعاعی و محیطی موج تنش می باشد.

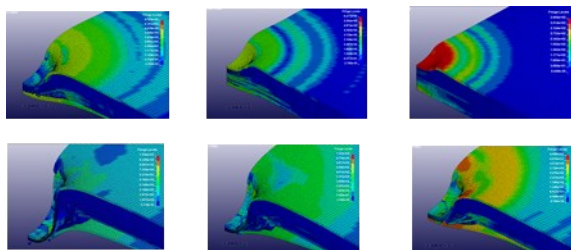
اما در لایه کامپوزیتی شکست برشی مشاهده نمی شود و تخریب این لایه در اثر لایه لایه شدگی رخ می دهد در حالی که چنانچه لایه الاستومری در جلوی کامپوزیت نبود شکست برشی برای آن رخ می داد. حضور لایه الاستومری منجر به جذب مقداری از انرژی ناشی از ضربه و جلوگیری از انتقال آن به لایه های پشتی می شود. علاوه بر آن در پخش کردن و انتقال غیر متمرکز نیروها بسیار موثر است. در لایه الاستومری نیز پیورینگ رخ می دهد و بدون درگیر کردن مساحت بزرگ گلوله از این لایه عبور می کند. به عبارتی به دلیل توانایی الاستومرها در تحمل تغییر شکل های بزرگ بدون تخریب زیاد انرژی ناشی از ضربه مستهلک می شود.



شکل (۳) نتایج تست ضربه سرعت بالا در سازه چهارلایه



شکل (۴) شبیه سازی سازه در ضربه سرعت بالا در سازه چهارلایه



شکل (۵) تنش ون میزز سازه چهارلایه

لاستیک تعریف شده است. در این پژوهش از مدل مونی ریولین استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (۱)$$

در این معادله C_{10} و C_{01} ضرایب ثابتی هستند که به صورت تجربی به دست می آیند.

با توجه به اینکه مدل ماده استفاده شده فاقد معیار تخریب است مدل ماده MAT-ADD-EROSION برای کامپوزیت و الاستومر به مدل ماده فوق اضافه می شود. بر اساس فرضیات ناشی مشاهدات تجربی می توان فرض کرد پرتابه صلب است و مدل ماده MAT-RIGID برا آن انتخاب شده است.

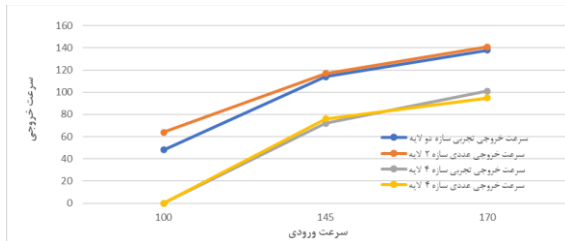
۴- نتایج و بحث

۴-۱- مکانیزم های تخریب

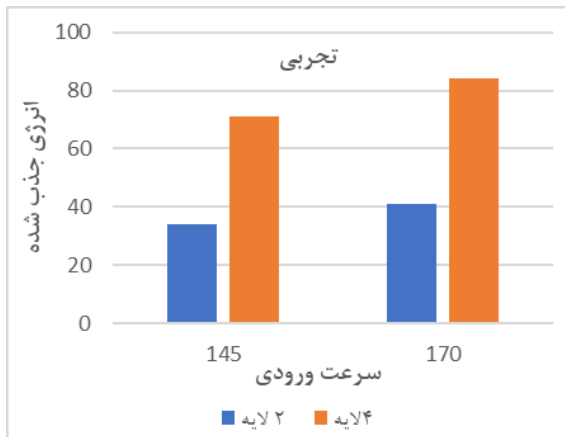
در فرایند نفوذ ناشی از ضربه سرعت بالا در ابتدا موج های فشاری شکل می گیرد و به سرعت شروع به حرکت در جهت ضخامت می کند اما هنگامی که از یک لایه به لایه دیگر انتقال می یابد بخشی از آن عبور کرده و بخشی نیز به صورت کششی باز می گردد. موج کششی بازگشتی عامل اصلی لایه لایه شدگی داخلی و بین لایه ای مختلف می شود.

در آزمایش ضربه سرعت بالا به صورت کلی چهار مرحله شامل تماس، نفوذ، عبور و خروج پرتابه رخ می دهد. در مرحله اول هنگامی که پرتابه با نمونه برخورد و تماس پیدا می کند، این امر باعث فشردگی در مواد سازنده پرتابه و قطعه می شود. حال اگر فرض کنیم پرتابه صلب باشد یا سختی پرتابه به مراتب بیشتر از قطعه نمونه یا هدف باشد آنگاه یک جریان فشردگی در طول ضخامت ایجاد می شود که آغازگر مرحله دوم یعنی نفوذ است. این جریان فشردگی در واقع همان موج تنش فشاری ناشی از ضربه است که تا رسیدن این موج به پشت هدف نیز ادامه پیدا می کند و در حد محدودتری نیز در جهت شعاعی هدف را تحت تاثیر قرار می دهد.

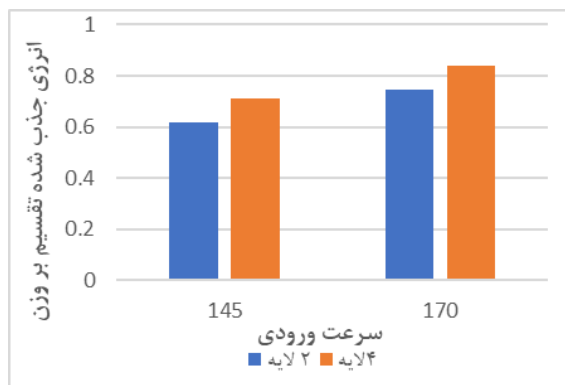
برای بررسی دقیق نمونه ها و نحوه تخریب آنها، نمونه ها از طریق واترجت برش خوردند تا جدایش لایه ها و مکانیزم های تخریب لایه های داخلی با دقت بیشتری مورد تحلیل قرار گیرد (شکل ۳). همانطور که در تصاویر نتایج تجربی و عددی مشاهده می شود (شکل ۳ و ۵) جدایش کامل بین لایه های کامپوزیت و آلومینیوم پشتی رخ داده است که البته با توجه به اینکه آلومینیوم در آخرین لایه قرار دارد و تمامی نیروی وارده ناشی از ضربه را در مرحله آخر دریافت کرده و هیچ مستهلک کننده ای در پشت خود ندارد این موضوع توجیه پذیر است. اما لایه جلویی آلومینیوم رفتار متفاوتی از خود بروز می دهد چرا که توسط لایه الاستومری حفاظت می شود. البته در انتقال امواج از لایه الاستومری به لایه



شکل ۶) سرعت خروجی سازه های دو و چهار لایه



شکل ۷) انرژی جذب شده تجربی و عددی سازه های دو و چهار لایه



شکل ۸) انرژی جذب شده تقسیم بر وزن سازه های دو و چهار لایه

همانطور که دیده می شود بیشترین مقدار جذب انرژی در سرعت ورودی ۱۷۰ و ۱۸۰ متر بر ثانیه است. این پدیده توسط ونگ و همکاران [16] در کامپوزیت های کربن/اپوکسی و نیز توسط واندراکال

۳-۴- تأثیر استفاده از سازه ساندویچی بر عملکرد بالستیکی و جذب انرژی نمونه

در پژوهشی که قبلاً توسط خدادادی و همکاران انجام شد عملکرد بالستیکی سازه متشکل از یک لایه آلومینیوم و یک لایه الاستومری در سرعت های ۱۰۰ و ۱۴۵ و ۱۷۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت [14]. هدف این پژوهش بررسی شرایط عملکرد بالستیکی سازه در صورت تبدیل به سازه ساندویچی است. در این حالت دو لایه آلومینیوم و کامپوزیتی به سازه اضافه می شود. در حالتی که سرعت ورودی ۱۰۰ متر بر ثانیه باشد گلوله موفق به عبور از سازه ۴ لایه نشده و سرعت خروجی صفر می شود. همانطور که مشاهده می شود با افزایش سرعت ورودی سرعت خروجی به صورت قابل توجهی افزایش می یابد اما با تبدیل سایز ۲ لایه به ۴ لایه سرعت خروجی به مراتب کمتر می شود که نتیجه این موضوع افزایش قابل توجه جذب انرژی توسط سازه است (شکل ۶ و ۷). همچنین مشاهده می شود که تطابق مناسبی بین نتایج عددی و تجربی وجود دارد. اما نکته قابل توجه افزایش وزن سازه در اثر تبدیل سازه ۲ لایه به سازه ۴ لایه است که ممکن است در طراحی برخی کاربردها حائز اهمیت باشد. وزن سازه دو لایه ۵۵ گرم و وزن سازه ۴ لایه ۱۰۰ گرم است. بنابراین پارامتر انرژی تقسیم بر وزن نیز محاسبه شد که حتی با در نظر گیری وزن نیز افزایش ۱۵ درصدی بازده سازه چهار لایه مشاهده می شود (شکل ۸). لازم بذکر است تمام تست ها ۵ بار با شرایط مشابه تکرار شدند و داده های پرت حذف شده و نتایج تجربی حاصل میانگین سرعت های خروجی حاصله است. همانطور که در نمودار زیر نیز مشاهده می شود اختلاف نتایج تجربی و عددی در حالت های مختلف، در بیشترین حالت ۳۳ درصد و کمترین حالت ۲/۵ درصد است.

همچنین در پژوهش دیگری که توسط نورایی [15] انجام شد تک لایه الاستومر تحت ضربه سرعت بالا بررسی شده بود که سرعت خروجی در آن حال برای سرعت ورودی حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه، ۸۵ متر بر ثانیه است. در نتیجه همانطور که نتایج نشان می دهند، استفاده از چند لایه به طرز قابل توجهی عملکرد سازه را بهبود می دهد.

۳-۴- تأثیر افزایش سرعت ضربه زننده بر سرعت خروجی در سازه ۴ لایه

در این مرحله داده های عددی و تجربی مربوط به انجام تست تفنگ گازی و شبیه سازی با نرم افزار LsDyna، در ۴ سرعت مختلف در سازه ۴ لایه مورد بررسی قرار می گیرد و جذب انرژی در حالت های مختلف با یکدیگر مقایسه می شود. همانگونه که از شکل مشخص است، عملکرد بالستیکی نمونه ها نسبت به سرعت ضربه زننده بسیار حساس بوده و مقادیر متغیری را نشان میدهد. این موضوع نشان میدهد که تغییرات سرعت ضربه زننده منجر به تغییر در مقدار انرژی جذب شده می شود.

- در اثر تبدیل سازه دو لایه به چهار لایه سرعت مانده به صورت قابل توجهی کاهش می یابد
- با در نظرگیری وزن سازه ها، پارامتر انرژی تقسیم بر وزن سازه چهار لایه حدود ۱۵ درصد بیش از سازه دو لایه است.
- جذب انرژی سازه ۴ لایه در یک محدوده مشخص از سرعت ورودی، در بهترین حالت قرار دارد که این سرعت در حدود ۱۷۰-۱۸۰ متر بر ثانیه است.

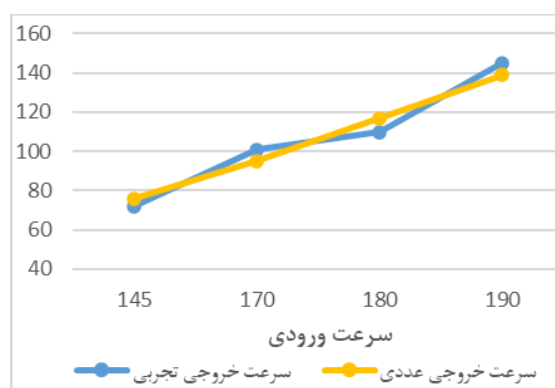
تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Patil NA, Mulik SS, Wangikar KS, Kulkarni AP. Characterization of glass laminate aluminium reinforced epoxy-a review. *Procedia Manufacturing*. 2018 Jan 1;20:554-62.
- 2- Greenhalgh ES, Bloodworth VM, Iannucci L, Pope D. Fractographic observations on Dyneema® composites under ballistic impact. *Composites part A: Applied science and manufacturing*. 2013 Jan 1;44:51-62.
- 3- Zajac W, Boczkowska A, Babski K, Kurzydowski KJ, Deen PP. Measurements of residual strains in ceramic-elastomer composites with diffuse scattering of polarized neutrons. *Acta materialia*. 2008 Dec 1;56(20):5964-71.
- 4- Mendis P, Raman NS, Ngo T, Mohotti J. 2014, "layered polyurea of investigation numerical and projectile velocity high to subjected plates aluminium" *Structures Analytical*, Vo107.
- 5- Mohotti D, Ngo T, Mendis P, Raman SN. Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. *Materials & Design* (1980-2015). 2013 Dec 1;52:1-6.
- 6- Xue L, Mock Jr W, Belytschko T. Penetration of DH-36 steel plates with and without polyurea coating. *Mechanics of materials*. 2010 Nov 1;42(11):981-1003.
- 7- Düring D, Weiß L, Stefaniak D, Jordan N, Hühne C. Low-velocity impact response of composite laminates with steel and elastomer protective layer. *Composite Structures*. 2015 Dec 15;134:18-26.
- 8- Taghipoor H, Malekzade FK, Bigdeli A. Experimental, numerical and analytical study of energy absorption in high velocity penetration phenomena on composite targets.
- 9- Sarva S, Nemat-Nasser S, McGee J, Isaacs J. The effect of thin membrane restraint on the ballistic performance of armor grade ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2007 Feb 1;34(2):277-302.
- 10- Roland CM, Fragiadakis D, Gamache RM. Elastomer-steel laminate armor. *Composite structures*. 2010 Apr 1;92(5):1059-64.

و همکاران [17] در کامپوزیت های شیشه/اپوکسی مشاهده گردیده و به وجود یک سرعت بحرانی نسبت داده شده است. زمانی که سرعت برخورد از مقادیر کمتر از سرعت بحرانی به مقادیر بیشتر از آن افزایش پیدا میکند، مکانیزمهای گسیختگی از مودهای تغییر شکل گلوبال و نیز آسیب کششی به مود گسیختگی برشی لوکال تغییر می یابند؛ در نتیجه بازدهی سازه کاهش پیدا می کند. با توجه به رخداد این کاهش در انرژی جذب شده، در اینجا انتظار میرود که سرعت بحرانی در محدوده ۱۷۰ تا ۱۸۰ متر بر ثانیه باشد. همانگونه که از نمودار برمی آید، به دلیل تکرار آزمایش ها و حذف داده های پرت مقادیر عددی نزدیکی خوبی با مقادیر حاصل از آزمایشات تجربی داشته و مدلسازی عددی میتواند به درستی رفتار چندلایه را پیشبینی کند.



شکل ۹) سرعت خروجی سازه بر حسب سرعت ورودی



شکل ۱۰) انرژی جذب شده تجربی و عددی سازه در سرعت های ورودی مختلف

۵- نتیجه گیری

- در بررسی تخریب ناشی از ضربه در تمامی آزمایش ها جدایش کامل بین لایه آلومینیومی و لایه های دیگر رخ داده است اما بین لایه های کامپوزیت و الاستومر جدایش جزئی است.
- مقدار تخریب شده الاستومر بسیار اندک است به طوری که مساحت تخریب آن از سطح مقطع گلوله نیز کمتر است.
- در اثر حضور الاستومر لایه لایه شدگی در کامپوزیت رخ داده است و شکست برشی دیده نمی شود.

- 11- Sarlin E, Apostol M, Lindroos M, Kuokkala VT, Vuorinen J, Lepistö T, Vippola M. Impact properties of novel corrosion resistant hybrid structures. *Composite structures*. 2014 Feb 1;108:886-93.
- 12- Amin Khodadadi · Gholamhossein Liaghat, · Hamed Ahmadi · Ahmad Reza Bahramian · Yavar Anani · Omid Razmkhah · Samaneh Asemeni, 2019, "Numerical and experimental study of impact on hyperelastic rubber panels" *Iranian Polymer Journal*, Vo. 28, pp.113-122.
- 13- Taherzadeh-Fard A, Liaghat G, Ahmadi H, Razmkhah O, Charandabi SC, Zarezadeh-mehrizi MA, Khodadadi A. Experimental and numerical investigation of the impact response of elastomer layered fiber metal laminates (EFMLs). *Composite Structures*. 2020 Aug 1;245:112264.
- 14- Khodadadi A, Liaghat G, Shahgholian-Ghahfarokhi D, Chizari M, Wang B. Numerical and experimental investigation of impact on bilayer aluminum-rubber composite plate. *Thin-Walled Structures*. 2020 Apr 1;149:106673.
- 15- Nouraei M, Liaghat G, Ahmadi H, Bahramian AR, Taherzadeh-Fard A, Vahid S. High strain-rate and quasi-static mechanical characteristics of the natural rubber-based elastomer nanocomposite reinforced with alumina nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2023 Sep;42(17-18):871-92.
- 16- Wang B, Xiong J, Wang X, Ma L, Zhang GQ, Wu LZ, Feng JC. Energy absorption efficiency of carbon fiber reinforced polymer laminates under high velocity impact. *Materials & Design*. 2013 Sep 1;50:140-8.
- 17- VanderKlok A, Stamm A, Dorer J, Hu E, Auvenshine M, Pereira JM, Xiao X. An experimental investigation into the high velocity impact responses of S2-glass/SC15 epoxy composite panels with a gas gun. *International Journal of Impact Engineering*. 2018 Jan 1;111:244-54.