

مروری بر رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه های فلزی-الیافی GLARE

چکیده: چندلایه های فلزی-الیافی سازه هایی متشکل از لایه های نازک متوالی از ورقه های فلزی و کامپوزیت های تقویت شده با الیاف هستند که به یکدیگر اتصال داده می شوند. این سازه ها دارای وزن سبک، خواص مکانیکی بالا، مقاومت به ضربه، خستگی و سایش بالایی هستند. گلر (GLARE) نوعی از کامپوزیت - های فلزی-الیافی می باشد که از ترکیب ورقه های آلومینیومی با الیاف شیشه/اپوکسی بدست می آید و در صنایع هوافضا، دریایی و خودروسازی کاربردهای فراوانی دارد. در این مقاله مروری، ضمن آشنایی با ساختار این کامپوزیت ها، انواع آنها و مفهوم ضربه سرعت پایین، به بررسی تحقیقات گذشته در مورد رفتار ضربه سرعت پایین گلر و عوامل مؤثر بر آن پرداخته شده است. طبق نتایج حاصله، رفتار ورقه های فلزی-الیافی گلر در مقابل ضربه سرعت پایین تحت شرایط مختلف، متغیر است و پارامترهای مختلفی همچون ضخامت، نوع فلز، ترتیب چینش، جرم ضربه زن، هندسه ضربه زن، زاویه برخورد و کسر حجمی فلز می توانند در افزایش یا کاهش مقاومت به ضربه این نوع سازه ها دخیل باشند.

واژه های راهنما: چندلایه فلزی-الیافی، مواد مرکب، شیشه/اپوکسی، آلومینیوم، ضربه سرعت پایین، گلر

هادی رزقی ملکی*

استادیار،
گروه مهندسی مکانیک،
دانشگاه بناب، بناب

ابوالفضل توتونچی

استادیار،
گروه مهندسی مواد،
دانشگاه تبریز، تبریز

فاطمه فضلی شکوهی

دانشجوی کارشناسی ارشد،
گروه مهندسی مواد،
دانشگاه تبریز، تبریز

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

Hadi Rezghi Maleki*

Assistant Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, University
of Bonab, Bonab

Abolfazl Tutunchi

Assistant Professor,
Department of Materials
Engineering, University
of Tabriz, Tabriz

Fatemeh Fazli Shokouhi

MSc. Student,
Department of Materials
Engineering, University
of Tabriz, Tabriz

A review on low velocity impact behavior of GLARE fiber metal laminates

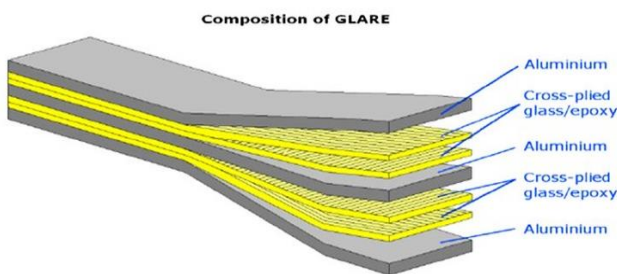
Abstract: Fiber metal laminates are composed of alternating thin layers of metal sheets and fiber-reinforced composites that are adhered to each other. These structures exhibit attributes such as lightweight construction and superior mechanical properties, as well as excellent resistance to impact, fatigue, and wear. GLARE is a type of fiber metal laminates that is manufactured from the combination of aluminum sheets with glass/epoxy fibers and finds extensive utility across the aerospace, marine, and automotive industries. In this review article, while introducing the structure and different types of Glare, the concept of low velocity impact, and the effective factors on low velocity impact behavior of glare have been investigated through previous studies. Based on the results, the behavior of Glare subjected to low velocity impact is influenced by various factors such as thickness, metal type, stacking sequence, hammer mass, impact angle and metal volume fraction. These factors can either enhance or diminish the resistance of such structures.

Keywords: Fiber metal laminates, Composites, Glass/epoxy, Aluminum, Low velocity impact, Glare

۱- مقدمه

در دانشگاه صنعتی دلفت، مطرح شد [۲]. چندلایه‌ها با توجه به الیاف مورد استفاده در ساختارشان به سه دسته اصلی شامل آرال^۲ (چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف آرامیدی)، گلر^۳ (چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه) و کارال^۴ (چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن) تقسیم‌بندی شده‌اند.

گلر یکی از پرکاربردترین چندلایه‌های فلزی-الیافی است که از لایه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و ورقه‌های نازک آلومینیوم آلیاژی با استحکام بالا تشکیل شده است. شکل (۲) شماتیکی از گلر را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیکی از گلر [۳]

این سازه‌ها با توجه به زاویه چینش الیاف و نوع ورق آلومینیومی بکار رفته در آنها طبقه‌بندی می‌شوند. جدول (۱) انواع گلر و نحوه طبقه‌بندی آنها را نشان می‌دهد.

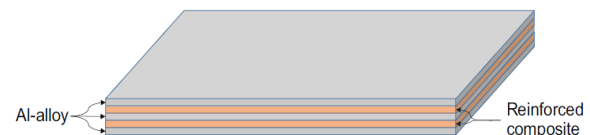
جدول ۱ انواع گلر و نحوه طبقه‌بندی آنها

نوع	زیر مجموعه	ورق آلومینیوم	ضخامت ورق	جهت‌گیری الیاف
GLARE1	-	7075-T6	0/3- 0/4	0/0
GLARE2	GLARE 2A GLARE 2B	2024-T3	0/2- 0/5	0/0 90/90
GLARE3	-	2024-T3	0/2- 0/5	0/90
GLARE4	GLARE 4A GLARE 4B	2024-T3	0/2- 0/5	0/90/0 90/0/90
GLARE5	-	2024-T3	0/2- 0/5	0/90/90/0
GLARE6	GLARE 6A GLARE 6B	2024-T3	0/2- 0/5	+45/-45 -45/+45

گلر با روش‌های مختلفی تولید می‌شود. متداول‌ترین روشی که برای تولید چندلایه‌های فلزی-الیافی از جمله گلر استفاده می‌شود، روش اتوکلاو^۵ است [۴].

روش مقرون‌به‌صرفه دیگر برای تولید گلر، روش قالب‌گیری تزریقی^۶ یا VARTM است که در آن از تکنیک‌های آماده‌سازی

در دهه‌های اخیر، کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به دلیل ویژگی‌های خاصی همچون سبکی، استحکام و سفتی ویژه بالا، مقاومت به خوردگی خوب و مقاومت به خستگی بالا به مواد منحصر بفردی در صنایع هوافضا، دریایی، خودروسازی، حمل و نقل، ورزشی و غیره تبدیل شده‌اند. با وجود مزایای ذکر شده، یک سری محدودیت‌ها همچون مقاومت به ضربه پایین، مقاومت به سایش پایین و آسیب‌پذیری در محیط‌های خشن برای استفاده از این مواد وجود دارد. از طرفی استفاده از فلزات سبکی همچون آلومینیوم به تنهایی جوابگوی خواسته‌های مورد نیاز در صنایع مختلف نیست. چندلایه‌های فلزی-الیافی (FMLs^۱) جایگزین مناسبی برای کامپوزیت‌های زمینه پلیمری و ورق‌های آلومینیومی هستند که خواصی همچون وزن کم، استحکام بالا، مقاومت در برابر ضربه بالا، مقاومت در برابر سایش و عملکرد خستگی خوب کامپوزیت‌ها را ترکیب می‌کنند. برخی از الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌ها همچون شیشه و کربن دارای مقاومت ضربه‌ای نسبتاً پایینی بوده و برخی دیگر مانند الیاف کولار حساسیت بالایی به شرایط محیطی و خوردگی دارند. از طرفی خواص خستگی آلیاژهای آلومینیوم به تنهایی پایین است. توسعه چندلایه‌های فلزی-الیافی انعکاس‌دهنده تاریخ طولانی تحقیقاتی است که در سال ۱۹۴۵ در فوکر آغاز شد. بعدها، سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده (ناسا) در برنامه شاتل فضایی به تقویت قطعات فلزی با مواد کامپوزیتی علاقه‌مند شد و از آنجا مفهوم FML متولد شد. این سازه‌ها در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ در دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی دلفت هلند توسعه یافتند و سپس توسط شرکت AKZO در سال ۱۹۸۷ تجاری شدند. شکل (۱) شماتیکی از یک چندلایه فلزی-الیافی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ شماتیکی از ساختار چندلایه‌های فلزی-الیافی [۱]

ایده استفاده از آلیاژهای آلومینیوم و لایه‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری بصورت یک چندلایه فلزی-الیافی، برای اولین بار

^۵ Autoclave

^۶ Vacuum assisted resin transfer molding

^۱ Fiber metal laminates

^۲ Aramid Reinforced Aluminum Laminate (ARAL)

^۳ Glass Reinforced Laminate (GLARE)

^۴ Carbon Reinforced Aluminum Laminate (CARAL)

در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی مانند بدنه هواپیماها، خودروها و یا کشتی‌ها، مقاومت در برابر ضربه یکی از مسائل پراهمیت به شمار می‌رود. اثرات ناشی از ضربه می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری بر روی جان افراد و سازه‌ها داشته باشد. محققان و تولیدکنندگان همواره تلاش کرده‌اند تا به مواد و سازه‌های سبک همراه با مقاومت بالا به ضربه دسترسی پیدا کنند. تست ضربه در سازه‌ها را می‌توان به چهار نوع طبقه‌بندی کرد:

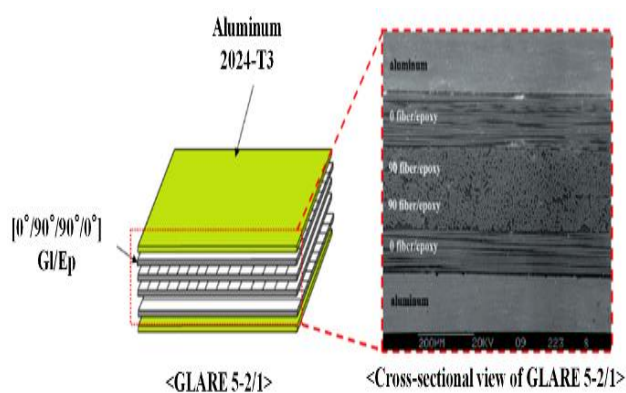
- ضربه سرعت پایین^۱
- ضربه سرعت متوسط^۲
- ضربه سرعت بالا^۳
- ضربه سرعت فوق‌العاده^۴

هر کدام از حالات در محدوده‌های مختلفی از سرعت اتفاق می‌افتند و اثرات آنها با یکدیگر تفاوت دارد. ضربه سرعت پایین در سرعت‌های کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد [۹]. ضربه سرعت متوسط در محدوده سرعتی از ۱۰ متر بر ثانیه تا ۵۰ متر بر ثانیه رخ می‌دهد. ضربه سرعت بالا ممکن است بین ۵۰ متر الی ۱۰۰۰ متر بر ثانیه باشد، در حالی که ضربه با سرعت فوق‌العاده، دامنه‌ای از ۲۰۰۰ متر بر ثانیه تا ۵۰۰۰ متر بر ثانیه دارد [۱۰]. ضربه سرعت پایین یکی از حالات ضربه است که در استفاده از سازه‌ها با آن مواجه هستیم در حالیکه ضربات سرعت بالا در شرایط خاصی اتفاق می‌افتند. از نمونه‌های ضربه سرعت پایین می‌توان سقوط ابزار و وسایل مختلف روی سازه‌ها، تصادفات با سرعت پایین تر از ۴۰ کیلومتر بر ساعت، برخورد سنگ، تگرگ، اشیاء و پرندگان را نام برد که ممکن است این حالت ضربه منجر به آسیب سازه در طول فرآیندهای استفاده، نگهداری و ساخت شود [۱۱]. این نوع ضربات باعث ایجاد آسیب‌های مختلفی در سازه‌ها می‌شود و اگر آسیب ناشی از ضربه و بارگذاری شدید باشد، ممکن است منجر به شکست ناگهانی ساختار کامپوزیتی شود.

نظر به ماهیت شکل‌پذیری فلزات، ضربه یک تهدید جدی برای یک سازه فلزی نیست؛ زیرا یک فلز می‌تواند مقدار زیادی انرژی ضربه را در ناحیه الاستیک تا تسلیم جذب کند و ماده ممکن است قبل از شکست دچار کرنش‌های بزرگ شود. در مقابل، بیشتر مواد کامپوزیتی شکننده هستند و انرژی ضربه را فقط در ناحیه الاستیک قبل از گذراندن حالت‌های مختلف شکست جذب می‌کنند. در غیاب تغییر شکل پلاستیک، آسیب در کامپوزیت‌ها به عنوان آسیب ضربه به سختی قابل مشاهده

سطح آلومینیوم برای افزایش مقاومت برشی بین لایه‌های استفاده می‌کند. گلر معمولاً از دو لایه خارجی آلومینیومی و لایه‌های داخلی الیاف شیشه تشکیل شده است که روش‌های آندایزینگ متفاوتی روی ورق‌های آلومینیومی اعمال می‌شود تا استحکام و چقرمگی شکست را بهبود بخشد [۵].

گلر در مقایسه با کامپوزیت‌های فلزی-الیافی تقویت شده با الیاف کربن (کارال) دارای رفتار ضربه‌ای بهتر و در مقایسه با کامپوزیت‌های فلزی-الیافی تقویت شده با الیاف کولار (آرال) دارای استحکام کششی بهتری است. کاربردهای گلر شامل پوسته بدنه اصلی، لبه‌های دم افقی و عمودی هواپیماها است [۶] و [۷]. امروزه گلر به عنوان یک ماده شناخته شده در بسیاری از کاربردهای سازه‌ای پیشرفته نظیر پوسته فوقانی بدنه هواپیمای ایرباس آ-۳۸۰ و کف اتاقک حمل بار بویینگ ۷۷۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر طبقه‌بندی نشان‌دهنده شده در جدول (۱)، یک سیستم کدگذاری مخصوص برای گلرها استفاده می‌شود. در این سیستم، بعد از کلمه GLARE چهار عدد وجود دارد که عدد اول نشان‌دهنده نوع گلر، عدد دوم نشان‌دهنده تعداد لایه‌های آلومینیوم، عدد سوم نشان‌دهنده تعداد لایه‌های کامپوزیت بکار رفته و عدد چهارم نشان‌دهنده ضخامت ورق آلومینیومی می‌باشد. برای مثال در GLARE 3-3/2-0.4 اولین عدد از سمت چپ (عدد ۳)، نوع گلر (چینش ۰/۹۰) را نشان می‌دهد، دومین عدد (عدد ۳) تعداد ورق‌های آلومینیوم بکار رفته را نشان می‌دهد. سومین عدد (عدد ۲) تعداد لایه‌های کامپوزیت (هر لایه شامل یک لایه ۰ درجه و یک لایه ۹۰ درجه) بین آلومینیوم‌ها و عدد آخر (عدد ۰/۴) ضخامت ورق آلومینیوم بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد. ضخامت نمونه تولید شده با در نظر گرفتن ۰/۲۵ میلی‌متر برای ضخامت هر لایه کامپوزیتی معادل ۱/۷ میلی‌متر خواهد بود. شکل (۳) نمایی از GLARE 5-2/1 را نشان می‌دهد.



شکل ۳ نمایی از GLARE 5-2/1 [۸]

⁴ Hyper velocity impact

^۱ Low velocity Impact

^۲ Intermediate velocity impact

^۳ High velocity impact

شکل پلاستیک لایه آلومینیوم، ترک خوردگی ماتریس و الیاف، لایه لایه شدن بین لایه‌های کامپوزیت و جداسدن لایه‌های فلزی و کامپوزیت.

هر مکانیزم آسیب، پیچیدگی خاص خود را دارد و اندازه-گیری مقاومت آسیب چندلایه فلزی-الیافی را دشوار می‌کند. آسیب ممکن است در لایه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP)^۱ در یک لایه یا بین لایه‌ها رخ دهد اما آسیب نهایی زمانی رخ می‌دهد که آسیب در لایه‌های مختلف ایجاد شود. رفتار چندلایه فلزی-الیافی تحت ضربه سرعت پایین به عوامل مختلفی از جمله نحوه چینش، ضخامت، نوع ماده، شرایط مرزی و شکل ضربه‌زن بستگی دارد [۱۵] و [۱۶]. البته در برخی پژوهش‌ها تأثیر عواملی همچون نانوذرات و شکل الیاف بر رفتار ضربه کامپوزیت‌ها نیز بررسی و اثربخشی نانوذرات و شکل الیاف در رفتار ضربه کامپوزیت‌ها اثبات شده است [۱۷-۱۹].

در این مقاله مروری، رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های گلر با جمع‌آوری نتایج مقالات مرتبط در این زمینه و بررسی عوامل تأثیرگذار بر استحکام ضربه سرعت پایین گلر همراه با نحوه ارزیابی نتایج تست ضربه مورد مطالعه قرار گرفته است.

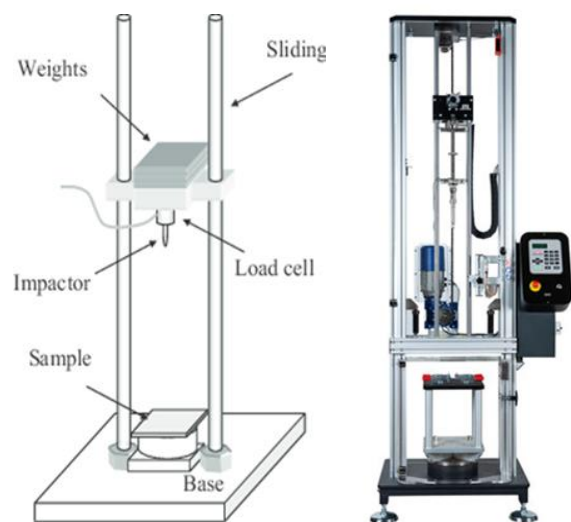
۲- مطالعات تجربی تأثیر ضربه سرعت پایین بر روی گلر

ضربه شامل برخورد دو جسم است: ضربه زننده و هدف. در هنگام برخورد، نیروی تماس با فرورفتگی ضربه‌زننده به سمت هدف ایجاد می‌شود. دانش پاسخ دینامیکی سازه و مقاومت در برابر آسیب آن، برای بهینه‌سازی سازه‌ای که نیاز به ایمنی بالا مانند کاربردهای سازه‌ای هوایی دارد، بسیار مهم است.

اکثر آزمایشات ضربه بر روی یک صفحه مسطح با مرزهای گیردار انجام می‌شود. ناتوانی در تجسم آسیب داخلی یک چندلایه کامپوزیتی، جامعه تحقیقاتی را وادار کرده تا پدیده ضربه با سرعت پایین را به طور دقیق بررسی کنند. آسیب ضربه داخلی در گلر بیشتر به یک منطقه نسبتاً کوچک اطراف نقطه برخورد محدود می‌شود. اندازه آسیب داخلی معمولاً کوچکتر از اندازه فرورفتگی توام با تغییر شکل پلاستیکی قابل مشاهده در لایه‌های آلومینیومی بیرونی برای ورقه‌های گلر می‌باشد [۲۰-۲۴]. رفتار ضربه سرعت پایین گلر، تحت تأثیر عوامل مختلفی همچون ضخامت، جنس فلز، ترتیب چینش، جرم و هندسه ضربه زننده، زاویه برخورد ضربه زننده با هدف، کسر حجمی فلز قرار دارد. تکامل آسیب لایه‌های آلومینیوم و لایه‌لایه شدن در سطح مشترک بین آلومینیوم و کامپوزیت تحت تأثیر این عوامل

طبقه‌بندی می‌شود که یکپارچگی ساختاری قطعه را به شدت کاهش می‌دهد. بنابراین کامپوزیت‌ها می‌توانند انرژی را به صورت تغییر شکل الاستیک و از طریق مکانیسم‌های آسیب جذب کنند. واضح است که اکثریت قریب به اتفاق ضربه‌ها بر روی یک صفحه کامپوزیتی در جهت عرضی خواهد بود زیرا به دلیل عدم تقویت ضخامت، مقاومت در برابر آسیب عرضی به طور محسوسی ضعیف است [۱۲].

برای انجام هر تستی استانداردهای مشخصی مورد نیاز است. استاندارد ASTM D7136 مجموعه‌ای از آزمایش‌های استاندارد شده برای ارزیابی رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف است که به محققین و شرکت‌ها اجازه می‌دهد تا یافته‌ها و محصولات خود را طبق دستورالعمل‌های تعیین‌شده در این استاندارد ارزیابی کنند. در این استاندارد ابعاد نمونه کامپوزیتی، جرم ضربه‌زننده، هندسه ضربه‌زننده، روش ضربه زدن به نمونه و تجزیه و تحلیل آسیب‌ها به تفصیل شرح داده شده است. این استاندارد بر اساس سقوط آزاد وزنه می‌باشد و برای اجرای آن، ماشین آلات و تجهیزات مخصوصی مورد نیاز است. مهمترین ماشین مورد نیاز، دستگاه تست ضربه سرعت پایین است که این دستگاه همراه با قسمت‌های مختلف آن در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ نمایی از دستگاه ضربه سرعت پایین و اجزای آن [۱۳]

با توجه به خواص مکانیکی متفاوت لایه‌های فلزی و کامپوزیت، فرآیند ضربه با سرعت پایین می‌تواند باعث ایجاد حالت‌های آسیب مختلف بین و درون چندلایه فلزی-الیافی شود [۱۴]. چهار حالت آسیب عمده در چندلایه‌ها وجود دارد: تغییر

^۱ Glass Fiber Reinforced Plastics

همچنین به دلیل تمرکز تنش موضعی تحت انرژی‌های ضربه‌ای بالاتر، ترک‌هایی بر روی سمت آسیب‌دیده ایجاد شد. مساحت کل قسمت آسیب‌دیده با افزایش انرژی ضربه، افزایش یافت. با ضخیم‌تر شدن نمونه تحت همان انرژی ضربه، سطح قسمت آسیب‌دیده کاهش یافت و توانایی آن در جذب انرژی ضربه بیشتر شد؛ در حالیکه حداکثر انحراف مرکزی کاهش یافت. علاوه بر این، اوج نیروی تماس افزایش یافت و مدت زمان برخورد کوتاه‌تر گردید.

در مطالعه‌ای دیگر که توسط وانگ و همکاران [۳۰] انجام شد، ضخامت گِبر بر مقاومت ضربه با سرعت پایین آن تأثیر گذاشت و گِبر نازک‌تر کاهش قابل توجهی در ظرفیت تحمل بار را تجربه کرد. همچنین عباسی‌نسب و همکاران [۲۹] دریافتند که افزایش ضخامت لایه‌های الیافی و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیومی، مقاومت ضربه‌ای با سرعت پایین گِبر را کاهش می‌دهد. افزایش در ضخامت لایه‌های الیاف و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیومی موجب افزایش مدت زمان برخورد و کاهش سفتی سازه کامپوزیتی شد. یکی از دلایل اصلی افزایش مقاومت به ضربه در گِبرها استفاده از ورق‌های آلومینیومی است، هر چقدر ضخامت ورق آلومینیوم افزایش پیدا کند، مقاومت به ضربه گِبر افزایش پیدا می‌کند به شرطی که موضوع سبکی وزن و مدیریت هزینه‌ها لحاظ گردد.

۲-۱-۲- جنس فلز

جنس الیاف فلزی بکار رفته در تهیه چند لایه‌های فلزی-الیافی یکی از دیگر از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار ضربه‌ای چندلایه‌های فلزی-الیافی است. باید توجه داشت که وقتی از گِبر صحبت می‌شود چندلایه مدنظر ترکیبی از ورق آلومینیوم و الیاف شیشه است، هر چند در برخی تحقیقات به جای آلومینیوم فلزاتی همچون منیزیم، تیتانیوم و فولاد آلیاژی استفاده شده و اثرات آنها در رفتار ضربه سرعت پایین بررسی شده است [۳۱-۳۳]. در گِبر نوع ۱ به دلیل سفتی و استحکام بالای AI ۷۴۷۵، انحراف دائمی کوچک و جدالایی کمتر اتفاق می‌افتد، اما گِبر نوع ۱ ماهیت شکننده، جذب انرژی کمتر و مقاومت آسیب کمتری نسبت به گِبر مبتنی بر AI-۲۰۲۴ دارد [۳۴].

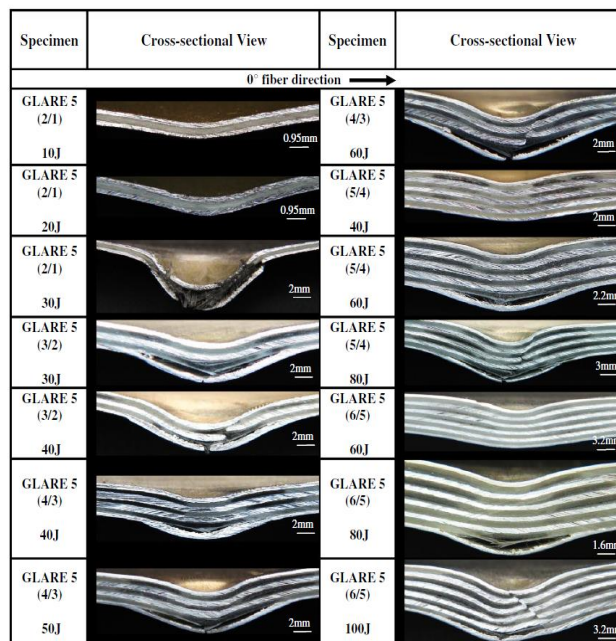
یانگ چن و همکارانش [۳۵] تأثیر نوع فلز را در میزان جذب انرژی چندلایه فلزی-الیافی تحت ضربه سرعت پایین را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که انرژی ضربه چندلایه‌های فلزی-الیافی بیشتر توسط لایه‌های فلزی تلف می‌شود؛ جاییکه انرژی اتلاف پلاستیک لایه آلومینیوم در چندلایه‌های فلزی-

است [۲۵]. میزان تأثیر هر یک از عوامل ذکر شده بر مقاومت ضربه‌ای گِبر در ادامه بررسی می‌گردد.

۲-۱- عوامل مؤثر بر استحکام ضربه سرعت پایین گِبر

۲-۱-۱- تأثیر ضخامت

ضخامت ورق‌های آلومینیومی و الیاف بکار رفته و متعاقب آن ضخامت گِبر تولید شده، یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت به ضربه انواع گِبرها است. تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام گرفته است [۹] و [۲۶-۲۹]. سید یعقوبی و همکاران [۲۸] تأثیر ضخامت نمونه را در رفتار ضربه سرعت پایین گِبر نوع ۵ بررسی کردند. با توجه به نتایج به دست آمده که در شکل (۵) مشخص است، حالت‌های شکست با افزایش ضخامت نمونه تغییر کرد.



شکل ۵ نمای مقطعی گِبر ۵ با ضخامت‌های مختلف [۲۸]

برای نمونه‌های نازک‌تر گِبر نوع ۵ با آرایش (۳/۲) شکست عمدتاً از نوع جدالایی در سمت ضربه نخورده بود و به دنبال آن شکستگی الیاف و شکستگی لایه‌های آلومینیوم اتفاق افتاد؛ در حالیکه، برای گِبر نوع ۵ با آرایش (۲/۱) پس از جدالایی، شکست آلومینیوم رخ داد. برای نمونه‌های ضخیم‌تر گِبر نوع ۵ با آرایش (۵/۴) و (۶/۵)، لایه‌های ضربه‌شدن در نزدیکی سمت ضربه خورده در انرژی ضربه نسبتاً کمتر رخ داد. زمانی که انرژی‌های ضربه بالاتر اعمال شد، آسیب‌های شدیدتر از جمله شکست در لایه‌های آلومینیومی پایینی و شکستگی الیاف در لایه‌های کامپوزیتی پیش‌آغشته، در سمت ضربه نخورده ایجاد شد.

سایر نمونه‌ها داشت. چندلایه فلزی-الیافی تقویت شده با کولار یا آرال در هنگام ضربه آسیب شدیدی نسبت به گلر تجربه کرد؛ در حالیکه انتظار می‌رفت این نمونه‌ها به دلیل استفاده از الیاف کولار، مقاومت به ضربه بالایی داشته باشند. مقایسه پاسخ به ضربه بین گلر نوع ۳، ۴ و ۵ با آرایش (۲/۱) توسط لالیبرته [۴۰] و گلر نوع ۴ و ۵ با آرایش (۲/۱) توسط وو [۴۱] نشان داد که گلر نوع ۵ با لایه‌های پیش آغشته اپوکسی شیشه بیشتر، مقاومت خوبی در برابر آسیب نشان داد.

۲-۱-۴- جرم و هندسه ضربه‌زننده

اثر جرم و هندسه ضربه‌زننده بر مقاومت ضربه‌ای سرعت پایین گلر در چندین مطالعه بررسی شده است. سید یعقوبی و همکاران [۲۸] تأثیر جرم ضربه‌زن را در رفتار ضربه سرعت پایین گلر نوع ۵ بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که نمونه‌های تست شده با ضربه‌زننده سبک، سریع‌تر از نمونه‌های تست شده با ضربه‌زننده سنگین به حد سوراخ می‌رسند. مطالعات کاکاتی و چاکرابورتی [۴۲] تأثیر جرم ضربه‌زننده را در رفتار ضربه‌ای صفحات گلر بررسی کردند. نتایج نشان داد که جرم ضربه‌زن به طور قابل توجهی بر نیروی تماس و لایه‌لایه شدن سطحی تأثیر می‌گذارد. افزایش جرم ضربه‌زن نسبت به صفحه هدف، منجر به نیروی تماس بالاتر و میزان بیشتری از لایه‌لایه شدگی در فصل مشترک شد. علاوه بر این، جرم ضربه‌زن همراه با عوامل دیگری مانند سرعت ضربه‌زننده و اندازه صفحه هدف، بر پاسخ ضربه صفحات گلر تأثیر می‌گذارد [۲۵]. همچنین شکل و هندسه ضربه‌زننده نیز حائز اهمیت است [۳۲] و [۴۳]. لو و همکاران [۴۳] در پژوهشی تجربی و عددی به بررسی تأثیر شکل ضربه‌زننده در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی پرداختند. نتایج نشان داد که رفتار ضربه‌ای چندلایه‌های فلزی-الیافی به شدت تحت تأثیر شکل ضربه‌زننده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که هرچه سر ضربه‌زننده پهن‌تر باشد، زمان برخورد کمتر و بیشینه‌ی نیروی برخورد بیشتر خواهد بود. ناحیه آسیب ضربه‌زننده در حالتی که هندسه سر ضربه‌زننده مخروطی است از سایر شکل‌ها بیشتر بود.

۲-۱-۵- زاویه برخورد

تأثیر زاویه ضربه‌زننده بر پاسخ ضربه با سرعت پایین گلر در چندین مقاله مورد مطالعه قرار گرفته است؛ هر چند در استاندارد مربوطه، زاویه ضربه‌زننده نسبت به صفحه هدف همیشه عمود می‌باشد. مشخص شد که انحراف زاویه ضربه‌زن به‌طور قابل

الیافی مبتنی بر آلومینیوم به طور مشخصی بالاتر از لایه منیزیم در چندلایه‌های فلزی-الیافی مبتنی بر منیزیم بود. جایگزینی آلومینیوم با منیزیم هر چند منجر به سوراخ شدن سریعتر و اتلاف انرژی شد ولی به دلیل تغییر شکل پلاستیک کوچک‌تر، آسیب لایه‌لایه شدن را در سطح مشترک بین فلز و الیاف کاهش داد. شارما و ولمورگان [۳۳] رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی مبتنی بر الیاف شیشه و فلز تیتانیوم را مطالعه کردند. چندلایه‌های فلزی-الیافی با ورق‌های $V_4Al-6Ti$ آلیاژ تیتانیوم و لایه‌های شیشه/اپوکسی با استفاده از تکنیک آرایش دستی تهیه شدند. چندلایه فلزی-الیافی با بیرونی‌ترین لایه فلزی بر خلاف چندلایه فلزی-الیافی با بیشترین لایه‌های فلزی، باز-شدگی جانبی و جداییگی بیشتری را نشان دادند.

طبق نتایج به دست آمده، مقاومت به ضربه چندلایه فلزی-الیافی مبتنی بر آلومینیوم بود. از بررسی مقالات وصف شده و چندین مقاله تحقیقاتی دیگر [۳۲]، [۳۶] و [۳۷] چنین بر می‌آید که جنس فلز به عنوان یک عامل مؤثر در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی محسوب می‌شود ولی برای یک انتخاب بهینه، در نظر گرفتن تمام فاکتورها از جمله وزن، خواص مکانیکی و هزینه آن الزامی است.

۲-۱-۳- ترتیب لایه‌گذاری

همانطور که در بخش مقدمه نشان داده شد طبقه‌بندی انواع گلر بجز نوع ۱ و ۲، بر اساس چیدمان لایه‌ها انجام می‌گیرد و این موضوع در جدول (۱) به خوبی مشهود است. با توجه به ترتیب چینش، هر نوعی از گلر برای کاربرد خاصی استفاده می‌شود. گلر نوع ۳ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های کامپوزیتی آن بصورت $0/90$ و بطور ویژه گلر نوع ۵ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های آن بصورت $0/90/90/0$ برای کاربردهای ضربه‌ای استفاده می‌شوند [۳۸]. سید یعقوبی و همکاران [۳۹] تجزیه و تحلیل ضربه سرعت پایین نمونه‌های مختلف گلر نوع ۵ با آرایش (۳/۲) با جهت‌گیری‌های یک طرفه، لایه متقاطع، زاویه دار، شبه همسانگرد را برای سطوح مختلف انرژی ضربه انجام دادند. مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های گلر با کامپوزیت‌های تک‌جهته کم‌ترین مقدار بود. لمینت شبه همسانگرد [۹۰/۴۵/۴۵/۰] به دلیل سفتی بیشتر نمونه، مقاومت خوبی در برابر ضربه با انحراف کم نشان داد.

لیو و لیائو [۳۴] مطالعات مشابهی را برای گلر نوع $3,2,1$ (۳/۲) و آرال نوع ۳ انجام دادند. طبق نتایج حاصله، گلر نوع ۳ با پیش‌آغشته‌های شیشه‌ای متقاطع، مقاومت به ضربه بهتری نسبت به

انحاء نمونه‌های گِلر مشاهده شد. با افزایش کسر حجمی فلز، ماکزیمم بار ضربه افزایش یافت. بیباکیس و همکاران [۴۹] در پژوهشی به بررسی رفتار ضربه سرعت پایین انواع گِلر پرداختند. کاهش کسر حجمی فلز بخاطر افزایش تعداد لایه‌های شیشه/اپوکسی در یکی از نمونه‌های گِلر باعث افزایش انعطاف-پذیری نمونه شد. همچنین زمان برخورد با کاهش کسر حجمی فلز افزایش یافت. پژوهش‌های کمتری در خصوص تأثیر کسر حجمی فلز در چندلایه‌های فلزی-الیافی انجام گرفته است.

۲-۲- ارزیابی نتایج ضربه سرعت پایین

آزمایش ضربه سرعت پایین می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در قالب منحنی‌های مختلف ارائه دهد. از جمله این منحنی‌ها می‌توان به مهم‌ترین آنها یعنی منحنی نیرو-زمان، منحنی نیرو-جابجایی و منحنی انرژی جذب شده-زمان اشاره کرد.

منحنی نیرو-زمان که پس از تست نمونه‌ها از طریق کارت داده برداری دستگاه ضربه حاصل می‌شود، یک ابزار اساسی در ارزیابی پاسخ مواد به ضربه‌های سرعت پایین می‌باشد و اطلاعات مهمی را در مورد رفتار مواد و حالت‌های تخریب آن‌ها تحت شرایط بارگذاری دینامیکی، تنش‌های شکست، سفتی و مکانیزم-های آسیب ارائه می‌دهد [۵۰-۵۲]. این امر به درک ظرفیت جذب انرژی، شکل‌پذیری، شکنندگی مواد در هنگام ضربه و ارزیابی یکپارچگی سازه و تحمل آسیب کمک می‌کند [۵۳] و [۵۴]. علاوه بر این، منحنی مذکور به پیش‌بینی شروع و انتشار آسیب مانند لایه‌لایه شدن در مواد کامپوزیت کمک می‌کند که ممکن است از نظر بصری قابل تشخیص نباشد؛ اما به‌طور قابل توجهی بر عملکرد سازه تأثیر می‌گذارد.

منحنی نیرو-جابجایی با استفاده از یک سری روابط از منحنی نیرو-زمان حاصل می‌شود. این منحنی به تجزیه و تحلیل نیروی ضربه گذرا، تغییر شکل موضعی در نقطه تماس و پاسخ ساختاری ماده هدف کمک می‌کند [۵۰]. با مطالعه این منحنی، محققان می‌توانند توانایی مواد را برای تحمل بارهای ضربه‌ای، پیش‌بینی حالت‌های شکست و بهینه‌سازی طرح‌ها برای افزایش عملکرد ضربه ارزیابی کنند. در نهایت منحنی انرژی جذب شده-زمان با استفاده از یک سری روابط از منحنی نیرو-جابجایی حاصل می‌شود. این منحنی به تغییر انرژی جذب شده در طول زمان آزمایش ضربه اشاره دارد [۵۵] و [۵۶]. این منحنی نشان

توجهی بر نیروی تماس، زمان تماس و میزان لایه‌لایه شدن تأثیر می‌گذارد [۴۴]. افزایش انحراف، منجر به تاخیر لحظه‌ای و کاهش مدت زمان معکوس نیروی تماس مماسی گردید [۲۵]. زاویه مایل نیز در تعیین لحظه و مدت زمان معکوس شدن نیروی تماس مماسی نقش داشت [۴۲].

۲-۱-۶- کسر حجمی فلز

مشابه استفاده از کسر حجمی الیاف (V_f)^۱ و ماتریس (V_m)^۲ در کامپوزیت‌های پایه پلیمری، مطالعه بر روی چندلایه فلزی-الیافی پارامتر جدیدی بنام کسر حجمی فلز یا MVF^3 را معرفی کرده که مجموع ضخامت لایه فلزی را به ضخامت کل ورقه مرتبط می‌کند:

$$MVF = \frac{\sum_1^p t_{metal}}{t_{lam}} \quad (1)$$

که در آن t_{metal} معادل ضخامت یک لایه فلزی، p برابر با تعداد لایه‌های آلومینیومی و t_{lam} معادل ضخامت لمینت کل است. MVF برابر صفر، بیان می‌دارد که نمونه کاملاً کامپوزیت پایه پلیمری است در حالی که MVF برابر ۱ به این معنی است که نمونه فلز خالص است [۴۵]. با داشتن کسر حجمی فلز می‌توان با استفاده از یک رابطه خطی، ویژگی گِلر را محاسبه کرد که با معادله "قانون مخلوط‌ها" موجود در مکانیک اولیه کامپوزیت‌ها بدست می‌آید.


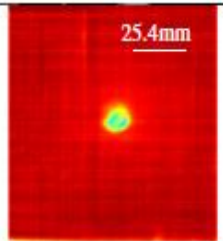

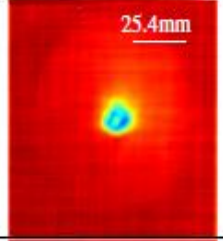

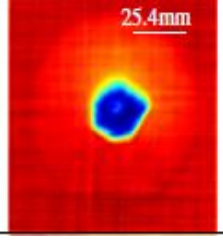
تعداد لایه‌های پیش‌آغشته $\times (1 - MVF) +$ تعداد لایه‌های فلزی $\times MVF =$ خاصیت هر ماده FML

بنابراین، کاملاً واضح است که پاسخ ضربه‌ای یک چند لایه فلزی-الیافی به کسر حجمی فلز بستگی دارد و رفتار ضربه‌ای متفاوت در گریدهای مختلف گِلر و آرال از مفهوم فوق پشتیبانی می‌کند. بسیاری از تحقیقات تجربی نشان دادند که تأثیر کسر حجمی فلز غیر قابل انکار است [۲۸]، [۴۶] و [۴۷]. افزایش محتوای شیشه/اپوکسی در گِلر باعث افزایش مقاومت آسیب و افزایش ۱۵ درصدی در حداقل انرژی ترک در سرعت پایین و حتی بیشتر (دو یا سه برابر) در ضربه با سرعت بالا نسبت به آلومینیوم خالص شد [۴۸]. بیباکیس و همکاران [۴۷] اثر کسر حجمی فلز بر رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های گِلر را بررسی کردند. تأثیر بالای کسر حجمی فلز بر بار ضربه و میزان

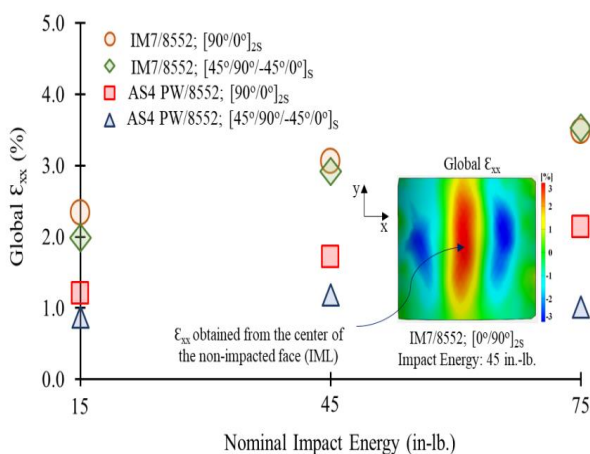
³ Metal volume fraction

¹ Fiber volume fraction

² Matrix volume fraction

Specimen	Optical View	C-scan View
GLARE 5 (2/1) 10J		
GLARE 5 (2/1) 20J		
GLARE 5 (2/1) 30J		

شکل ۶ تصاویر سی اسکن اولتراسونیک برای گلر ۵ تحت ضربه سرعت پایین [۲۸]



شکل ۷ مقایسه کلی نتایج کرنش نمونه‌های کامپوزیتی

همچنین شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود مانند ABAQUS با دستورالعمل‌های تعریف شده توسط کاربر (VUMAT) برای پیش‌بینی تکامل آسیب، استحکام باقی‌مانده و قابلیت‌های جذب انرژی سازه‌های کامپوزیتی که در معرض ضربه‌های سرعت پایین قرار می‌گیرند، استفاده می‌شوند [۵۹]، [۶۰] و [۶۲].

می‌دهد که چگونه ویژگی‌های جذب انرژی قبل از گسیختگی در ورقه‌های کامپوزیتی تکامل می‌یابد. عواملی مانند ضخامت لمینت، سرعت ضربه زننده و جهت قرار گرفتن الیاف بر کل انرژی جذب شده در طول آزمایش ضربه تأثیر می‌گذارد [۵۷]. این منحنی مفاهیمی را در مورد قابلیت‌های جذب انرژی مواد کامپوزیتی و ورقه‌های مختلف ارائه می‌کند که اثربخشی ورقه‌های هیبریدی را در جذب انرژی قبل از شکست در مقایسه با مواد سنتی برجسته می‌کند [۵۸]. علاوه بر این، منحنی انرژی جذب شده-زمان به درک رفتار آسیب حاصل از ضربه ورقه‌های کامپوزیت تحت نرخ بارگذاری دینامیکی کمک می‌کند و حالت‌های پیچیده شکست و قابلیت‌های حمل بار این مواد را نشان می‌دهد [۱۶].

برای بررسی آسیب در ضربه با سرعت کم، تکنیک‌های مختلفی بکار گرفته می‌شود. روش‌های آزمایشی شامل تست‌های ضربه سقوط وزنه با سطوح انرژی مختلف برای شبیه‌سازی نحوه ایجاد ضربه و ارزیابی میزان آسیب انجام می‌شود [۵۷]، [۵۹] و [۶۰]. تکنیک نشر فرا آوایی می‌تواند به‌طور مؤثری برای شناسایی و ارزیابی مکانیزم‌های آسیب در کامپوزیت‌های لایه‌ای پس از ضربه مورد استفاده قرار گیرد. این تکنیک امکان مانیتورینگ و تشخیص انواع مختلف آسیب‌ها از جمله ترک خوردگی، لایه‌لایه شدن و شکستگی فیبرها را فراهم می‌کند [۶۱]. تکنیک تصویربرداری سی اسکن اولتراسونیک برای شناسایی آسیب‌های غیرقابل مشاهده و ارزیابی شدت جدالایی در لایه‌های درونی استفاده می‌شود [۵۷] و [۶۰]. شکل (۶) نمونه‌ای از تصاویر سی اسکن اولتراسونیک را برای گلر ۵ که تحت ضربه سرعت پایین قرار گرفته، نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشخص است، مساحت کل ناحیه آسیب دیده با افزایش انرژی ضربه افزایش یافته است.

دوربین‌های پرسرعت و کرنش سنج تصویری^۱ (DIC) برای ثبت شروع و پیشرفت آسیب در زمان واقعی در طول آزمایش‌های ضربه استفاده می‌شوند و بینش‌های ارزشمندی را در مورد حالت‌های خرابی و مکانیزم‌های آسیب ارائه می‌دهند. شکل (۷) مقایسه کلی کرنش نمونه‌های کامپوزیتی که توسط کرنش سنج تصویری به دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، کرنش ϵ_{xx} با افزایش انرژی ضربه افزایش یافت. همچنین سیستم کامپوزیتی IM7/8552 دارای مقادیر کرنش بالاتری در مقایسه با AS4 PW/8552 در جهت محور x است [۵۳].

^۱ Digital image correlation

۳- نتیجه‌گیری

کدام یک ابزار اساسی در ارزیابی پاسخ چندلایه‌های کامپوزیتی به ضربه‌های سرعت پایین می‌باشند.

۴- مراجع

- [1] R. Das, A. Chanda, J. Brechou, and A. Banerjee, "Impact behaviour of fibre-metal laminates," in *Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures*: Elsevier, 2016, pp. 491-542, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100080-9.00017-8>.
- [2] L. B. Vogelesang and A. Vlot, "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures," *Journal of materials processing technology*, vol. 103, no. 1, pp. 1-5, 2000, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00411-8).
- [3] K. Dragan et al., "Damage Detection and Size Quantification of FML with the Use of NDE," *Fatigue of Aircraft Structures*, vol. 2012, no. 4, pp. 5-9, 2012, DOI: <https://doi.org/10.2478/v10164-012-0051-8>.
- [4] J. Bieniaś, "Fibre metal laminates-some aspects of manufacturing process, structure and selected properties," *Composites*, vol. 11, no. 1, pp. 39-43, 2011.
- [5] F. A. Alshamma and M. M. Kadhim, "Optimization of delamination resistance of vacuum infused glass laminate aluminum reinforced epoxy (GLARE) using various surface preparation techniques," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, vol. 10, no. 1, pp. 361-375, 2022, DOI: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v10i1.2621>.
- [6] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, and O. Çoban, "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods," *Materials & Design*, vol. 32, no. 7, pp. 3671-3685, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.011>.
- [7] P. Sondankar and R. Arakerimath, "Stress and Failure Analysis of Aircraft Wing Using Glare Composite and Aluminum 7075," in *ICRRM 2019-System Reliability, Quality Control, Safety, Maintenance and Management: Applications to Civil, Mechanical and Chemical Engineering*, 2020: Springer, pp. 33-39, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8507-0_6.
- [8] S.-E. Lee, D.-U. Kim, Y.-J. Cho, and H.-S. Seo, "Multiple impact damage in GLARE laminates: Experiments and simulations," *Materials*, vol. 14, no. 24, p. 7800, 2021, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14247800>.
- [9] J. W. Wong, C. L. Tan, M. Azaman, A. Azmi, and I. W. M. Ming, "Low Velocity Impact Behaviour

در سال‌های اخیر، گلر به دلیل چگالی کم، استحکام بالا و مقاومت در برابر ضربه بهتر نسبت به آلومینیوم یکپارچه، به عنوان یک ماده برای بدنه ایرباس ۳۸۰ کاربرد فراوانی دارد. این امر جامعه تحقیقاتی را به بهبود و توسعه بسیاری از چند لایه‌های فلزی-الیافی بهینه و گسترش کاربرد آن ترغیب می‌کند. در این مقاله، رفتار ضربه با سرعت پایین گلر و عوامل تأثیرگذار بر اساس مقالات تحقیقاتی انجام گرفته، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مهم در زیر خلاصه شده است:

۱- پاسخ گلر به ضربه سرعت پایین تحت تأثیر عواملی همچون ضخامت گلر، نوع فلز استفاده شده، ترتیب چینش الیاف در قسمت کامپوزیت، جرم ضربه‌زننده، هندسه ضربه‌زننده، زاویه برخورد، کسر حجمی فلز و غیره می‌باشد.

۲- به طور کلی هر چه ضخامت ورق آلومینیومی بیشتر باشد مقاومت به ضربه گلر بیشتر خواهد بود اما با افزایش ضخامت لایه‌های الیافی و کاهش ضخامت لایه‌های آلومینیومی، مقاومت گلر در برابر ضربه کاهش می‌یابد.

۳- جنس فلز به عنوان یک عامل مؤثر در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی محسوب می‌شود ولی برای یک انتخاب بهینه، بایستی تمام فاکتورها از جمله وزن، خواص مکانیکی و هزینه آن را در نظر گرفت.

۴- ترتیب چینش لایه‌های کامپوزیتی یکی از مؤثرترین عوامل در رفتار ضربه سرعت پایین چندلایه‌های فلزی-الیافی محسوب می‌شود. گلر نوع ۳ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های کامپوزیتی آن بصورت ۰/۹۰ و به‌طور ویژه، گلر نوع ۵ به خاطر جهت‌گیری لایه‌های آن بصورت متقاطع و با آرایش ۰/۹۰/۰/۹۰ برای کاربردهای ضربه‌ای استفاده می‌شوند. مقاومت در برابر ضربه نمونه‌های گلر با لایه‌های کامپوزیتی تک‌جهته کمترین مقدار را نشان دادند.

۵- افزایش جرم ضربه‌زننده نسبت به صفحه هدف منجر به نیروی تماس بالاتر و میزان بیشتری از لایه‌لایه شدن در فصل مشترک شد. هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد زمان برخورد کمتر و بیشینه‌ی نیروی برخورد بیشتر خواهد بود.

۶- پاسخ ضربه‌ای یک چند لایه فلزی-الیافی به کسر حجمی فلز بستگی دارد. با افزایش کسر حجمی فلز، ماکزیمم بار ضربه افزایش می‌یابد. با کاهش کسر حجمی فلز انعطاف‌پذیری گلر و زمان برخورد ضربه افزایش یافت.

۷- آزمایش ضربه سرعت پایین اطلاعات ارزشمندی را در قالب منحنی‌های مختلف از جمله منحنی نیرو-زمان، منحنی نیرو-جابجایی و منحنی انرژی جذب شده-زمان ارائه می‌دهد که هر

- [18] S. Hoseinlghab, M. Farahani, M. Safarabadi, and S. Jalali, "Comparison and identification of efficient nanoparticles to improve the impact resistance of glass/epoxy laminates: experimental and numerical approaches," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 30, no. 4, pp. 694-709, 2023, <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.2023914>.
- [19] A. Sharei, M. Safarabadi, M. M. Mashhadi, R. S. Solut, and M. Haghghi-Yazdi, "Experimental and numerical investigation of low velocity impact on hybrid short-fiber reinforced foam core sandwich panel," *Journal of Composite Materials*, vol. 55, no. 29, pp. 4375-4385, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998321103738>.
- [20] A. Fahr, C. Chapman, D. Forsyth, C. Poon, and J. Laliberté, "Nondestructive evaluation methods for damage assessment in fiber-metal laminates," *Polymer composites*, vol. 21, no. 4, pp. 568-575, 2000, DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.10212>.
- [21] P. Straznicky, J. Laliberté, C. Poon, and A. Fahr, "Applications of fiber-metal laminates," *Polymer Composites*, vol. 21, no. 4, pp. 558-567, 2000, DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.10211>.
- [22] A. Vlot, "Impact loading on fibre metal laminates," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 291-307, 1996, DOI: [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(96\)89050-6](https://doi.org/10.1016/0734-743X(96)89050-6).
- [23] A. Vlot, E. Kroon, and G. La Rocca, "Impact response of fiber metal laminates," *Key Engineering Materials*, vol. 141, pp. 235-276, 1997, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.141-143.235>.
- [24] G. Wu and J.-M. Yang, "Impact behavior of GLARE laminates," in Proceedings of the 36th International SAMPE Technical Conference, 2004: SAMPE Covina, CA, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0067-4>.
- [25] S. Kakati and D. Chakraborty, "Delamination in GLARE laminates subjected to oblique low velocity impact considering friction," *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 97, p. 104817, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104817>.
- [26] A. P. Sharma, S. H. Khan, R. Kitey, and V. Parameswaran, "Effect of through thickness metal layer distribution on the low velocity impact response of fiber metal laminates," *Polymer Testing*, vol. 65, pp. 301-312, 2018, DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0014-y>.
- [27] J. Bienias, P. Jakubczak, and K. Dadej, "Low-velocity impact resistance of aluminium glass laminates—experimental and numerical investigation," *Composite structures*, vol. 152, pp. 112-121, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.008>.
- [10] S. N. A. Safri, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, and K. Jayakrishna, "Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 133, pp. 112-121, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>.
- [11] S. Heimbs, "Energy absorption in aircraft structures," in International workshop on hydraulic equipment and support systems for mining, 2012: Trans Tech Publ. Ltd. Zurich, Switzerland, pp. 1-10. DOI: http://www.heimbsonline.de/Heimbs_2012_IWHEM.pdf.
- [12] M. Richardson and M. Wisheart, "Review of low-velocity impact properties of composite materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 12, pp. 1123-1131, 1996, DOI: [https://doi.org/10.1016/1359835X\(96\)00074-7](https://doi.org/10.1016/1359835X(96)00074-7).
- [13] J. Carrillo and W. Cantwell, "Mechanical properties of a novel fiber-metal laminate based on a polypropylene composite," *Mechanics of materials*, vol. 41, no. 7, pp. 828-838, 2009, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.002>.
- [14] L. Li, L. Sun, T. Wang, N. Kang, and W. Cao, "Repeated low-velocity impact response and damage mechanism of glass fiber aluminium laminates," *Aerospace Science and Technology*, vol. 84, pp. 995-1010, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.11.038>.
- [15] K. Beklemysheva and I. Petrov, "Numerical modeling of low-velocity impact on hybrid composite," *Matematicheskoe modelirovanie*, vol. 30, no. 11, pp. 27-43, 2018, DOI: <https://ras.jes.su/mmod/s207987840001158-2-1-en>.
- [16] H. Kumar M and N. R. Mathivanan, "Experimental investigation of Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy characteristics influences through low velocity impact test," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 9, no. 2, pp. 689-701, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2022.2096829>.
- [17] S. Hoseinlghab, M. Farahani, and M. Safarabadi, "Improving the impact resistance of the multilayer composites using nanoparticles," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 51, no. 6, pp. 3083-3099, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1917424>.

- laminates: analytical and experimental investigation," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 51, no. 9, pp. 5179-5212, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1992778>.
- [37] S. Kakati and D. Chakraborty, "Low velocity impact on fibre metal laminates: A review," *Journal of Composite Materials*, vol. 57, no. 30, pp. 4731-4750, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1177/00219983231212544>.
- [38] R. Wanhill, "GLARE®: A versatile fibre metal laminate (FML) concept," *Aerospace Materials and Material Technologies: Volume 1: Aerospace Materials*, pp. 291-307, 2017, DOI: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-2134-3_13.
- [39] A. Seyed Yaghoubi, Y. Liu, and B. Liaw, "Stacking sequence and geometrical effects on low-velocity impact behaviors of GLARE 5 (3/2) fiber-metal laminates," *Journal of thermoplastic composite materials*, vol. 25, no. 2, pp. 223-247, 2012, DOI: <https://doi.org/10.1177/0892705711408165>.
- [40] J. F. Laliberté, P. V. Straznický, and C. Poon, "Impact damage in fiber metal laminates, part 1: experiment," *AIAA Journal*, vol. 43, no. 11, pp. 2445-2453, 2005, DOI: <https://doi.org/10.2514/1.15159>.
- [41] G. Wu, J.-M. Yang, and H. T. Hahn, "The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates," *Journal of materials science*, vol. 42, pp. 948-957, 2007, DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0014-y>.
- [42] S. Kakati and D. Chakraborty, "Influence of impactor mass on the low energy impact response of thin GLARE plates," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 1-15, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2023.2280725>.
- [43] L. Yao, C. Wang, W. He, S. Lu, and D. Xie, "Influence of impactor shape on low-velocity impact behavior of fiber metal laminates combined numerical and experimental approaches," *Thin-Walled Structures*, vol. 145, p. 106399, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106399>.
- [44] P. You, H. Chen, M. Li, and Y. Wu, "A simulative study on the effect of friction coefficient and angle on failure behaviors of GLARE subjected to low-velocity impact," *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 30, no. 1, p. 20220194, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0194>.
- [45] A. Vlot and J. W. Gunnink, *Fibre metal laminates: an introduction*, Springer Science & Business Media, 2011, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0995-9>.
- pp.339-348,2016, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.056>.
- [28] A. Seyed Yaghoubi, Y. Liu, and B. Liaw, "Low-velocity impact on GLARE 5 fiber-metal laminates: influences of specimen thickness and impactor mass," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 409-420,2012, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000134](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000134).
- [29] M. Abbasinasab and M. Mirzaei, "Effect of Impactor Energy and Layers Thickness on Fiber Metal Laminates in Low Velocity Impact," *Journal of Aeronautical Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 73-82, 2014, DOI: <https://doi.org/20.1001.1.17359449.1393.16.2.6.8>.
- [30] K. Wang and F. Taheri, "Comparison of the Low-Velocity Impact Responses and Compressive Residual Strengths of GLARE and a 3DFML," *Polymers*, vol. 15, no. 7, p. 1723,2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15071723>.
- [31] D.-W. Lee, B.-J. Park, S.-Y. Park, C.-H. Choi, and J.-I. Song, "Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings," *Composite Structures*, vol. 189, pp. 61-69, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.044>.
- [32] D. De Cicco, Z. Asaee, and F. Taheri, "Low-velocity impact damage response of fiberglass/magnesium fiber-metal laminates under different size and shape impactors," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 24, no. 7, pp. 545-555, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2016.1162343>.
- [33] A. P. Sharma and R. Velmurugan, "Damage and energy absorption characteristics of glass fiber reinforced titanium laminates to low-velocity impact," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 27, pp. 6242-6265, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1974618>.
- [34] Y. Liu and B. Liaw, "Effects of constituents and lay-up configuration on drop-weight tests of fiber-metal laminates," *Applied Composite Materials*, vol. 17, pp. 43-62, 2010, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-009-9119-1>.
- [35] Y. Chen, L. Chen, Q. Huang, and Z. Zhang, "Effect of metal type on the energy absorption of fiber metal laminates under low-velocity impact," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, no. 25, pp. 4582-4598, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1933659>.
- [36] A. Sharma and V. Ramachandran, "Low-velocity impact perforation response of titanium/composite

- and its Applications (IICETA), 2019: IEEE, pp. 191-195, DOI: 10.1109/IICETA47481.2019.9012986.
- [55] H. Shetty, D. Sethuram, B. Rammohan, and P. Budarapu, "Low-velocity impact studies on GFRP and hybrid composite structures," *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, vol. 12, pp. 125-141, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12572-021-00287-9>.
- [56] R. K. Dundi, P. N. Amin, and N. R. Mathivanan, "Analysis of factors influencing absorbed energy in CFRP and Kevlar hybrid laminate subjected to low-velocity impact," *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 1-9, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1080/14488388.2023.2187953>.
- [57] A. Bhasin, S. Raju Keshavanarayana, T. Maichan, H. Ramdial, L. M. Gomez, and G. Olivares, "Low Velocity Impact on Composite Energy Absorbers: Experimental Analysis," in *AIAA SCITECH 2023 Forum*, 2023, p. 1262, DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2023-1262>.
- [58] H. Sun, F. Li, K. Shen, and K. Li, "Energy Absorption of carbon-fiber-reinforced composite laminates under low-velocity impacts," *Mechanics of Composite Materials*, vol. 56, pp. 389-396, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09890-6>.
- [59] K. Amirashjaee-Asalemi, F. Taheri-Behrooz, and S. Fakhreddini-Najafabadi, "Investigation of the Low-Velocity Impact and Compression after Impact Performance of CFRPs," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 149, no. 9, p. 04023066, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1061/JENMDT.EMENG-6932>.
- [60] Y. Huang et al., "Research on low-velocity impact response of novel short-fiber-reinforced composite laminates," *Polymers*, vol. 15, no. 4, p. 840, 2023, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15040840>.
- [61] S. Hoseinlghab, M. Farahani, M. Safarabadi, and M. Nikkhah, "Tension-after-impact analysis and damage mechanism evaluation in laminated composites using AE monitoring," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 186, p. 109844, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109844>.
- [62] L. Lokesh Kumar, B. Raviteja, S. Ashish, A. Arun, A. Anilchandra, and C. Manjunatha, "Simulation Studies of Low-Velocity Impact Damage in FRPS," in *International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery*, 2021: Springer, pp. 219-236, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-4721-8_15.
- [46] M. Sadighi, T. Pärnänen, R. Alderliesten, M. Sayeafabi, and R. Benedictus, "Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber metal laminates," *Applied Composite Materials*, vol. 19, pp. 545-559, 2012, DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10443-011-9235-6>.
- [47] G. Bikakis, A. Savaidis, P. Zalimidis, and S. Tsitos, "Influence of the Metal Volume Fraction on the maximum deflection and impact load of GLARE plates subjected to low velocity impact," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 161, no. 1: IOP Publishing, p. 012054, DOI: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/161/1/012054/meta>.
- [48] A. Vlot and M. Krull, "Impact damage resistance of various fibre metal laminates," *Le Journal de Physique IV*, vol. 7, no. C3, pp. C3-1045-C3-1050, 1997, DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:19973176>.
- [49] G. S. Bikakis, E. Karaiskos, and E. P. Sideridis, "Low-velocity impact response of fiber-metal laminates consisting of different standard GLARE grades," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 35, no. 13, pp. 1029-1040, 2016, DOI: <https://doi.org/10.1177/0731684416633770>.
- [50] T. Polocoşer, B. Kasal, F. Stöckel, and X. Li, "Dynamic material properties of wood subjected to low-velocity impact," *Materials and Structures*, vol. 51, pp. 1-16, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1186-z>.
- [51] Z. Khan, M. Naik, F. Al-Sulaiman, and N. Merah, "Low velocity impact of filament-wound glass-fiber reinforced composite pipes," *J Material Sci Eng*, vol. 5, no. 253, pp. 2169-0022.10002, 2016, DOI: <https://pdfs.semanticscholar.org/8c48/0a0aa0a97dd1ef2054a3476df05c26b122ae.pdf>.
- [52] O. A. Mocian, D. M. Constantinescu, M. Sandu, and Ş. Sorohan, "Low velocity impact of 6082-T6 aluminum plates," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1932, no. 1: AIP Publishing, DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5024175>.
- [53] S. Syed Abdullah, "Low velocity impact testing and post-impact analysis through compression after impact (CAI) and C-scan," in *Impact studies of composite materials: Springer*, 2021, pp. 185-194, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-1323-4_12.
- [54] M. M. Idan, "Low Velocity Impact Response of Laminated Composite Cylinder," in 2019 2nd International Conference on Engineering Technology