

## بررسی تجربی نفوذ پرتابه در صفحات چندلایه فلز-الیاف (Glare)

حمیدرضا زارعی<sup>۱</sup>، علیرضا داودی نیک<sup>۲</sup>، علیرضا دل آرا<sup>۳</sup>

مرکز تحصیلات تکمیلی

دانشگاه هوایی شهید ستاری

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۱/۲۱)

### چکیده

در مقاله حاضر با استفاده از آزمایش‌های تجربی، برخورد بالستیک پرتابه‌ها به اهداف چند لایه فلز-الیاف مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور صفحات مرکب از جنس شیشه/اپوکسی و چندلایه فلز-الیاف متشکل از لایه‌های نازک آلومینیوم و شیشه/اپوکسی که در اصطلاح گلار نامیده می‌شوند، با ضخامت‌های مختلف به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده است. سپس صفحات ساخته شده، مورد آزمایش نفوذ بالستیک با سرعت پرتابه برابر با ۷۲۰ متر بر ثانیه قرار گرفتند. به منظور برآورد انرژی جذب‌شده در صفحات، از صفحات شاهد فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در پشت صفحات چندلایه فلز-الیاف استفاده شده است و سپس از میزان برآمدگی بوجود آمده در صفحات فولادی، با استفاده از یک روش تجربی-تحلیلی میزان انرژی جذب شده در صفحات چند لایه فلز-الیاف برآورد شده است. همچنین انرژی جذب‌شده در صفحات چندلایه فلز-الیاف و صفحات شیشه/اپوکسی با ضخامت برابر مقایسه شده است. نتایج نشانگر این است که صفحات چندلایه فلز-الیاف دارای قابلیت جذب انرژی بالاتری نسبت به صفحات شیشه/اپوکسی با ضخامت برابر می‌باشد. در نهایت با استفاده از نتایج آزمایش‌های تجربی یک روش تحلیلی به منظور برآورد انرژی مورد نیاز برای نفوذ پرتابه در اهداف گلار بسط داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** ضربه بالستیک، گلار، جذب انرژی

## Experimental Penetration Investigation of Projectile in Fiber Metal Laminates (Glare)

H.R. Zarei, A.R. Davoodinik, A.R. Delara

Graduate School

Shahid Sattari Aeronautical University

(Received: 06 November, 2013; Accepted: 10 April, 2014)

### ABSTRACT

In the present paper the penetration mechanism of the projectile in the fiber metal laminates are investigated experimentally. Glass/epoxy composite laminates and fiber metal laminates made from thin aluminum sheets and glass/epoxy composite in different thicknesses were fabricated with the use of hand layup method. Ballistic test were conducted on plates with the projectile velocity of 720 m/s. Steel plates were placed behind the composite and glare plates to measure the energy absorption capacity of them. With the use of an analytical- experimental method and measuring the deformation of the steel back plate after impact, the absorbed energy in composite and glare plates were determined. The energy absorption capacity of the composite and glare plates were compared. The results showed that in the same plate thicknesses, the energy absorption capacity of the glare plates are higher than composite plates. Finally with the help of experimental results an analytical method to estimate the required energy for penetration of the projectile into glare plates were developed.

**Keywords:** Ballistic impact, Glare, Absorbed energy

۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): hrzmo2000@yahoo.com

۲- استادیار: davoodinik@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد: delara1977@gmail.com

## ۱- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز - الیاف کاربردهای زیاد و متنوعی دارند، از آن جمله می‌توان به کاربرد آنها در سازه بال و بدنه وسایل پرنده و محافظ سفینه‌ها اشاره کرد. ورق‌های فلزی - الیافی متشکل از لایه‌های شیشه/اپوکسی و آلومینیوم که در اصطلاح گلار نامیده می‌شوند را می‌توان متناسب با کاربرد و با خواص متفاوت ساخت. نوآوری‌هایی که تاکنون در زمینه کامپوزیت‌ها رخ داده است، این امکان را برای طراحان فراهم آورده است که سازه‌های با وزن بسیار کم‌تر و مقاومت بیشتر طراحی کنند. کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات، خواص بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند، به‌ویژه زمانی که نسبت مقاومت به وزن زیاد، مقاومت در برابر خستگی و ضربه یا خوردگی اهمیت پیدا می‌کنند [۷-۱۱]. وو<sup>۱</sup> و همکاران [۸] اثر ضربه کم‌سرعت و مقاومت به رشد تخریب در چند لایه‌های گلار را بررسی کرده و نشان داده‌اند که برای این کامپوزیت‌ها در ضربه‌های کم‌سرعت، هنگامی که فرورفتگی ایجاد نشود، جدایش لایه‌ها نیز رخ نمی‌دهد. در مواردی هم که فرورفتگی ایجاد می‌شود، اندازه جدایش معمولاً کوتاه‌تر از ابعاد فرورفتگی است. بنابراین حتی پس از ضربه، این مواد استحکام باقیمانده زیادی دارند. ولات<sup>۲</sup> و همکاران [۹] رفتار آلومینیوم، کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی، کربن/اپوکسی و کامپوزیت‌های چند لایه گلار (تشکیل شده از شیشه/اپوکسی و آلومینیوم) و آرال (تشکیل شده از لایه‌های آرامید/اپوکسی و آلومینیوم) و کارل (تشکیل شده از لایه‌های کربن/اپوکسی و آلومینیوم) را زیر بارگذاری‌های کششی، فشاری و ضربه کم‌سرعت و نیز با سرعت زیاد بررسی کرده‌اند. مطالعاتی که عبدالله و کانتول<sup>۳</sup> [۱۰] در سال ۲۰۰۶ بر روی پنل‌های فلزی - الیافی با ورق‌های آلومینیومی و هسته کامپوزیت پلی‌پروپیلن برای آلیاژهای آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و O-۲۰۲۴ انجام داده‌اند، نشان می‌دهد که سیستم‌های لایه‌های هیبریدی به‌عنوان یک امکان ویژه برای استفاده در سازه‌های جاذب انرژی، مطرح می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که صفحات چندلایه فلز - الیاف با پایه آلومینیومی T۳-۲۰۲۴ مقاومت به نفوذ بهتری نسبت به پنل‌های چند لایه فلز - الیاف با پایه آلومینیومی O-۲۰۲۴ دارند. این اختلاف از رفتار جذب انرژی آلیاژ T۳-۲۰۲۴ و O-۲۰۲۴ ناشی می‌شود. در حالت کلی، با ایجاد تغییر در سامانه الیاف - رزین، نوع ورق‌های آلومینیوم و

ضخامت آنها، زاویه الیاف، چگونگی لایه‌گذاری و نحوه پیش آماده‌سازی سطح ورق‌ها، می‌توان هر یک از خواص مورد نیاز را بهبود بخشید [۹]. نتایج کار پژوهشگران روی کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف شیشه - آلومینیوم نشان می‌دهد در حالی که مقاومت به ضربه در لایه‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای از آلومینیوم کمتر است، ولی مقاومت به ضربه و مقاومت به رشد خرابی در کامپوزیت لایه‌ای الیاف شیشه - آلومینیوم از آلومینیوم بهتر است [۱۱ و ۱۲].

بررسی‌هایی که واگل‌سانگ<sup>۴</sup> [۱۳] در سال ۲۰۰۰ بر روی جایگزینی مواد موجود در ساخت سازه‌های هوایی انجام داده است نشان می‌دهد که گلار به‌عنوان یک ماده پیشنهادی مناسب برای طراحان سازه‌های هوایی مطرح گردیده که اهداف کاهش وزن، مقرون به‌صرفه بودن و تحمل آسیب را محقق می‌سازد. مشخصه اصلی این مواد مقاومت در برابر خستگی آنهاست. همچنین مشخصه‌های ذاتی لایه‌های آلومینیومی شامل خواص ایستایی بسیار مناسب، ساخت راحت، مقاومت در برابر ضربه بالا و مقاومت به خوردگی خوب از دیگر ویژگی‌هایی است که در معرفی گلار بیان می‌گردد. هوو- فت<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۰۳ برای پیش‌بینی حد بالستیک و جذب انرژی در صفحه‌های گلار، راه‌حلی‌هایی تحلیلی ارائه دادند. آنها رابطه تحلیلی سرعت حد بالستیک را از طریق برابر قرار دادن انرژی جنبشی ابتدایی پرتابه با انرژی مورد نیاز برای ایجاد تغییر شکل، جدایش و شکست در صفحه به‌دست آوردند. پیش‌بینی‌های حد بالستیک به‌دست آمده از معادله دیفرانسیلی غیرخطی با نتایج آزمایشات ۱۳ درصد اختلاف داشتند. آنها نشان دادند که انرژی صرف شده برای لایه لایه شدن ۲ تا ۹ درصد انرژی کل جذب شده است که در صفحات نازک درصد کمتری از انرژی کل را نسبت به صفحات ضخیم‌تر تشکیل می‌دهد. همچنین تقریباً ۷ درصد انرژی کل به انرژی شکست کششی شیشه/اپوکسی و آلومینیوم اختصاص می‌یابد.

با توجه به خواص منحصر به‌فرد چندلایه‌های فلزی الیافی در داخل کشور نیز تحقیقات جامعی انجام شده است. صدیقی و همکاران خواص کششی چندلایه‌های فلزی الیافی را بررسی نمودند [۱۸]. آنها ۶ دسته نمونه گلار با زاویه الیاف متفاوت ساختند و نشان دادند که نمونه گلار با زاویه الیاف شیشه صفر درجه مقاومت کششی بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارد.

1- Wu  
2- Vlot  
3- Abdullah and Cantwell

4- Vogelesang  
5 - Reid and Wen

ورق‌های آلومینیوم به ضخامت لایه‌های کامپوزیتی و در سری دوم تأثیر تغییر ضخامت ورق‌های آلومینیوم در لایه‌های مختلف بر سرعت حد بالستیک و انرژی نفوذ مخصوص (انرژی نفوذ بر واحد چگالی سطح) بررسی شده است. برای سری اول آزمایش‌ها، GLARE با دو لایه آلومینیوم و برای سری دوم، GLARE با سه لایه آلومینیوم انتخاب شده است [۲۲].

چندلایه‌های آرال نسل جدیدی از سازه‌های مرکب هستند که متشکل از لایه‌های فلزی آلومینیومی و لایه‌های کامپوزیتی کولار-اپوکسی می‌باشند. دادرند در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود، اهداف آرال در لایه‌چینی‌ها و ضخامت‌های مختلف با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخت و جهت ارزیابی میزان مقاومت نفوذ و جذب انرژی، در دستگاه تفنگ‌گازی مورد برخورد پرتابه‌های صلب مخروطی قرار داد. سرعت برخورد در تمام نمونه‌ها زیر ۳۰۰ متر بر ثانیه بود. او پانل‌ها ساخته شده را برحسب انرژی جذب شده ویژه با هم مقایسه نمود که عملکرد مناسب پانل‌های آرال به‌ویژه در ضخامت‌های بالا، قابل توجه بود [۲۳]. علی‌رغم کاربردهای فراوان آلومینیوم ۷۰۷۵ در بخش‌های مختلف سازه‌های هوایی، در مقایسه با آلیاژ ۲۰۲۴ تاکنون توجه کمتری در استفاده از این نوع آلیاژ آلومینیوم در ساختار گلار شده است. در این مقاله علاوه بر آلومینیوم ۲۰۲۴، آلومینیوم ۷۰۷۵ نیز در ساختار گلار به‌کار گرفته شده است. همچنین در این مقاله ضربه با گلوله و اسلحه واقعی کلاشینکف مورد استفاده قرار گرفته و محدوده سرعت ضربه بالاتر از تحقیقاتی است که تاکنون گزارش شده است. به‌منظور بررسی و مقایسه انرژی جذب شده در صفحات شیشه/اپوکسی و گلار و انتخاب ساختار بهینه، صفحات چندلایه شیشه/اپوکسی و گلار با ضخامت‌های اسمی ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر به‌روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده است. سپس صفحات ساخته شده مورد آزمایش نفوذ بالستیک با سرعت پرتابه برابر با ۷۲۰ متر بر ثانیه قرار گرفته‌اند. برای دستیابی به انرژی جذب شده در صفحات از صفحات شاهد فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر که در پشت صفحات چند لایه فلز-الیاف قرار داده شد، استفاده شده و براساس رابطه تجربی-تحلیلی ارائه شده توسط وودوارد [۱۵] انرژی جذب شده در صفحات چندلایه فلز-الیاف برآورد شده است. در نهایت انرژی جذب شده در صفحات شیشه/اپوکسی و گلار با ضخامت برابر مقایسه شده‌اند.

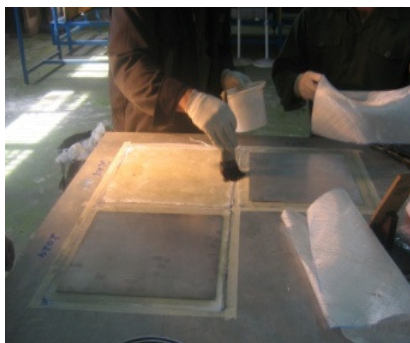
سبزیکار بروجردی و همکاران اثر ضربه سرعت پایین بروری نمونه‌های گلار را به‌صورت تحلیلی و تجربی بررسی نمودند [۱۹]. در مدل تحلیلی ارائه شده با استفاده از معادلات ساده شده فون-کارمن میزان جذب انرژی سازه محاسبه شده است. همچنین نمونه‌های گلار با زوایای الیاف شیشه ۰ و ۹۰ درجه در دو چینش متفاوت ساخته شده است و در دو سطح انرژی ضربه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که نمونه‌های گلار با چینش الیاف متقارن مقاومت به ضربه بالاتری نسبت به نمونه‌های نامتقارن دارند.

سبزیکار بروجردی و همکاران رفتار تیرهای ساندویچی با رویه‌های از جنس چندلایه‌های آلومینیوم-الیاف شیشه را زیر بار خمشی بررسی نمودند [۲۰]. سه گروه نمونه ساندویچی با رویه‌های با لایه چینی متفاوت و هسته‌های از جنس اسفنج پلی‌پورتان با چگالی  $40 \text{ kg/m}^3$  ساخته و آزمایش شدند. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که سازه‌های ساندویچی با رویه‌های از جنس چندلایه‌های فلز الیاف توزیع مناسب‌تری از بار را روی کل سازه ایجاد می‌کنند و پیوستگی ساختاری آنها تا پایان مرحله فشردگی کامل هسته به‌خوبی حفظ می‌شود. اتصال خوب لایه کامپوزیتی و هسته اسفنجی از دیگر نکاتی است که ظرفیت تحمل بار سازه را افزایش می‌دهد.

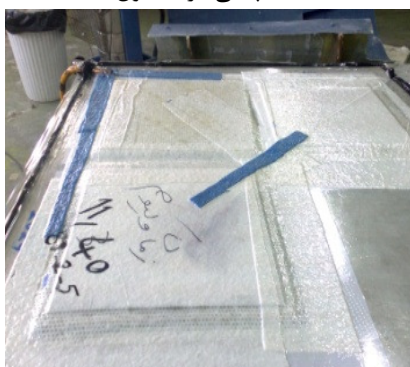
پاک‌نژاد و همکاران اثر ضربه عرضی با سرعت پایین بروری ورق‌های کامپوزیتی یکسر گیردار را به‌روش تحلیلی و عددی بررسی نمودند [۲۱]. آنها با استفاده از یک مدل جرم و فنر و نرم‌افزار المان محدود ABAQUS رفتار متقابل بین ضربه زننده و ورق یکسر گیردار را برآورد نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که چنانچه یک جرم کوچک به یک ورق فلزی الیافی با شرایط مرزی ساده و یا یکسرگیردار برخورد نماید، پارامترهایی مانند جرم و سرعت ضربه زننده، جرم ورق، زاویه چیدمان الیاف و فرکانس طبیعی ورق تأثیر چندانی در نیروی تماسی یا خیز سازه ندارد.

احمدی در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود نمونه‌های گلار متشکل از لایه‌های آلومینیومی T3-۲۰۲۴ و الیاف شیشه تک‌جهته نوع E و رزین اپوکسی ساخت و رفتار آنها را تحت اثر ضربه سرعت بالا در حدود ۳۰۰ متر بر ثانیه بررسی نمود. او دو سری آزمایش انجام داد که در مرتبه اول آن تأثیر نسبت ضخامت

استفاده از روش‌های آماده‌سازی سطح، به میزان قابل ملاحظه‌ای موجب افزایش قدرت اتصال بین لایه فلز و رزین می‌شود. شکل ۱ روند ساخت نمونه‌های گلاز را نشان می‌دهد.



لایه‌چینی مرحله اول



در حال خلاء به مدت شش ساعت

شکل (۱): ساخت نمونه کامپوزیتی لایه‌ای فلز-الیاف شیشه.

نمونه‌های گلاز و صفحات شیشه/اپوکسی نیز به روش لایه‌گذاری دستی به ضخامت‌های اسمی ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر ساخته شده‌اند. در جدول ۲ مشخصات لایه‌ها و مواد تشکیل‌دهنده نمونه‌های گلاز و شیشه/اپوکسی آورده شده است. در این جدول به منظور سهولت در شناخت صفحات مرکب از سیستم نام‌گذاری استفاده شده است. بدین ترتیب که حروف ابتدایی نشانگر جنس، سپس تعداد لایه آلومینیوم و نوع آن و در انتها تعداد لایه شیشه مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشخص است برای بررسی تکرارپذیری نتایج، از هر نمونه به تعداد ۲ عدد جهت آزمایش ساخته شده است که در جدول با اندیس a و b نشان داده شده‌اند. جدول ۳ وزن و ضخامت واقعی صفحات گلاز و شیشه/اپوکسی را نشان می‌دهد.

## ۲- آزمایش ضربه بالستیک

در این بخش از مقاله در ارتباط با نوع مواد اولیه مورد استفاده در ساخت صفحات شیشه/اپوکسی و گلاز، روش ساخت آنها، نحوه انجام آزمایشات بالستیک و نتایج اخذ شده توضیحاتی آورده می‌شود.

### ۱-۲- مواد و دستگاه‌ها

مواد مصرفی برای ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای فلز-الیاف شیشه، شامل ورق آلومینیوم T۳-T۴-۲۰۲۴ و T۶-۷۵-۷۰۷۵ به ضخامت ۰/۸ و ۱ میلی‌متر و الیاف شیشه دوجبهتی RE-۲۰۰ از جنس E-glass و رزین اپوکسی ۵۱۳۸ بود. اپوکسی مورد استفاده با چگالی ۱/۱۵-۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و گرانشی ۲۲۰۰-۱۷۰۰ سانتی‌پوآز از محصولات شرکت وانتیکو تهیه شد، سپس با نسبت ۱:۱۰ با سخت‌کننده مخلوط و پس از به‌کارگیری در حین لایه‌چینی، به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط و ۶ ساعت تحت فشار خلاء معادل ۰/۷- بار، قرار گرفت. جدول ۱ مشخصات فیزیکی رزین مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات رزین ۵۱۳۸.

خاصیت	Araldite LY 5138	HY 5138 Hardener
مشخصه ظاهری	مایع کمی مات	شفاف
ویسکوزیته (سانتی‌پوآز)	۱۷۰۰-۲۲۰۰	۱۰-۲۵
چگالی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۱-۱/۱۵	۰/۹۰-۰/۹۵

### ۲-۲- روش ساخت نمونه‌ها

برای ساخت نمونه‌ها، با برش ورق‌های آلومینیوم در اندازه‌های ۳۰×۳۰ سانتی‌متر و چربی‌زادایی اولیه از سطوح ورق‌های آلومینیوم و نیز ایجاد خراش به‌وسیله سمباده نرم و سپس پاک کردن با حلالی مثل استون، قطعات آلومینیومی آماده می‌شوند. سپس نسبت به لایه‌چینی الیاف شیشه و فلز اقدام می‌شود.

جدول (۲): مشخصات نمونه‌های ساخته شده.

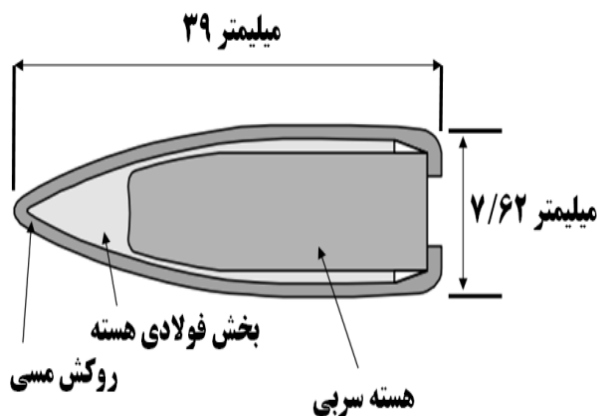
شماره نمونه	نشانیگر	ضخامت اسمی (میلی‌متر)	زاویه ییاف	ترتیب لایه‌ها
۱	FML-۲Al(۲۰۲۴)-۱۰Gl	۴	+۴۵/-۴۵	AlIGlAl
۲	FML-۳Al(۲۰۲۴)-۱۶Gl	۶	+۴۵/-۴۵	AlIGlAlIGlAl
۳	FML-۴Al(۲۰۲۴)-۱۸Gl	۸	+۴۵/-۴۵	AlIGlAlIGlAlIGlAl
۴	FML-۲Al(۷۰۷۵)-۸Gl	۴	+۴۵/-۴۵	AlIGlAl
۵	FML-۳Al(۷۰۷۵)-۱۲Gl	۶	+۴۵/-۴۵	AlIGlAlIGlAl
۶	FML-۴Al(۷۰۷۵)-۱۸Gl	۸	+۴۵/-۴۵	AlIGlAlIGlAlIGlAl
۷	Glass-۱۶Gl	۴	+۴۵/-۴۵	GIIGlIGlIGl
۸	Glass-۲۴Gl	۶	+۴۵/-۴۵	GIIGlIGlIGlIGl
۹	Glass-۳۰Gl	۸	+۴۵/-۴۵	GIIGlIGlIGlIGlIGl

جدول (۳): مشخصات نمونه‌های گنار و شیشه / اپوکسی.

نشانیگر نمونه‌ها	وزن صفحه نمونه‌ها (گرم)	ضخامت واقعی (میلی‌متر)
FML-۲Al(۲۰۲۴)-۱۰Gl- a	۸۳۶	۴/۶۲
FML-۲Al(۲۰۲۴)-۱۰Gl- b	۸۴۱	۴/۶۸
FML-۳Al(۲۰۲۴)-۱۶Gl- a	۱۳۰۲	۷/۲۳
FML-۳Al(۲۰۲۴)-۱۶Gl- b	۱۳۰۶	۷/۰۷
FML-۴Al(۲۰۲۴)-۱۸Gl- a	۱۵۹۴	۸/۳۱
FML-۴Al(۲۰۲۴)-۱۸Gl- b	۱۵۷۸	۸/۴۴
FML-۲Al(۷۰۷۵)-۸Gl- a	۸۳۶	۴/۲۴
FML-۲Al(۷۰۷۵)-۸Gl- b	۸۴۲	۴/۲۱
FML-۳Al(۷۰۷۵)-۱۲Gl- a	۱۲۷۶	۶/۴۰
FML-۳Al(۷۰۷۵)-۱۲Gl- b	۱۲۶۶	۶/۳۹
FML-۴Al(۷۰۷۵)-۱۸Gl- a	۱۸۰۴	۸/۸۷
FML-۴Al(۷۰۷۵)-۱۸Gl- b	۱۷۸۴	۸/۸۰
Glass-۱۶Gl- a	۴۸۴	۳/۴۲
Glass-۱۶Gl- b	۵۳۰	۳/۷۸
Glass-۲۴Gl- a	۷۸۰	۵/۶۰
Glass-۲۴Gl- b	۷۹۲	۵/۸۵
Glass-۳۰Gl- a	۱۱۳۶	۸/۳
Glass-۳۰Gl- b	۱۰۸۸	۷/۹۶

## ۳-۲- انجام آزمایش ضربه بالستیک

آزمایش‌های ضربه بالستیک بر روی پنل‌های چند لایه مرکب و فلز-الیاف در دمای اتاق و به وسیله دستگاه شلیک کننده انجام شده‌اند (شکل ۲).



شکل (۳): مشخصات پرتابه.

جدول‌های ۴ و ۵ بیانگر مشخصات پرتابه و صفحات آلومینیومی می‌باشند.

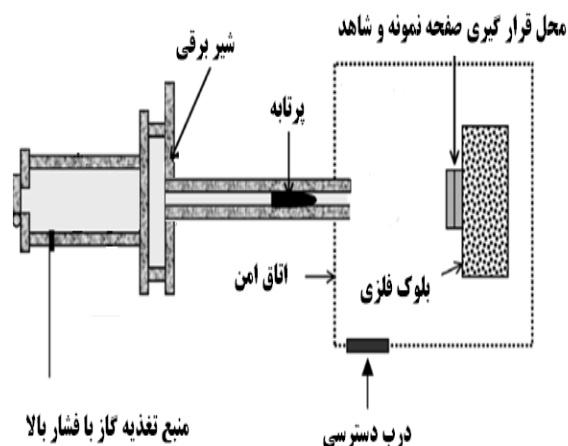
جدول (۴): مشخصات هندسی پرتابه.

قطر (میلی متر)	جرم (گرم)	ماده پرتابه
۷/۶۲	۸ - ۸/۲	گلوله سربی- فولادی

جدول (۵): مشخصات هندسی و مکانیکی صفحات آلومینیوم.

دانسیته $\frac{kg}{m^3}$	ضرب الاستیسیته (Gpa)	تنش نهایی (Mpa)	تنش تسلیم (Mpa)	ضخامت (mm)	ماده هدف
۲۷۷۶	۷۳	۵۰۰	۲۰۰	۰/۸	Al(۲۰۲۴)
۲۸۵۹	۷۰	۵۷۲	۵۰۳	۱	Al(۷۰۷۵)

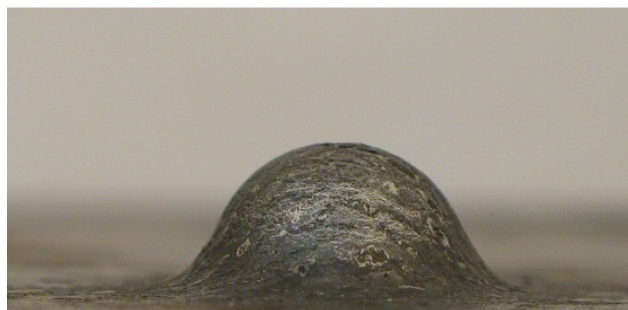
شکل ۴ نحوه نفوذ گلوله در صفحه گلار ۸ میلی متری با مشخصه ۱۸G1-۴Al(۲۰۲۴)-FML از گروه ۳ را از نماهای مختلف نشان می‌دهد که انرژی جذب شده آن برابر با ۱۸۲۴/۵۳ ژول تخمین زده شده است. همچنین شکل ۵ نمونه ۵ Glass-۲۴G1 از گروه ۸ را پس از عبور پرتابه از نمونه نشان می‌دهد که متشکل از ۲۴ لایه الیاف شیشه با ضخامت واقعی (بعد از مراحل ساخت) ۵/۸۵۲ میلی متر بوده و مقدار انرژی جذب شده معادل ۱۴۰۷/۱۶ ژول برآورد شده است.



شکل (۲): نمای شماتیک از کانال آزمون بالستیک.

این دستگاه از قسمت‌های مختلفی نظیر، منبع تغذیه گاز، مخزن گاز، شیر برقی، محل جایگذاری پرتابه، لوله بلند فولادی جهت عبور پرتابه و محل نگهداری نمونه هدف و صفحه شاهد تشکیل شده است. با باز کردن منبع تغذیه، گاز در مخزن ذخیره شده و فشار آن به پشت شیر برقی منتقل می‌شود. با اتصال جریان برق در این شیر، در یک مدت زمان بسیار کوتاه دریچه‌ای این شیر باز شده و فشار گاز پشت این شیر، باعث پرتاب پرتابه‌ای می‌شود که در جلوی این شیر قرار دارد. در این آزمایش‌ها، صفحه‌های نمونه با شرایط مرزی گیردار در هر چهار وجه، روی پایه مخصوصی به همراه صفحه شاهد از چهار طرف ثابت گردیده و دستگاه شلیک کننده در اتاقک کوچکی واقع است که با قرار دادن پرتابه در آن، یک تیر از فاصله ۵ متری به هر هدف شلیک می‌گردد (شکل ۲). پنل‌ها از تمامی جهات مهار شده و در معرض دید کامل و برخورد پرتابه قرار گرفته‌اند. پرتابه‌ها، گلوله‌های مخروطی شکل بودند که هسته آن از جنس سرب و فولاد و روکش مسی بود (شکل ۳). قطر پرتابه برابر با ۷/۶۲ میلی متر و جرمی بین ۸ تا ۸/۲ گرم داشت. پرتابه، قبل از برخورد به صفحه گلار سرعت تقریبی معادل ۷۲۰ متر بر ثانیه برخوردار است. در پشت هر صفحه مرکب و یا گلار، یک صفحه فولادی به ضخامت ۱۰ میلی متر به عنوان صفحه شاهد قرار داده شده است.

جذب شده در صفحات چند لایه فلز-الیاف، میزان تغییر مکان صفحه شاهد فولادی به‌طور دقیق اندازه‌گیری شده و انرژی جذب شده در صفحات تعیین گشته است. شکل ۶ میزان تغییر فرم صفحه شاهد رادر نمونه گلار ۸ میلی‌متری نشان می‌دهد.



شکل (۶): تغییر مکان صفحه شاهد در آزمون.

بر اساس این تئوری طبق رابطه (۱)، می‌توان انرژی منتقل شده به صفحه شاهد را تعیین نمود. همچنین با توجه به معلوم بودن انرژی جنبشی اولیه پرتابه، می‌توان میزان انرژی جذب شده در صفحه هدف را مشخص نمود.

$$E_p = \pi h_b \delta Y_b \left( \frac{2}{3} h_b + \frac{1}{2} \delta \right), \quad (1)$$

که در آن،  $h_b$ ،  $\delta$  و  $Y_b$  به ترتیب بیانگر ضخامت، تغییر شکل و تنش تسلیم صفحه شاهد می‌باشند.

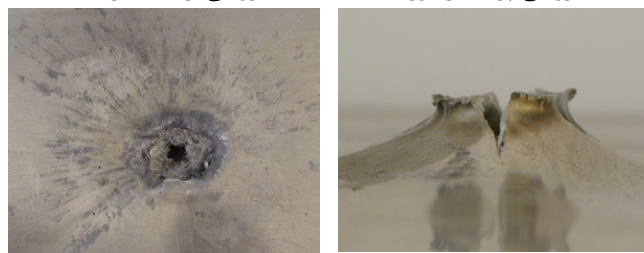
جدول ۶ میزان انرژی جذب شده در صفحات شیشه/اپوکسی و گلار را نشان می‌دهد.

در این جدول اندیس a و b به ترتیب نشانگر نمونه اول و دوم از هر صفحه می‌باشد. به‌منظور مقایسه نتایج انرژی جذب شده در صفحات گلار و شیشه/اپوکسی، میانگین نتایج برای هر دو نمونه در جدول ۷ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۷ مشخص است، با مقایسه مقادیر میانگین انرژی جذب شده نمونه‌های گلار و شیشه/اپوکسی با ضخامت تقریباً برابر، مشاهده می‌شود که انرژی جذب شده در صفحات گلار از صفحات شیشه/اپوکسی بیشتر است. انرژی‌های جذب شده در صفحات گلار با لایه‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ با ضخامت اسمی ۴ میلی‌متر به ترتیب ۹/۹۵ و ۱۱/۸۲ درصد بیشتر از صفحات شیشه/اپوکسی با ضخامت برابر می‌باشند. انرژی جذب شده در صفحات گلار متشکل از ورق‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ با ضخامت اسمی ۶ میلی‌متر در مقایسه با صفحات شیشه/اپوکسی با ضخامت اسمی برابر به مقدار به ترتیب ۷/۹ و ۱۱/۸۲ درصد افزایش یافته است. از طرفی با مقایسه صفحات گلار با ضخامت اسمی ۸ میلی‌متر نیز



خروجی از نمای نزدیک

خروجی پرتابه از دور



ورودی از نمای نزدیک

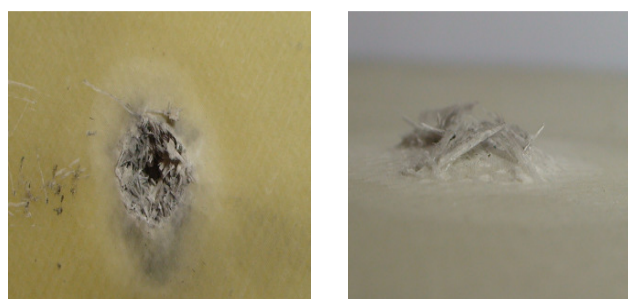
خروجی از پهلو

شکل (۴): نحوه نفوذ گلوله در صفحه گلار ۸ میلی‌متر از نماهای مختلف.



خروجی از نمای نزدیک

خروجی پرتابه از دور



ورودی از نمای نزدیک

خروجی از پهلو

شکل (۵): نحوه خرابی ایجاد شده در صفحه شیشه/اپوکسی با ضخامت ۸ میلی‌متر از نماهای مختلف.

### ۳- محاسبه انرژی جذب شده توسط صفحات نمونه

با استفاده از تئوری وودوارد [۱۵] مقدار انرژی جذب شده توسط صفحات نمونه محاسبه شده است. به‌منظور برآورد انرژی

به جهت هرچه بهتر ارائه نتایج، میزان اختلاف در انرژی جذب شده صفحات گلار و شیشه/اپوکسی در شکل ۷ ارائه شده است. مشاهدات بصری نشان داد که پرتابه مورد استفاده در آزمایش‌ها بعد از برخورد با صفحه شاهد دچار تغییر فرم پلاستیک و فرسایش شده است. در واقع می‌توان گفت که بخشی از انرژی اولیه پرتابه صرف تغییر فرم ماندگار در آن شده است. با توجه به عدم امکان تعیین میزان انرژی صرف شده در ایجاد تغییر فرم پرتابه، در محاسبات تجربی انرژی مصرفی به این امر در نظر گرفته نشده است. البته با توجه به هندسه کوچک و جرم کم پرتابه این بخش از انرژی جذب شده قابل صرف نظر می‌باشد.

نتایج مشابهی به دست آمده است. همچنین مقاومت مکانیکی بالاتر صفحات آلومینیوم ۷۰۷۵ در مقایسه با ۲۰۲۴ باعث شده است که درصد افزایش انرژی جذب شده در صفحات گلار متشکل از ورق‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ بیشتر از صفحات گلار متشکل از ورق‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ باشد. این موضوع در صفحات گلار با ضخامت ۶ و ۸ میلی‌متر که تعداد بیشتری از ورق‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ دارند مشهودتر است. به طوری که با توجه به مندرجات جدول ۷ مشاهده می‌شود، بیشترین درصد افزایش انرژی در صفحات گلار متشکل از لایه‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ با ضخامت اسمی ۸ میلی‌متر رخ داده است که برابر با ۱۶/۹۹ درصد می‌باشد.

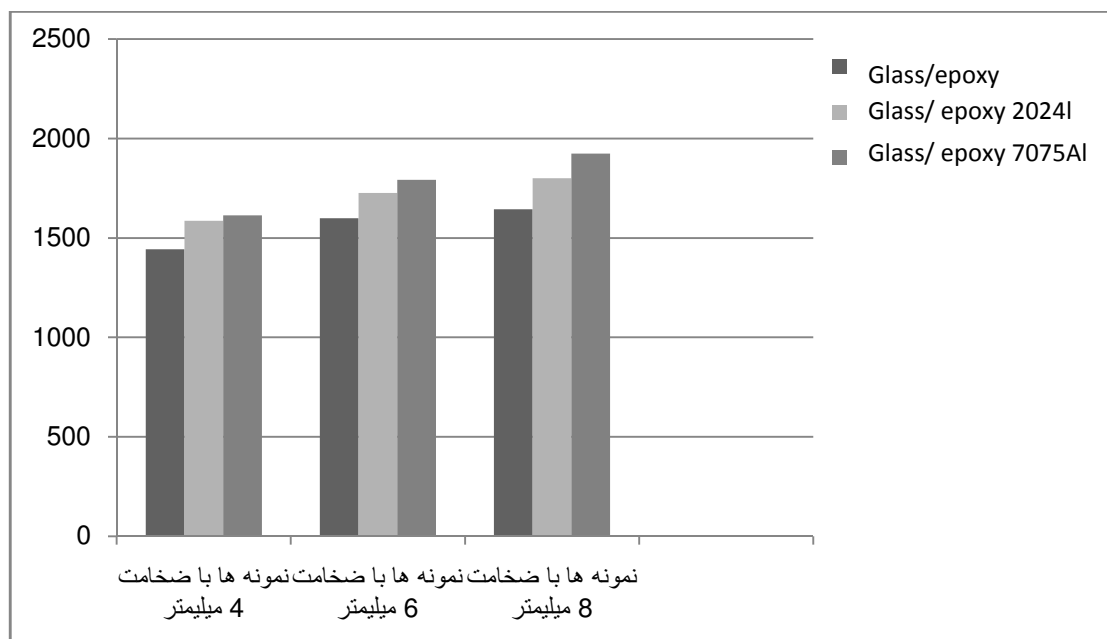
جدول (۶): انرژی جذب شده در نمونه‌های گلار و شیشه/اپوکسی

نشانه‌گر نمونه‌ها	انرژی منتقل شده صفحه شاهد (ژول)	انرژی جذب شده (ژول)
FML-۲Al(۲۰۲۴)-۱۰Gl - a	۵۳۸/۴۰	۱۵۸۶/۹۹
FML-۲Al(۲۰۲۴)-۱۰Gl - b	۶۳۸/۶۵	۱۶۰۳/۴۴
FML-۳Al(۲۰۲۴)-۱۶Gl - a	۴۱۶/۸۱	۱۷۰۸/۵۸
FML-۳Al(۲۰۲۴)-۱۶Gl - b	۳۸۲/۳۵	۱۷۴۳/۰
FML-۴Al(۲۰۲۴)-۱۸Gl - a	۳۰۰/۸۶	۱۸۲۴/۵۳
FML-۴Al(۲۰۲۴)-۱۸Gl - b	۳۴۷/۹۵	۱۷۷۷/۴۴
FML-۲Al(۷۰۷۵)-۸Gl - a	۵۶۵/۸۶	۱۵۵۹/۵۳
FML-۲Al(۷۰۷۵)-۸Gl - b	۴۵۶/۹۷	۱۶۶۸/۴۲
FML-۳Al(۷۰۷۵)-۱۲Gl - a	۳۳۰/۴۵	۱۷۹۴/۹۴
FML-۳Al(۷۰۷۵)-۱۲Gl - b	۳۳۶/۵۷	۱۷۸۸/۸۲
FML-۴Al(۷۰۷۵)-۱۸Gl - a	۲۰۱/۲۸	۱۹۲۴/۱۱
FML-۴Al(۷۰۷۵)-۱۸Gl - b	۱۹۹/۵۴	۱۸۷۶/۶۳
Glass-۱۶Gl - a	۱۴۷۹/۴۶	۶۴۵/۹۳
Glass-۱۶Gl - b	۱۴۰۷/۱۶	۷۱۸/۲
Glass-۲۴Gl - a	۵۲۰/۷۴	۱۶۰۴/۶۵
Glass-۲۴Gl - b	۵۳۱/۲	۱۵۹۴/۱۹
Glass-۳۰Gl - a	۴۵۳/۸۴	۱۶۷۱/۵۵
Glass-۳۰Gl - b	۵۰۷/۶۴	۱۶۱۷/۷۵



جدول (۷): میانگین انرژی جذب شده صفحات گلار در مقایسه با شیشه/اپوکسی .

جنس نمونه	ضخامت اسمی (میلی متر)	انرژی جذب شده (ژول)	درصد اختلاف (درصد)
Glass	۴	۱۴۴۳/۳۱	-
Al (۲۰۲۴) -G	۴	۱۵۸۶/۹۹	۹/۹۵
Al (۷۰۷۵) -G	۴	۱۶۱۳/۹۷	۱۱/۸۲
Glass	۶	۱۵۹۹/۴۲	-
Al (۲۰۲۴) -G	۶	۱۷۲۵/۸۱	۷/۹
Al (۷۰۷۵) -G	۶	۱۷۹۱/۸۸	۱۲/۰۳
Glass	۸	۱۶۴۴/۶۵	-
Al (۲۰۲۴) -G	۸	۱۸۰۰/۹۸	۹/۵
Al (۷۰۷۵) -G	۸	۱۹۲۴/۱۱	۱۶/۹۹

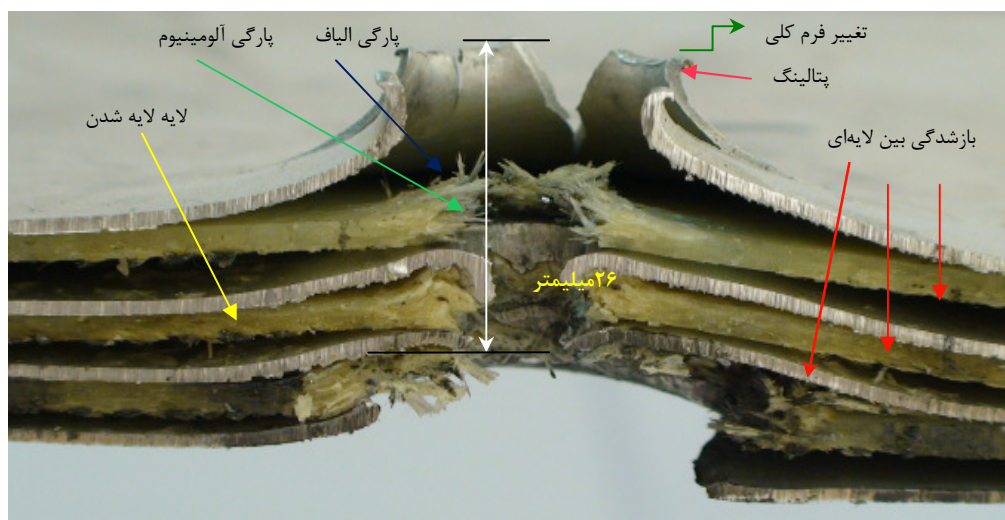


شکل (۷): مقایسه انرژی جذب شده صفحات گلار و شیشه/اپوکسی.

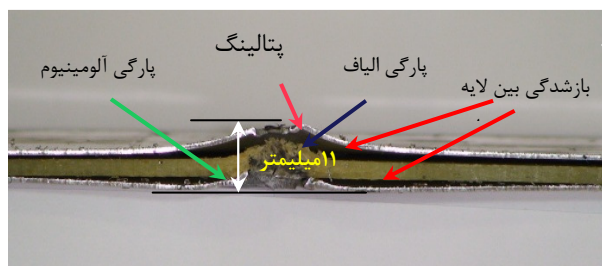
شکل ۸ تصویر برش خورده نمونه FML-4Al(2024)-18GI از چهار لایه آلومینیوم ۲۰۲۴ و هجده لایه الیاف شیشه است که سازوکارهای خرابی در آن در لایه‌های اول، دوم و سوم از نوع بازشدگی بین لایه‌ای است. همچنین تغییر فرم کلی صفحه و پدیده پتالینگ قابل مشاهده می‌باشد. پارگی الیاف در لایه‌های شیشه/اپوکسی به همراه پارگی لایه‌ها قابل مشاهده بوده و پارگی آلومینیوم هم به وجود آمده است. در ضمن فاصله بین دو خط موازی که نشان دهنده تغییر مکان می‌باشد به اندازه ۲۶ میلی‌متر است.

#### ۴- مشاهدات و بررسی سازوکارهای جذب انرژی

به منظور تعیین سازوکارهای جذب انرژی در صفحات چند لایه گلار و شیشه/اپوکسی، تمامی صفحات از وسط برش داده شده و مورد بازبینی قرار گرفتند. نتایج مشاهدات حاکی از آن است که مجموعه‌ای از سازوکارهای جذب انرژی نظیر خردشدگی رزین، پارگی الیاف، بازشدگی بین لایه‌های آلومینیوم و شیشه/اپوکسی، پتالینگ ورق آلومینیوم، تغییر فرم پلاستیک لایه آلومینیوم و لایه لایه شدن بخش شیشه/اپوکسی سبب جذب انرژی پرتابه شده‌اند.

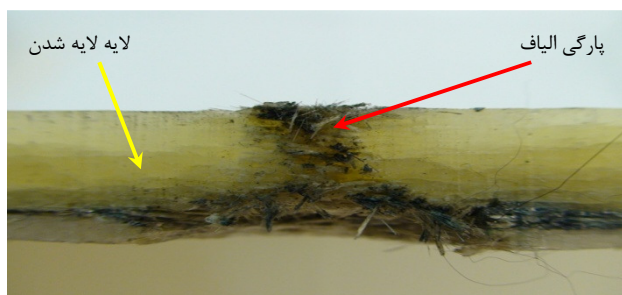


شکل (۸): نمونه برش خورده FML-4Al (۲۰۲۴) - ۱۸ GL.

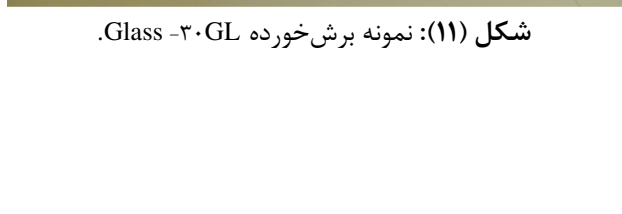


شکل (۹): نمونه برش خورده FML-3Al (۲۰۲۴) - ۱۶ GL.

در این نمونه، بازشدگی بین لایه‌ای، پتالینگ و پارگی الومینیوم و الیاف قابل مشاهده می‌باشد. حد فاصل دو خط موازی نیز که تغییر مکان حرکت پرتابه درون صفحه را نشان می‌دهد، به مقدار ۱۱ میلی‌متر می‌رسد. در نمونه برش خورده Glass-30 GL که در شکل ۱۱ آمده است، پارگی الیاف و به مقدار ناچیزی هم در آن لایه لایه‌شدگی ایجاد گردیده است.

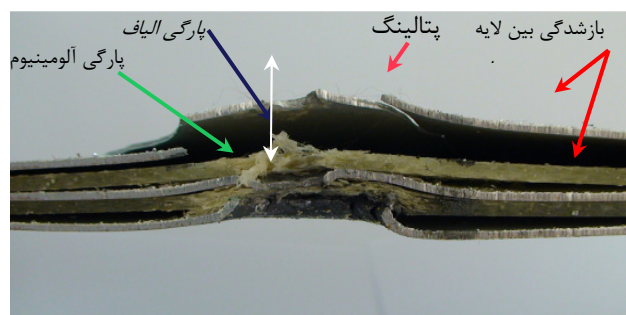


شکل (۱۰): نمونه برش خورده FML-2Al (۲۰۲۴) - ۱۰ GL.



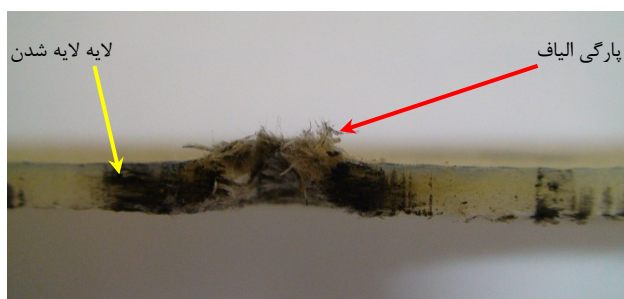
شکل (۱۱): نمونه برش خورده Glass-30 GL.

در شکل ۹ که نشان‌دهنده مقطع برش خورده نمونه FML-3Al (۲۰۲۴) - ۱۶ GL می‌باشد، بازشدگی بین لایه‌ای تقریباً در سرتاسر لایه‌ها به وجود آمده است. پارگی الیاف در محل سوراخ شدن نمونه بر اثر نفوذ گلوله ایجاد شده و نیز پارگی الومینیوم نیز بر اثر نفوذ به وقوع پیوسته است. در اینجا به دلیل ضخامت کم، نفوذ گلوله، علاوه بر ایجاد پتالینگ، موجب شکست الومینیوم در قسمت خروجی نیز گردیده است. حد فاصل بین دو خط موازی هم که بیانگر تغییر مکان پرتابه است به مقدار ۲۰ میلی‌متر می‌باشد.

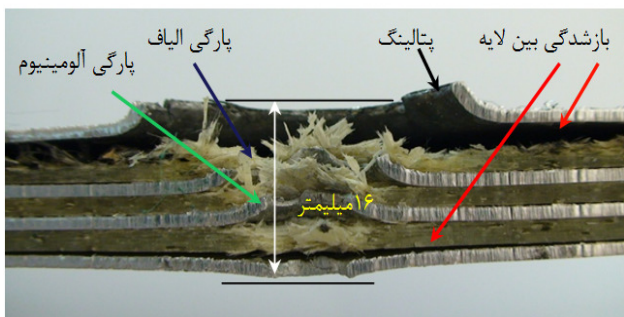


شکل (۱۱): نمونه برش خورده Glass-30 GL.

شکل ۱۰ نمونه برش خورده FML-2Al (۲۰۲۴) - ۱۰ GL را نشان می‌دهد که متشکل از دو لایه الومینیوم ۲۰۲۴ و ده لایه الیاف شیشه است.



شکل (۱۳): نمونه برش خورده Glass -۱۶ GL.



شکل (۱۴): نمونه برش خورده FML-۴Al (۷۰۷۵)-۱۸ GL.

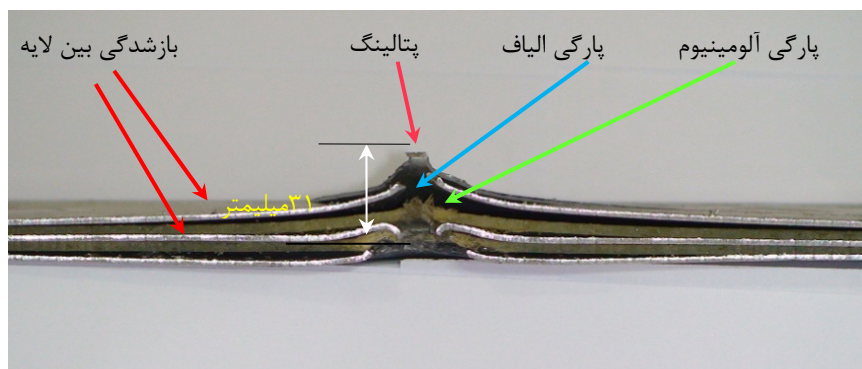
علاوه بر این، پتالینگ نیز روی داده است. با توجه به شکل ۱۵ که شامل نمونه برش خورده FML-۳Al (۷۰۷۵)-۱۲GL می باشد، تمامی لایه ها دچار بازشدگی بین لایه ای شده و فاصله بین دو خط موازی که نمایشگر تغییر مکان گلوله در طی نفوذ می باشد، به مقدار ۳۱ میلی متر است. همچنین قطعه دچار پتالینگ و شکست صفحه آلومینیومی در اطراف ناحیه خروجی گلوله گردیده و پارگی الیاف و آلومینیوم در محل سوراخ شدگی قابل رؤیت می باشد.

در شکل ۱۲ که نمونه برش خورده Glass-۲۴GL را نشان می دهد، پارگی الیاف شیشه / اپوکسی به طور کامل قابل مشاهده می باشد. همچنین لایه لایه شدگی در اطراف محل نفوذ دیده می شود.



شکل (۱۲): نمونه برش خورده Glass-۲۴GL.

در شکل ۱۳ نمونه Glass-۱۶GL در نقطه ای که توسط پرتابه نفوذ کرده است، دچار پارگی الیاف شده و در ضمن در اطراف محل نفوذ، لایه لایه شدگی کمی قابل مشاهده است. نمونه FML-۴Al (۷۰۷۵)-۱۸GL که از چهار لایه آلومینیوم تشکیل شده و در شکل ۱۴ نشان داده شده است، مقاومت بهتری نسبت به سایر نمونه ها ارائه داده است. همچنین در لایه اول و سوم بازشدگی جزئی رخ داده و نیز پارگی الیاف و پارگی آلومینیوم در تصویر مشاهده می شود. فاصله بین دو خط موازی که نشان دهنده تغییر مکان پرتابه در لایه ها می باشد با توجه به مقاومت خوبی که قطعه نشان داده است، معادل ۱۶ میلی متر است.



شکل (۱۵): نمونه برش خورده FML-۳Al (۷۰۷۵)-۱۲ GL.

از تنش  $\sigma_e$  می‌باشد. با توجه به اینکه تعیین این تنش برای صفحات گلار خود نیازمند انجام آزمایش‌های نفوذ شبه‌استاتیکی بر روی این صفحات می‌باشد، استفاده از این مدل در تحقیق حاضر میسر نبود. به‌منظور رفع این مشکل فرض شده است که انرژی جذب شده صفحه گلار حاصل جمع انرژی جذب شده در لایه‌های آلومینیوم و شیشه/اپوکسی می‌باشد. باوریک و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۰۹ پس از انجام آزمایش‌های کاملی بر روی ورق‌های نازک آلومینیوم رابطه تحلیلی زیر را برای انرژی جذب شده توسط این صفحات ارائه نمودند:

$$E_{PAI} = \pi a^2 h \sigma_s \quad (۸)$$

که در این رابطه  $\sigma_s$  برابر است با:

$$\sigma_s = \frac{Y}{\sqrt{3}} \left\{ 1 + \ln \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{E}{Y} \right) \right] \right\} \quad (۹)$$

با توجه به وجود نتایج آزمایش ضربه بالستیک بر روی صفحات شیشه/اپوکسی، از این نتایج به‌منظور برآورد انرژی جذب‌شده در لایه‌های شیشه/اپوکسی استفاده شد. شکل ۱۶ نتایج تجربی انرژی جذب‌شده توسط صفحات شیشه/اپوکسی را نشان می‌دهد.

با توجه به وجود نتایج آزمایش نفوذ در صفحات با ضخامت‌های بالاتر از ۳/۴۲ میلی‌متر و همچنین با عنایت به اینکه رابطه انرژی جذب شده با ضخامت صفحات خطی می‌باشد، انرژی جذب‌شده صفحات نازک‌تر تخمین زده شد. با توجه به اینکه ضخامت لایه‌های نازک آلومینیوم در هر صفحه گلار مشخص می‌باشد، با استفاده از رابطه ۸ میزان انرژی جذب‌شده در این صفحات تعیین شده است. همچنین با استفاده از نتایج تجربی آورده شده در شکل ۱۶ میزان انرژی جذب‌شده در لایه‌های شیشه/اپوکسی هر صفحه گلار تعیین شده است. در نهایت انرژی جذب شده کل صفحه گلار برابر با انرژی جذب شده توسط صفحات آلومینیومی به‌علاوه انرژی جذب‌شده توسط لایه‌های شیشه/اپوکسی می‌باشد.

در جدول‌های ۱۳-۸ نتایج انرژی جذب‌شده و انرژی ویژه نمونه‌ها در کنار هم نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که انرژی تحلیلی آورده شده مجموع انرژی جذب شده در لایه‌های آلومینیوم و شیشه/اپوکسی می‌باشد و از انرژی صرف شده جهت ایجاد جدایش صفحات آلومینیوم و شیشه/اپوکسی صرف‌نظر شده است. میزان اختلاف بین نتایج حاصل از مدل وودوارد و مدل نیمه‌تحلیلی در جدول‌های ۹، ۱۱ و ۱۳ ارائه شده است.

## ۵- تعیین انرژی جذب شده صفحات با استفاده از روش

### نیمه‌تحلیلی و تعیین حد بالستیک

انرژی نفوذ برای صفحات فلزی الیافی با استفاده از مدل نفوذ صفحات که توسط رید و ون بسط داده شد، پیش‌بینی شد [۱۶]. در این مدل، فرض شده است که وقتی یک لایه (ورقه) توسط یک پرتابه با سرعت زیاد نفوذ می‌نماید، فشار میانگین ( $\delta$ ) به‌کار گرفته شده از طرف هدف وارد بر پرتابه را می‌توان به دو مؤلفه تجزیه کرد. یک فشار مقاوم استاتیکی به دلیل تغییر شکل الاستیک-پلاستیک داخل لایه ( $\delta_s$ ) و یک فشار ثانویه مربوط به فشار مقاوم ثانویه  $\delta_d$  در ارتباط با اثرات نرخ بارگذاری [۱۶]. در نتیجه رابطه فشار را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\delta = \delta_s + \delta_d \quad (۲)$$

همچنین فرض شده است که فشار مقاوم استاتیکی مساوی است با حد فشردگی خطی الاستیک ( $\delta_e$ ) در راستای ضخامت،  $\delta_s = \delta_e$  و در نتیجه فشار مقاوم دینامیک  $\delta_d$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_d = \Gamma (\rho_t / \sigma_e)^{1/2} V_i \sigma_e \quad (۳)$$

که در آن،  $V_i$  نشان‌دهنده چگالی لایه و سرعت اولیه پرتابه هستند و  $\Gamma$  ثابتی است که مقدار آن برای یک پرتابه نیم‌کره معادل با ۱/۵ است [۱۶]. در نتیجه می‌توان رابطه (۲) را به صورت زیر نوشت:

$$\sigma = \left[ 1 + \Gamma \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} V_i \right] \sigma_e \quad (۴)$$

رید و ون نشان دادند که انرژی نفوذ یک لایه کامپوزیتی آسیب‌دیده از یک پرتابه صلب با سرعت بالا به صورت زیر است [۱۶]:

$$E_p = \frac{\pi D^2 T \sigma}{4} \quad (۵)$$

که در آن،  $T$  ضخامت لایه و  $D$  قطر پرتابه است. با قرار دادن رابطه (۴) در رابطه (۵) به‌دست می‌آید:

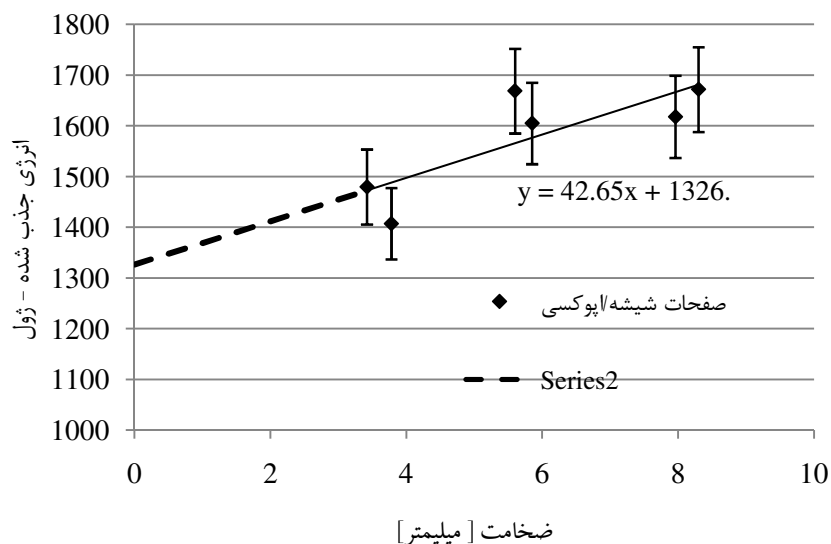
$$E_p = \frac{\pi D^2 T \sigma}{4} \left[ 1 + \Gamma \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} V_i \right] \sigma_e \quad (۶)$$

با دانستن  $E_p$ ، سرعت حد بالستیک به صورت زیر درمی‌آید:

$$V_b = \frac{\pi \Gamma \sqrt{\rho_t \sigma_e} D^2 T}{4m} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{8m}{\pi \Gamma^2 \rho_t D^2 T}} \right] \quad (۷)$$

در این تحقیق از این رابطه برای پیش‌بینی نفوذ صفحات FML تحت آزمون استفاده شده است.

همان‌طور که از رابطه (۶) مشخص است، انرژی جذب‌شده تابعی



شکل (۱۶): نتایج تجربی انرژی جذب شده توسط صفحات شیشه/اپوکسی.

جدول (۸): انرژی ویژه و انرژی جذب شده در نمونه‌های شیشه/اپوکسی ۴ میلی‌متری.

نشانهگر نمونه	وزن صفحه نمونه (گرم)	ضخامت واقعی صفحه (میلی‌متر)	انرژی جذب شده (ژول)	انرژی منتقل شده صفحه شاهد (ژول)	انرژی ویژه (گرم/ژول)
Glass - ۱۶Gl	۴۸۴	۳/۴۲	۱۴۷۹/۴۶	۶۴۵/۹۳	۳/۰۵
Glass - ۱۶Gl	۵۳۰	۳/۷۸	۱۴۰۷/۱۶	۷۱۸/۲	۲/۶۵

جدول (۹): انرژی ویژه و انرژی جذب شده در نمونه‌های گلار ۴ میلی‌متری.

نشانهگر نمونه	وزن صفحه نمونه (گرم)	ضخامت واقعی صفحه (میلی‌متر)	انرژی منتقل شده صفحه شاهد (ژول)	انرژی جذب شده (ژول)	انرژی تحلیلی (گرم/ژول)	درصد اختلاف	انرژی ویژه (گرم/ژول)
FML-۲Al(۲۰۲۴)-۱۰Gl	۸۳۶	۴/۶۲	۵۳۸/۴۰	۱۵۸۶/۹۹	۱۵۱۱/۹۵	۴/۷۲	۱/۸۹
FML-۲Al(۷۰۷۵)-۸Gl	۸۳۶	۴/۲۴	۵۶۵/۸۶	۱۵۵۹/۵۳	۱۵۷۵/۰۶	۰/۹۸	۱/۸۶
FML-۲Al(۷۰۷۵)-۸Gl	۸۴۲	۴/۲۱	۴۵۶/۹۷	۱۶۶۸/۴۲	۱۵۷۳/۷۸	۵/۸۸	۱/۹۸

جدول (۱۰): انرژی ویژه و انرژی جذب شده در نمونه تمام شیشه/اپوکسی ۶ میلی‌متری.

شماره نمونه	وزن صفحه نمونه (گرم)	ضخامت واقعی صفحه (میلی‌متر)	انرژی منتقل شده صفحه شاهد (ژول)	انرژی جذب شده (ژول)	انرژی ویژه (گرم/ژول)
Glass - ۲۴Gl	۷۸۰	۵/۶۰	۵۲۰/۷۴	۱۶۰۴/۶۵	۲/۰۵
Glass - ۲۴Gl	۷۹۲	۵/۸۵	۵۳۱/۲	۱۵۹۴/۱۹	۲/۰۱

جدول (۱۱): انرژی ویژه و انرژی جذب‌شده در نمونه گلار ۶ میلی‌متری.

نشانه‌گر نمونه	وزن صفحه نمونه (گرم)	ضخامت واقعی (صفحه میلی‌متر)	انرژی منتقل صفحه شاهد (ژول)	انرژی جذب‌شده (ژول)	انرژی تحلیلی (گرم/ژول)	درصد اختلاف	انرژی ویژه (گرم/ژول)
FML-۳Al (۲۰۲۴) - ۱۶Gl	۱۳۰۲	۷/۲۳	۴۱۶/۸۱	۱۷۰۸/۵۸	۱۵۸۹/۳۶	۶/۹۷	۱/۳۱
FML-۳Al (۲۰۲۴) - ۱۶Gl	۱۳۰۶	۷/۰۷	۳۸۲/۳۵	۱۷۴۳/۰۴	۱۵۸۲/۳۳	۹/۲۲	۱/۳۳
FML-۳Al (۷۰۷۵) - ۱۲Gl	۱۲۷۶	۶/۴۰	۳۳۰/۴۵	۱۷۹۴/۹۴	۱۶۲۴/۷۴	۹/۴۸	۱/۴
FML-۳Al (۷۰۷۵) - ۱۲Gl	۱۲۶۶	۶/۳۹	۳۳۶/۵۷	۱۷۸۸/۸۲	۱۶۲۴/۱۰	۹/۲	۱/۴۱

جدول (۱۲): انرژی ویژه و انرژی جذب‌شده در نمونه شیشه/ اپوکسی ۸ میلی‌متری.

نشانه‌گر نمونه	وزن صفحه نمونه (گرم)	ضخامت واقعی صفحه (میلی‌متر)	انرژی منتقل شده صفحه شاهد (ژول)	انرژی جذب‌شده (ژول)	انرژی ویژه (گرم / ژول)
Glass - ۳۰Gl	۱۱۳۶	۸/۳	۴۵۳/۸۴	۱۶۷۱/۵۵	۱/۴۷
Glass - ۳۰Gl	۱۰۸۸	۷/۹۶	۵۰۷/۶۴	۱۶۱۷/۷۵	۱/۴۸

جدول (۱۳): انرژی ویژه و انرژی جذب‌شده در نمونه گلار ۸ میلی‌متری.

نشانه‌گر نمونه	وزن صفحه نمونه (گرم)	ضخامت واقعی صفحه (میلی‌متر)	انرژی منتقل شده صفحه شاهد (ژول)	انرژی جذب‌شده (ژول)	انرژی تحلیلی (گرم/ژول)	درصد اختلاف	انرژی ویژه (گرم/ژول)
FML-۴Al(۲۰۲۴) - ۱۸Gl	۱۵۹۴	۸/۳۱	۳۰۰/۸۶	۱۸۲۴/۵۳	۱۶۰۱/۰۹	۱۲/۲۴	۱/۱۴
FML-۴Al(۲۰۲۴) - ۱۸Gl	۱۵۷۸	۸/۴۴	۳۴۷/۹۵	۱۷۷۷/۴۴	۱۶۰۶/۶۷	۹/۶	۱/۱۲
FML-۴Al(۷۰۷۵) - ۱۸Gl	۱۸۰۴	۸/۸۷	۲۰۱/۲۸	۱۹۲۴/۱۱	۱۶۸۷/۲۳	۱۲/۳۱	۱/۰۶

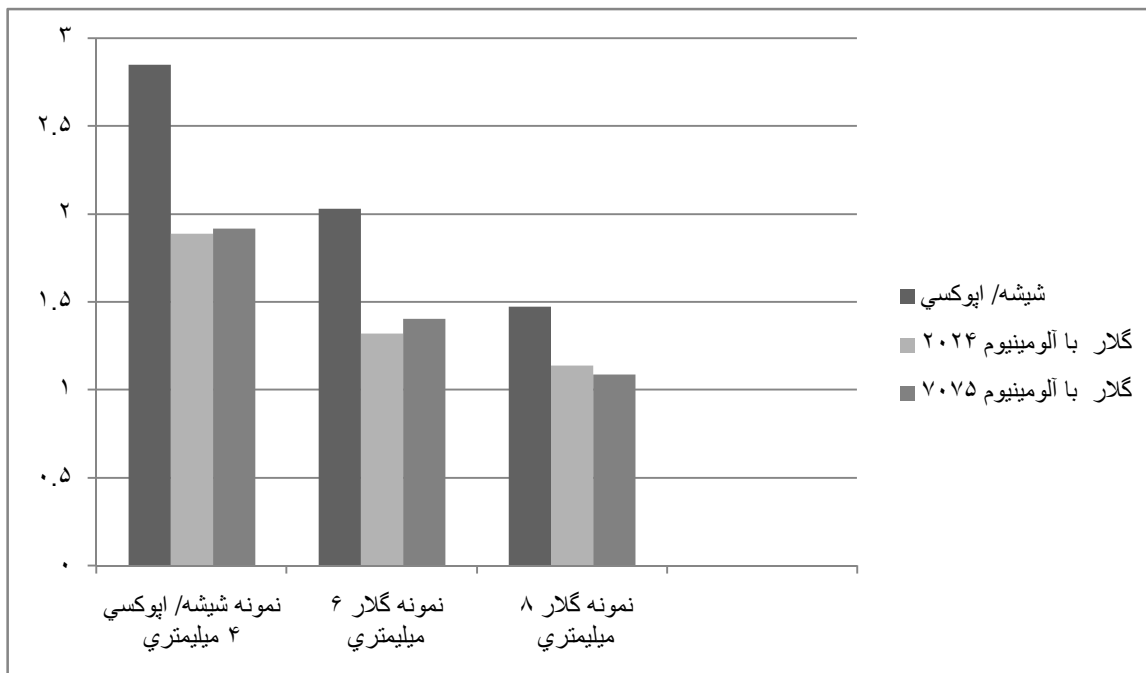
میزان انرژی ویژه کاهش می‌یابد. چنین روندی در نمونه‌های گلاب نیز مشاهده می‌شود. علی‌رغم اینکه با افزایش ضخامت نمونه‌ها میزان جذب انرژی افزایش یافته است ولی این افزایش کمتر از میزان افزایش در وزن نمونه‌ها می‌باشد. همچنین مقایسه انرژی جذب‌شده در نمونه‌های گلاب و شیشه اپوکسی با ضخامت برابر بیانگر این امر است که در یک ضخامت برابر انرژی ویژه نمونه‌های گلاب کمتر از شیشه اپوکسی می‌باشد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که در ضخامت برابر نمونه‌های گلاب انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های شیشه اپوکسی جذب می‌کند ولی نمونه‌های گلاب وزن بیشتری دارند. البته در این بین میزان انرژی ویژه نمونه‌های گلاب با آلومینیوم ۷۰۷۵ بالاتر از نمونه‌های گلاب با آلومینیوم ۲۰۲۴ می‌باشد. این مسئله به علت استحکام بالاتر ورق‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد.

شکل ۱۷ میزان انرژی ویژه صفحات شیشه/اپوکسی و گلاب با لایه‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ و ضخامت‌های مختلف آورده شده است. میزان اختلاف بین انرژی ویژه این صفحات در این شکل با وضوح بهتری نشان داده شده است.

همان‌طور که در این جدول‌ها مشخص است، کمترین اختلاف در نمونه‌های با ضخامت ۴ میلی‌متر و بیشترین اختلاف در نمونه‌های با ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به اینکه میزان جدایش بین صفحات آلومینیوم و لایه‌های شیشه/اپوکسی در نمونه‌های ضخیم‌تر بیشتر است، این امر منطقی می‌باشد.

#### ۶- تعیین انرژی ویژه صفحات گلاب

یکی از مواردی که همواره به‌عنوان پارامتر طراحی مدنظر مهندسين می‌باشد، میزان انرژی جذب‌شده بر واحد وزن سازه‌ها (انرژی ویژه) می‌باشد. بنابراین در این بخش میزان انرژی جذب‌شده و انرژی ویژه هر یک از صفحات گلاب بررسی و مقایسه شده است. در جدول ۸ انرژی جذب‌شده، انرژی ویژه، ضخامت و وزن صفحه نمونه‌های شیشه/اپوکسی با ضخامت ۴ میلی‌متر آورده شده است. در جدول ۹ انرژی جذب‌شده و انرژی ویژه نمونه‌های گلاب ۴ میلی‌متری آورده شده است. همچنین نتایج مشابه برای نمونه‌های شیشه/اپوکسی و گلاب ۶ و ۸ میلی‌متری به‌ترتیب در جدول‌های ۱۰ تا ۱۳ آورده شده است. بررسی انرژی ویژه در نمونه‌های شیشه/اپوکسی نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت نمونه‌ها



شکل (۱۷): مقایسه انرژی ویژه توسط صفحات شیشه/اپوکسی و گلاب با ضخامت‌های مختلف.



## ۷- نتیجه‌گیری

۷۰۷۵ بالاتر از نمونه‌های گلار با آلومینیوم ۲۰۲۴ می‌باشد. این مسئله به علت استحکام بالاتر ورق‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ می‌باشد.

## ۸- مراجع

1. Khodadadi, A., Liyaghat, G.H., and Akbari, M.A. "Experimental Analysis of Penetration into Targets Made of Kevlar Laminates with ST Fluids", *Mech. and Aero. J.*, Vol. 9, No. 4, PP. 85-94, 2013 (In Persian).
2. Recht, R.F. and Ipson, T.W. "Ballistic Perforation Dynamics", *J. Applied Mechanics*, Vol. 30, No. 3, PP. 385-391, 1963.
3. Beynet, P. and Plunkett, R. "Plate Impact and Plastic Deformation by Projectiles", *Experimental Mechanics*, Vol. 11, No.2, PP. 64-70, 1971.
4. Colder, C.A., Kelly, J.M., and Goldsmith, W. "Projectile Impact on Infinite Visco-Plastic Plate", *Int. J. Solids Structures*, Vol. 7, No.9, PP. 1143-1152, 1971.
5. Longdon, G.S., Cantwell, W.J., and Nurick, G.N. "The Blast Response of Novel Thermoplastic-Based Fiber-Metal Laminates, Some Preliminary Results and Observations", *Composite Sci. and Tech.*, Vol. 65, No.6, PP. 861-872, 2005.
6. Hessabi, Z.R., Majidi, B., and Aghazadeh, J. "Effects of Stacking Sequence on Fracture Mechanisms in Quasi-Isotropic Carbon/Epoxy Laminate under Tensile Loading", *Iran Polymer J.*, Vol. 14, No.6, PP. 531-538, 2005.
7. Langdon, G.S. et. Al. "Failure Characterization of Blast-Loaded Fiber-Metal Laminate Panels Based on Aluminum and Glass Fiber Reinforced Polypropylene", *Composite Sci. and Tech.*, Vol. 67, PP. 1385-1405, 2007.
8. Wu, G., Yung, J.M., and Hahn, H.T. "The Impact Properties and Damage Tolerance and of Bi-Directionally Reinforced and of Bi-Directionally Reinforced Fiber Metal Laminates", *J. of Materials and Sci.*, Vol. 42, No.3, PP. 948-957, 2007.
9. Vlot, A. and Gunnink, J.W. "Fiber Metal Laminates", *Kluwer Academic, Netherlands*, PP. 3-31, 2001.
10. Abdullah, M.R. and Cantwell, W.J. "The Impact Resistance of Polypropylene-Based Fiber-Metal Laminates", *Composites Sci. and Tech.*, Vol 66, No.11-12, PP. 1682-1693, 2006.
11. Volt, A., Vogelesang, L.B. and Vries, T.J.D. "Towards Application of Fiber-Metal Laminates in Larger Aircraft", *Aircraft Eng. Aero.Tech.*, Vol. 71, No.6, PP. 558-570, 1999.
12. Laliberte, J.F., Poon, C., Straznicky, P.V., and Fahr, A. "Post Impact Fatigue Damage Growth in Fiber-Metal Laminates", *Int. J. Fatigue*, Vol. 24, No.2-4, PP. 249-256, 2002.
13. Vogelesang, L.B. and Vlot, A. "Development of Fiber-Metal Laminates for Advanced aerospace

در مقاله حاضر مقاومت به نفوذ صفحات گلار متشکل از لایه‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ و صفحات شیشه اپوکسی با ضخامت‌های اسمی ۴، ۶ و ۸ میلی‌متر به صورت تجربی بررسی شد. آزمایش‌های ضربه بالستیک با گلوله ۷/۶۲ میلی‌متری و با سرعت ۷۲۰ متر بر ثانیه بر روی نمونه‌ها انجام گردید و در نهایت انرژی جذب‌شده در هر صفحه تعیین شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

۱- در ضخامت برابر انرژی جذب‌شده در صفحات گلار از صفحات شیشه/ اپوکسی بیشتر است.

۲- میزان افزایش انرژی جذب‌شده در صفحات گلار متشکل از ورقه‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ بیشتر از صفحات گلار متشکل از ورقه‌های آلومینیوم ۲۰۲۴ باشد. این موضوع به علت استحکام بالاتر ورق‌های ۷۰۷۵ نسبت به ورق‌های ۲۰۲۴ می‌باشد. در صفحات گلار با ضخامت ۶ و ۸ میلی‌متر که تعداد بیشتری از ورقه‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ دارند افزایش انرژی مشهودتر می‌باشد.

۳- صفحات چندلایه فلز- الیافی بعد از انجام آزمایش، برش داده شده و مودهای خرابی آن بررسی شد. مشاهدات بصری بیانگر این موضوع بود که در صفحات چند لایه فلز - الیافی مودهای خرابی (خردشدگی رزین و پارگی الیاف، بازشدگی بین لایه‌های پتالینگ آلومینیوم، تغییر فرم لایه پلاستیک آلومینیوم و لایه لایه‌شدن) مشاهده شد.

۴- مقایسه نتایج حاصل از مدل نیمه تحلیلی و تجربی نشان داد که کمترین اختلاف بین نتایج تجربی و مدل نیمه تحلیلی در نمونه‌های با ضخامت ۴ میلی‌متر و بیشترین اختلاف در نمونه‌های با ضخامت ۸ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به اینکه جدایش بین لایه‌ای در ارائه مدل نیمه تحلیلی نظر گرفته نشده است و میزان جدایش بین صفحات آلومینیوم و لایه‌های شیشه/ اپوکسی در نمونه‌های ضخیم‌تر، بیشتر است، این امر منطقی می‌باشد.

۵- بررسی انرژی ویژه در نمونه‌های شیشه/ اپوکسی و گلار نشان داد که با افزایش ضخامت نمونه‌ها میزان انرژی ویژه کاهش می‌یابد. علی‌رغم اینکه با افزایش ضخامت نمونه‌ها میزان جذب انرژی افزایش یافته است، ولی این افزایش کمتر از میزان افزایش در وزن نمونه‌ها می‌باشد. همچنین مقایسه انرژی جذب‌شده در نمونه‌های گلار و شیشه اپوکسی با ضخامت برابر بیانگر این امر است که انرژی ویژه نمونه‌های گلار کمتر از شیشه اپوکسی می‌باشد. البته در این بین میزان انرژی ویژه نمونه‌های گلار با آلومینیوم



19. Sabzikar Brojerdi, M., Daryushi, S., and Sedighi, M. "Experimental and Analytical Low Velocity Impact Investigation on Fiber-Metal Plates", Iranian J. Polymer Sci. and Tech., Vol. 1, No.111, PP. 69-78, 2011.
20. Sabzikar Brojerdi, M., Daryushi, S., and Sedighi, M. "Bending Properties of Sandwich Beams with Fiber Metal Laminate Face Sheet", Iranian J. Polymer Sci. and Tech., Vol. 25, No. 5, 375-382, 2013.
21. Paknejad, R., Ashenai Ghasemi, F., and Malekzadeh Fard, K. "Response of Fully-Clamed Composite Laminated Plate Subjected to Low Velocity Impact Using Galerkin Method", Mech. Eng. Vol. 14, No. 1, PP. 45-50, 2014.
22. Ahmadi, H. "Experimental and Numerical Ballistic Impact Investigation on GLARE, Master of Sci. Thesis, Faculty of Eng. Modarres University, 2009.
23. Dadrand, GH. "Experimental and Numerical Penetration Investigation of Fiber-Metal Laminated", Master of Sci. Thesis, Faculty of Eng., Imam Hosein University, 2012.
- Structures", J. Materials Proc. Tech., Vol. 103, No.1, PP. 1-5, 2000.
14. Michells, S. Hoo Fatt, Chunfu, L., Duane, M., Revilock, J.R., and Dale, A. "Ballistic Impact of GLARE Fiber-Metal Laminates", Composite Structures, Vol. 61, No.1-2, PP. 73-88, 2003.
15. Woodward, R.L. "A Simple One-Dimensional Approach to Modeling Ceramic Composite Armor Defeat", Int. J. Impact Eng., Vol. 9, No.4, PP. 455-474, 1990.
16. Reid, S.R. and Wen, H.M. "Perforation of FRP Laminates and Sandwich Panels Subjected to Missal Impact", in: S.R. Reid, G. Zhou, Editors. Impact Behavior of Fiber-Reinforced Composite Materials and Structures, Cambridge: Woodhead Publishing, PP. 239-79, 2000.
17. Børvik, T., Forrestal, M.J., Hopperstad, O.S., Warren, T.L., and Langseth, M. "Perforation of AA5083-H116 Aluminum Plates with Conical-Nose Steel Projectiles-Calculations", Int. J. Impact Eng. Vol. 36, No.3, PP. 426-437, 2009.
18. Sadighi, M., Tajdari, M., and Dariushi, S. "An Investigation on Tensile Properties of Glass Fiber/ Aluminium Laminates", Iranian J. of Polymer Sci. and Tech., Vol. 1, No.99, PP. 31-39, 2009