

نقش توزیع الیاف در راستای ضخامت بر پاسخ مکانیکی و گسترش آسیب کامپوزیت‌های هیبریدی شیشه/پلی‌استر تحت ضربه شبه‌استاتیک

مهدی منصورزاده^۱ پیمان ولی پور^۲، مجید طهرانی^۳ عادله قلی پور کنعانی^۱ سیدابوالفضل میردهقان اشکذری^۴

pe.valipour@iau.ac.ir

^۱ گروه مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

^۲ دانشکده مهندسی نساجی، پوشاک و مد، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم شهر، ایران

^۳ دانشکده هنر، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران ۵۶۸۱۱۸۸۶۱۷

^۴ دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

چکیده:

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، به دلیل برخورداری از استحکام و سفتی ویژه بالا، در بسیاری از سازه‌های سبک‌وزن مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ با این حال، عملکرد آنها در برابر بارگذاری متمرکز خارج از صفحه به نحوه توزیع و چیدمان الیاف در راستای ضخامت وابسته است. در این پژوهش، رفتار ضربه شبه‌استاتیک کامپوزیت‌های هیبریدی شیشه/پلی‌استر با تمرکز بر اثر نحوه توزیع الیاف در ضخامت بررسی شد. برای این منظور، نمونه‌های شیشه خالص، هیبرید بین‌لایه‌ای، هیبرید درون‌لایه‌ای و سه ساختار مدرج تابعی (FGM) با الگوهای متفاوت تغییر کسر حجمی الیاف شیشه و پلی‌استر تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند. منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل برای ارزیابی پارامترهای مکانیکی، مورد تحلیل قرار گرفتند و آسیب سطوح نمونه‌ها نیز پس از آزمون بررسی شد. نتایج نشان داد که تغییر آرایش الیاف، علاوه بر تغییر سختی و ظرفیت تحمل نیرو، مسیر کلی بارگذاری و نحوه افت ظرفیت سازه‌ای پس از آغاز آسیب را به‌طور محسوس تحت تأثیر قرار می‌دهد. در میان ساختارهای بررسی‌شده، نمونه‌های FGM1 و FGM2 با حفظ نیروی بیشینه در سطح یا بالاتر از نمونه شیشه خالص، به ترتیب ۱۰۹ و ۱۱۶ ژول انرژی جذب کردند؛ درحالی‌که انرژی جذب‌شده نمونه شیشه خالص ۶۳ ژول بود. FGM2 با دستیابی همزمان به سختی اولیه ۸۵۲ نیوتن بر میلی‌متر، نیروی بیشینه ۸۵۳۸ نیوتن، جابجایی ۱۱٫۶۳ میلی‌متر و بالاترین انرژی جذب‌شده، متوازن‌ترین پاسخ را ارائه کرد. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل تدریجی توزیع الیاف در ضخامت می‌تواند بدون کاهش محسوس ظرفیت بارگذاری، قابلیت تغییر شکل و جذب انرژی کامپوزیت را افزایش داده و از افت سریع ظرفیت بارگذاری پس از توسعه آسیب جلوگیری کند.

کلمات کلیدی: ضربه شبه‌استاتیک، هیبرید بین‌لایه‌ای، هیبرید درون‌لایه‌ای، FGM، الیاف شیشه، الیاف پلی‌استر

Role of Through-Thickness Fiber Distribution in the Mechanical Response and Damage Propagation of Glass/Polyester Hybrid Composites under Quasi-Static Impact

Mahdi Mansourzadeh¹, Peiman Valipour^{*2}, Majid Tehrani³, Adeleh Gholipour Kanani, Seyed⁴,

Abolfazel Mirdehghan Ashkezari⁵,

¹ Department of Textile Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Textile Engineering, Apparel, and Fashion,, QaS.C., Islamic Azad University. Qaem Shahr. IRAN

³ Department of Art, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, 5681188617

⁴ Department of Textile Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract:

Fiber-reinforced polymer composites are widely used in lightweight engineering structures due to their high specific strength and stiffness. However, their performance under concentrated out-of-plane loading is strongly dependent on the distribution and arrangement of fibers through the thickness. In this study, the quasi-static impact behavior of glass/polyester hybrid composites was investigated, with particular emphasis on the effect of fiber distribution across the thickness. For this purpose, pure glass, inter-ply, intra-ply, and three functionally graded material (FGM) configurations with different patterns of arrangement in the volume fractions of glass and polyester fibers were fabricated and experimentally tested. The resulting force-displacement curves were analyzed to evaluate the mechanical parameters, and the surface damage of the specimens was examined after testing. The results demonstrated that altering the fiber arrangement not only changes the stiffness and load-bearing capacity but also significantly affects the overall load-carrying mechanism and the manner in which structural capacity deteriorates after damage initiation. Among the investigated configurations, FGM1 and FGM2 absorbed 109 and 116 J of energy, respectively, while maintaining a maximum load at or above that of the pure glass, which absorbed 63 J. FGM2 exhibited the most balanced overall response, simultaneously achieving an initial stiffness of 852 N/mm, a peak load of 8538 N, a displacement of 11.63 mm, and the highest energy absorption. These findings demonstrate that controlling the gradual distribution of fibers through the thickness can enhance the deformation capacity and energy absorption of composite materials without a significant reduction in load-bearing capacity, while also mitigating the rapid loss of load-carrying capacity following damage propagation.

Keywords: Quasi-static impact, Inter-ply, Intra-ply, FGM, Glass fibers, Polyester fibers.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف، به دلیل نسبت بالای استحکام و سفتی به وزن، مقاومت مناسب در برابر خوردگی و خستگی، امکان تنظیم خواص و قابلیت ساخت قطعات سبک با هندسه‌های پیچیده، در صنایع هوافضا، خودروسازی، حمل‌ونقل، دریایی، انرژی و تجهیزات ورزشی کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. با وجود این مزایا، حساسیت این مواد به بارهای متمرکز خارج از صفحه و ضربه‌های کم‌سرعت، همچنان یکی از محدودیت‌های مهم در طراحی سازه‌های کامپوزیتی است. سقوط ابزار، برخورد اجسام خارجی، سنگ‌ریزه و تگرگ می‌تواند بدون ایجاد شکست ظاهری آشکار، آسیب‌هایی مانند ترک خوردگی زمینه، جدایش الیاف از زمینه، شکست الیاف و لایه‌لایه‌شدگی ایجاد کند. این آسیب‌ها ممکن است به صورت زیرسطحی گسترش یافته و سفتی، استحکام باقی‌مانده و عمر بهره‌برداری قطعه را کاهش دهند [۱، ۲].

پاسخ کامپوزیت‌های لایه‌ای به بارگذاری موضعی تنها تابع خواص مکانیکی الیاف و زمینه نیست، بلکه ضخامت و ابعاد نمونه، کسر حجمی الیاف، چیدمان و توالی لایه‌ها، کیفیت فصل مشترک، شرایط تکیه‌گاهی، هندسه ضربه‌زننده و نرخ بارگذاری نیز بر آغاز و گسترش آسیب اثر می‌گذارند [۲، ۳]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که حتی با ثابت بودن نسبت کلی اجزا، تغییر محل قرارگیری الیاف می‌تواند مسیر انتقال بار، تمرکز تنش، سطح آسیب و استحکام باقی‌مانده را به طور محسوسی تغییر دهد [۴-۸].

آزمون ضربه شبه‌استاتیک روشی کنترل‌شده برای ارزیابی مقاومت کامپوزیت‌ها در برابر نیروی متمرکز خارج از صفحه است. در این آزمون یک ضربه‌زننده با هندسه مشخص و سرعت کم، تحت کنترل جابه‌جایی، به سطح نمونه اعمال شده و منحنی نیرو-جابه‌جایی ثبت می‌شود. از این منحنی می‌توان سفتی اولیه، نیروی آغاز آسیب، نیروی بیشینه، جابه‌جایی متناظر، افت‌های ناگهانی نیرو و انرژی جذب‌شده را استخراج کرد. همچنین امکان توقف آزمون در سطوح مختلف بارگذاری، مطالعه مرحله‌ای آغاز و پیشرفت آسیب را فراهم می‌سازد. با این حال، به دلیل اثر اینرسی و حساسیت مواد به نرخ کرنش، نتایج ضربه شبه‌استاتیک را نباید معادل

کامل رفتار ضربه دینامیکی دانست. بررسی مقایسه‌ای ضربه شبه‌استاتیک و ضربه کم‌سرعت نیز نشان داده است که میزان تطابق دو روش به محل بارگذاری، نوع لمینیت و شاخص مورد ارزیابی وابسته است [۵].

الیاف شیشه به دلیل قیمت مناسب، دسترسی گسترده، استحکام ویژه مطلوب، مقاومت شیمیایی قابل قبول و سازگاری با رزین‌های متداول، از پرمصرف‌ترین تقویت‌کننده‌های کامپوزیتی هستند. با این حال، رفتار نسبتاً ترد آن‌ها سبب می‌شود که کامپوزیت‌های شیشه‌ای تحت بارگذاری موضعی، مستعد ترک خوردگی زمینه، شکست الیاف و لایه‌لایه‌شدگی باشند. یکی از راهکارهای اصلاح این رفتار، هیبریدسازی الیاف شیشه با الیاف پلی‌استر انعطاف‌پذیرتر است. در چنین سامانه‌ای، الیاف شیشه عمدتاً سفتی و استحکام را تأمین می‌کنند، درحالی‌که الیاف پلی‌استر می‌توانند با تحمل تغییرشکل بیشتر، بخشی از انرژی اعمال‌شده را جذب کرده و از شکست ناگهانی نمونه جلوگیری کنند. با این وجود، اثر هیبریدسازی همواره مثبت یا خطی نیست و به نسبت الیاف، نوع چیدمان، کیفیت اتصال الیاف-زمینه و شدت بارگذاری وابسته است [۹-۱۱].

بر اساس نحوه توزیع الیاف، کامپوزیت‌های هیبریدی موردنظر را می‌توان در سه گروه هیبرید بین‌لایه‌ای^۱، هیبرید درون‌لایه‌ای^۲ و کامپوزیت مدرج تابعی^۳ طبقه‌بندی کرد. در چیدمان هیبرید بین‌لایه‌ای، لایه‌های مجزا و همگن از هر نوع الیاف با توالی مشخص روی یکدیگر قرار می‌گیرند. این چیدمان امکان قرار دادن لایه‌های مستحکم یا شکل‌پذیر در نواحی هدف ضخامت را فراهم می‌کند؛ اما اختلاف خواص مکانیکی لایه‌های مجاور ممکن است تنش‌های بین‌لایه‌ای و احتمال لایه‌لایه‌شدگی را افزایش دهد. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده بر کامپوزیت‌های بازالت/پلی‌استر و بازالت/نایلون نشان داده‌اند که توالی لایه‌ها تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر استحکام، انرژی جذب‌شده و نوع شکست دارد و یک چیدمان بین‌لایه‌ای مناسب می‌تواند عملکرد کامپوزیت را بهبود بخشد [۱۲-۱۴].

در چیدمان هیبرید درون‌لایه‌ای، دو نوع الیاف درون یک لایه یا پارچه با یکدیگر ترکیب می‌شوند. این اختلاط می‌تواند اختلاف ناگهانی خواص میان لایه‌های مجاور را کاهش داده و مسیر انتقال بار و گسترش ترک را تغییر دهد. با این حال،

عدم وجود لایه‌های کاملاً غنی از الیاف مستحکم ممکن است ظرفیت تحمل بار را نسبت به یک چیدمان بین‌لایه‌ای بهینه کاهش دهد. فدایی فرد و همکاران گزارش کردند که نمونه درون‌لایه‌ای بازالت/پلی‌استر، با وجود لایه‌لایه‌شدگی محدودتر، انرژی ضربه کمتری از بهترین نمونه بین‌لایه‌ای جذب کرده‌اند [۱۲]. پژوهش‌های بازالت/نایلون نیز نشان داده‌اند که افزایش سهم الیاف شکل‌پذیر موجب افزایش تغییرشکل و مدت تماس می‌شود، اما اثر آن بر انرژی جذب‌شده و استحکام باقی‌مانده به سطح انرژی و نسبت الیاف بستگی دارد [۹، ۱۰]. همچنین نتایج آزمون‌های کشش و فشار این نمونه نشان داده است که حضور هم‌زمان الیاف ترد و شکل‌پذیر می‌تواند شکست را تدریجی‌تر کرده و از فروپاشی کامل نمونه جلوگیری کند [۱۱].

در کامپوزیت‌های مدرج تابعی، نسبت دو نوع الیاف در راستای ضخامت به‌صورت پیوسته یا در لمینیت‌های واقعی، به‌صورت پله‌ای تغییر می‌کند. هدف این چیدمان، کاهش جهش خواص میان نواحی مجاور، اصلاح توزیع تنش و کنترل آغاز و گسترش آسیب است. جانگ^۴ و لی^۵ در کامپوزیت‌های شیشه/کربن نشان دادند که جهت تغییرات گرادسانی، حتی با ثابت‌بودن نسبت کلی دو الیاف، می‌تواند رفتار خمشی و نحوه شکست را تغییر دهد [۱۵]. در مطالعات بازالت/پلی‌استر نیز برخی نمونه‌های مدرج تابعی عملکردی قابل‌مقایسه یا بهتر از نمونه درون‌لایه‌ای داشتند؛ با این حال، بهترین نمونه بین‌لایه‌ای استحکام خمشی و انرژی جذب‌شده بیشتری نشان داد [۱۲، ۱۳]. بنابراین، هیچ‌یک از چیدمان‌ها را نمی‌توان در تمام شرایط برتر دانست و انتخاب مناسب باید بر اساس نوع بارگذاری، معیار عملکرد و سازوکار آسیب انجام شود.

نقش چیدمان در پژوهش‌های دیگر نیز تأیید شده است. وانگ^۶ و همکاران نشان دادند که نسبت لایه‌های کربن/آرامید و ترتیب قرارگیری آن‌ها در ضربه شبه‌استاتیک، نیروی بیشینه، سفتی و روند گسترش آسیب را تغییر می‌دهد [۴]. هراث^۷ و همکاران نیز در لمینیت‌های بافته‌شده کربن/شیشه، اثر لایه‌های سطحی و توالی چیدمان را بر انرژی جذب‌شده، سطح آسیب و مقاومت فشاری پس از ضربه گزارش کردند [۶]. همچنین مطالعات جدید درباره هیبریدسازی سطحی شیشه در لمینیت‌های کربنی و شبیه‌سازی لمینیت‌های کربن/شیشه نشان داده‌اند که محل قرارگیری الیاف، نسبت

اجزا و توالی لایه‌ها از عوامل تعیین‌کننده پاسخ ضربه‌ای هستند [۸، ۷].

با وجود پژوهش‌های متعدد درباره تاثیر چیدمان الیاف بر خواص خمشی، ضربه چارپی، ضربه سرعت پایین، ضربه سرعت بالا و فشار پس از ضربه، مقایسه نحوه چیدمان الیاف در نمونه هیبرید بین‌لایه‌ای، درون‌لایه‌ای و مدرج تابعی، تحت شرایط یکسان ضربه شبه‌استاتیک گزارش نشده است. مطالعات گذشته تنها چیدمان‌های بین‌لایه‌ای یا درون‌لایه‌ای را بررسی کرده‌اند و یا خواص خمشی و ضربه پاندولی را در نمونه‌های مدرج تابعی بررسی نموده‌اند [۱۶، ۱۵، ۱۳، ۱۲، ۹]. لذا هنوز مشخص نیست تغییر نحوه توزیع الیاف شیشه (الیاف ترد) و پلی‌استر (الیاف انعطاف‌پذیر) در راستای ضخامت، چگونه بر مراحل آغاز آسیب، سفتی، نیروی بیشینه، تغییرشکل و انرژی جذب‌شده در فرآیند ضربه شبه‌استاتیک اثر می‌گذارد.

در این پژوهش، رفتار یک نمونه کامپوزیت شیشه خالص به عنوان نمونه مرجع، یک نمونه هیبرید بین‌لایه‌ای، یک نمونه هیبرید درون‌لایه‌ای و سه نمونه مدرج تابعی با الگوهای متفاوت توزیع الیاف شیشه و پلی‌استر در برابر ضربه شبه استاتیک بررسی شده است. استفاده هم‌زمان از سه چیدمان مدرج، امکان ارزیابی اثر شکل تغییرات ترکیب در راستای ضخامت را فراهم می‌کند؛ موضوعی که با بررسی یک نمونه مدرج منفرد قابل‌دستیابی نیست. افزون بر این، تحلیل هم‌زمان منحنی نیرو-جاب‌جایی و نحوه شکست، ارتباط میان پاسخ مکانیکی کلان و تحول آسیب داخلی را روشن می‌سازد. از این رو، پژوهش حاضر تنها به رتبه‌بندی نمونه‌ها بر اساس نیروی بیشینه یا انرژی جذب‌شده محدود نیست، بلکه مشخص می‌کند هر چیدمان از چه طریقی آغاز آسیب را به تأخیر می‌اندازد، مسیر گسترش ترک را تغییر می‌دهد یا لایه‌لایه‌شدگی را محدود می‌کند.

۲- تجربیات

۲-۱- مواد

در این پژوهش، از الیاف شیشه و پلی‌استر به عنوان الیاف تقویت‌کننده استفاده شد. الیاف شیشه و پلی‌استر به ترتیب از شرکت‌های Jushi china fiberglass و Suzhou Xinhai New Material کشور چین تأمین گردیده است. ویژگی‌های

6. Wang
7. Herath

4. Jang
5. Lee

۲-۲- ساخت چندلایه‌های کامپوزیتی

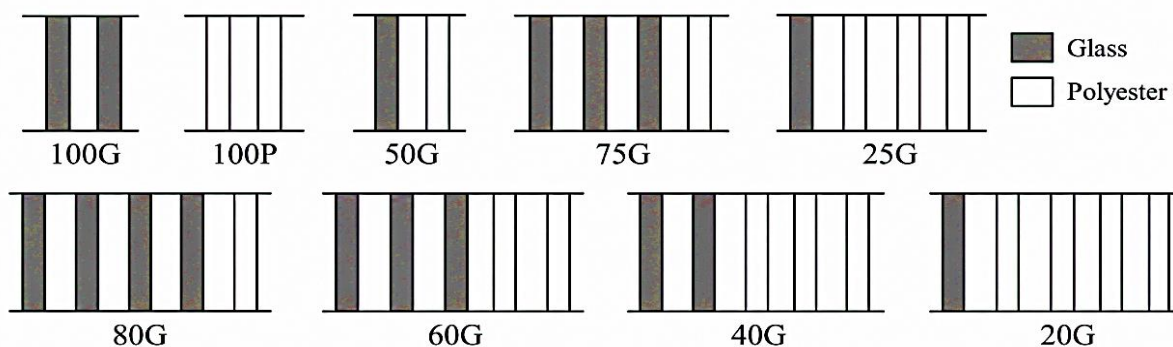
تقویت‌کننده‌های مورد نیاز با ساختار یک‌جهته و تراکم ۵ نخ در هر سانتی‌متر تهیه شدند. در مجموع، ۹ نوع تقویت‌کننده شامل تقویت‌کننده شیشه کامل و هشت ترکیب مختلف از الیاف شیشه و پلی‌استر با درصدهای حجمی متفاوت تولید شد. بر این اساس، درصد حجمی الیاف شیشه در ۹ نمونه به‌ترتیب برابر با ۱۰۰، ۸۰، ۷۵، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۲۵، ۲۰ و صفر درصد شد. ترکیب هریک از تقویت‌کننده‌ها با جزئیات بیشتر در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، تقویت‌کننده‌ها بر اساس درصد الیاف شیشه و پلی‌استر کدگذاری شده‌اند. برای مثال، نمونه 80G حاوی ۸۰ درصد الیاف شیشه و ۲۰ درصد الیاف پلی‌استر است.

الیاف شیشه و پلی‌استر مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور تشکیل زمینه پلیمری، رزین اپوکسی گرماسخت از شرکت ایران کامپوزیت کاویان تهیه شد. رزین اپوکسی LR620-Fast با چگالی ۱.۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ویسکوزیته ۵۰۰ میلی‌پاسکال‌ثانیه در دمای ۳۰ درجه سلسیوس، با سخت‌کننده مخصوص آن و با نسبت وزنی ۸۰ به ۲۰ مخلوط شد.

جدول ۱. ویژگی‌های الیاف شیشه و پلی‌استر مورد استفاده

Properties	Glass	PE
Density (kg/m ³)	2700	1120
Tensile modulus (GPa)	85	4.05
Tensile strength (MPa)	1800	284
Strain at break (%)	2	6.9



شکل ۱. نمای شماتیک تقویت‌کننده‌ها با مقادیر مختلف الیاف شیشه و پلی‌استر

در تمام کامپوزیت‌های هیبریدی، مقدار نسبی الیاف شیشه و پلی‌استر برابر و سهم هر کدام ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. کامپوزیت‌ها از چندلایه‌هایی با ۱۲ لایه و توالی چیدمان متقاطع $([0, 90]_{3s})$ تشکیل شدند.

تمام چندلایه‌ها ابتدا به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۰ درجه سلسیوس در داخل قالب و سپس به مدت سه روز در دمای ۳۰ درجه سلسیوس بر روی میز تخت قرار گرفتند تا فرآیند پخت تکمیل شود. میانگین ضخامت، کسر حجمی الیاف و چگالی تجربی چندلایه‌های ساخته‌شده در جدول ۲ ارائه شده است.

تمام نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از فرایند تزریق رزین تحت خلا^۸ ساخته شدند. به منظور بررسی خواص کامپوزیت‌های با مدرج تابعی و مقایسه آن‌ها با خواص کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بین‌لایه‌ای و هیبرید درون‌لایه‌ای، چهار نوع چندلایه شامل چندلایه‌های شیشه خالص، هیبرید بین‌لایه‌ای، هیبرید درون‌لایه‌ای و هیبرید مدرج تابعی (FGM1، FGM2 و FGM3) ساخته شدند. آرایش لایه‌های این چندلایه‌ها در شکل ۲ آورده شده است. در نمونه‌های مدرج تابعی، کسر حجمی نسبی الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی‌استر در لایه بالایی برابر با ۱۰۰ درصد بود و با حرکت به سمت لایه پایینی، به‌صورت خطی کاهش یافت تا در پایین‌ترین لایه به صفر درصد رسید. بنابراین، لایه پایینی به‌طور کامل از الیاف پلی‌استر تشکیل شده است.

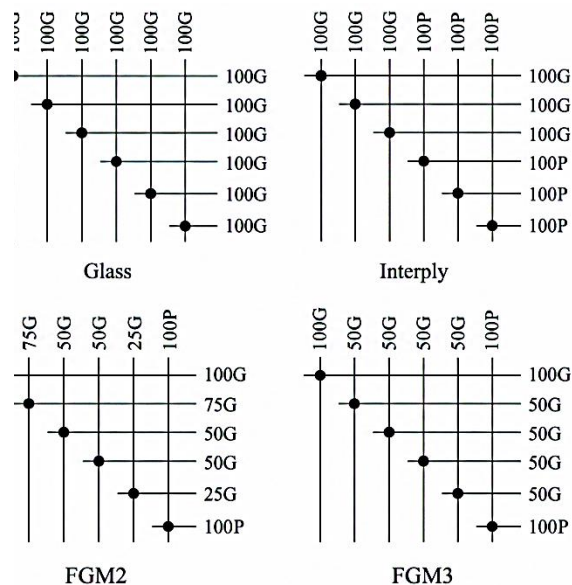
FGM3	4.18	58	1954
------	------	----	------

۲-۳- آزمون ضربه شبه استاتیک

آزمون ضربه شبه‌استاتیک به‌منظور ارزیابی پاسخ نمونه‌های کامپوزیتی در برابر بارگذاری متمرکز خارج از صفحه و با درنظرگرفتن اصول کلی استاندارد ASTM D264M-23 انجام شد [۱۷]. این آزمون امکان ثبت منحنی نیرو-جاب‌جایی و استخراج پارامترهایی مانند نیروی بیشینه، جاب‌جایی متناظر و انرژی اعمال‌شده را فراهم می‌کند.

آزمون با استفاده از دستگاه Universal Testing Machine (UTM)، مدل STM-15 ساخت شرکت SANTAM Design&Manufacturing Co کشور ایران و مجهز به سلول بار^۹ با ظرفیت ۱۵ کیلونیوتن، تحت کنترل جاب‌جایی انجام شدند.

برای آزمون، نمونه‌ها با ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر برش داده شدند. آنگاه هر نمونه روی فیکسچر دستگاه قرار گرفت و مطابق شکل ۳ با استفاده از ۸ پیچ مهار شد تا از لغزش و جابه‌جایی جانبی آن جلوگیری شود. ناحیه آزاد فیکسچر دارای دهانه مربعی به ابعاد ۶۰ میلی‌متر $\times$ ۶۰ میلی‌متر بود و مرکز نمونه با محور ضربه‌زن هم‌راستا شد. بارگذاری توسط یک ضربه‌زن فولادی با نوک نیم‌کروی و قطر ۱۶ میلی‌متر، با سرعت ثابت ۴ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. آزمون مطابق شکل ۳ تا وقوع نفوذ کامل ضربه‌زن ادامه یافت.

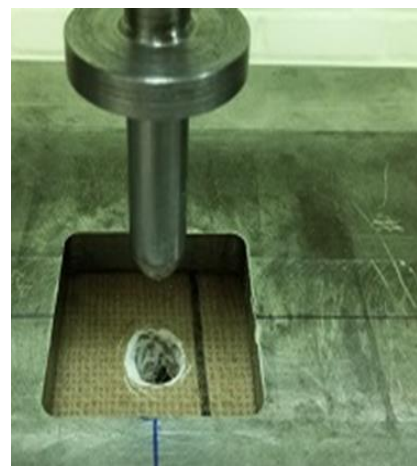
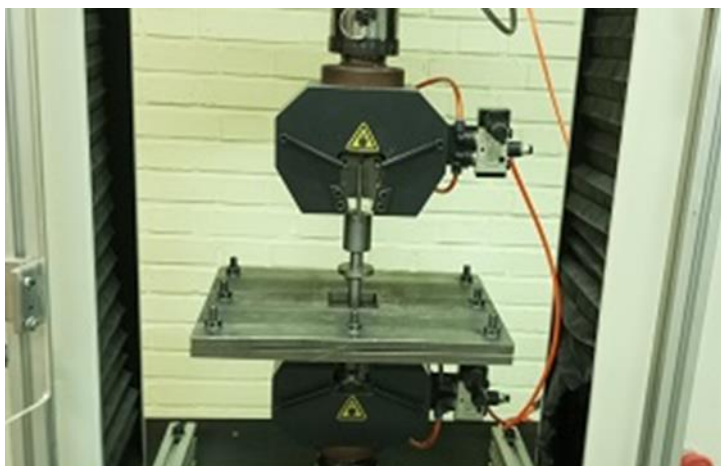


شکل ۲. آرایش لایه‌ها در چندلایه‌های شیشه خالص و هیبرید بین‌لایه‌ای، درون‌لایه‌ای و مدرج تابعی

جدول ۲. ضخامت، کسر حجمی الیاف و چگالی

چندلایه‌های ساخته شده

Lamina te code	Thickne ss (mm)	Volum e fraction (%)	Experimen tal density (kg.m ⁻³)
Glass	4.20	68	2017
Interply	3.95	68	1916
Intraply	4.20	59	1968
FGM1	4.35	52	1968
FGM2	4.28	55	1985



شکل ۳: نمایی از دستگاه و فیکسچر استفاده شده برای آزمون ضربه شبه استاتیکی

این گروه ثابت نگه داشته شد، زیرا نامتقارن بودن چیدمان در ضخامت می‌تواند بر پاسخ مکانیکی آن‌ها اثر گذار باشد.

در نمونه‌های مدرج تابعی، بارگذاری از سمت سطح غنی از الیاف شیشه انجام شد. جهت بارگذاری در تمام نمونه‌های

$$F_d = F_i \quad \text{if} \quad F_i \geq 0.25F_{max} \quad \text{and} \quad \frac{F_i - F_{min,0.15}}{F_i} \geq 0.04 \quad (4)$$

جابجایی و انرژی متناظر با این نقطه به ترتیب با E_d و D_d نشان داده شدند. انرژی جذب شده تا این نقطه از رابطه زیر به دست آمد [۱۷].

$$E_d = \frac{1}{1000} \int_{D_0}^{D_d} F(D) dD \quad (5)$$

در نهایت، نیروی متوسط تحمل شده (F_{avg}) از نسبت مساحت زیر منحنی به کل بازه جابجایی محاسبه شد [۱۷].

$$F_{avg} = \frac{\int_{D_0}^{D_{end}} F(D) dD}{D_{end} - D_0} = \frac{1000E_a}{D_{end} - D_0} \quad (6)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل رفتار نیرو-جابجایی تحت ضربه شبه‌استاتیک

منحنی‌های نیرو-جابجایی حاصل از آزمون ضربه شبه‌استاتیک برای نمونه‌های شیشه خالص، هیبرید بین‌لایه‌ای، هیبرید درون‌لایه‌ای و سه ساختار مدرج تابعی در شکل ۴ آورده شده است. با وجود تفاوت محسوس در شکل و دامنه پاسخ نمونه‌ها، رفتار کلی منحنی‌ها را می‌توان به سه ناحیه اصلی تقسیم کرد. در ناحیه اولیه، افزایش نیرو عمدتاً بیانگر پاسخ الاستیک و سختی کلی لمینیت است. با افزایش جابه‌جایی، تغییر شیب و افت‌های موضعی نیرو ظاهر می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده تغییر تدریجی وضعیت تحمل بار و توسعه آسیب در ساختار باشند. در ادامه، پس از رسیدن به نیروی بیشینه، ظرفیت تحمل نیرو کاهش می‌یابد که می‌تواند با گسترش آسیب‌های داخلی و موضعی همراه باشد. چنین الگویی در تحقیقات انجام شده پیشین در زمینه آزمون‌های ضربه شبه‌استاتیک کامپوزیت‌ها گزارش شده است. بولوت^{۱۰} و ارکلیگ^{۱۱} نیز پاسخ کامپوزیت‌های هیبریدی را به مرحله باربری اولیه، مرحله توسعه آسیب همراه با افت سختی و در نهایت مرحله نفوذ تقسیم کرده‌اند [۱۸].

بخش نخست نمودار نیرو-جابجایی عمدتاً تحت تأثیر خواص خمشی و سختی کلی کامپوزیت چندلایه قرار دارد و با توسعه آسیب، تغییر شیب و افت‌های موضعی نیرو ظاهر می‌شود [۲۱-۱۸]. اختلاف شیب بخش ابتدایی منحنی‌ها نشان می‌دهد که چیدمان تقویت‌کننده تأثیر قابل‌توجهی بر

تمام آزمون‌ها در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۴۰ درصد انجام شدند. برای هر یک از شش گروه کامپوزیت تولید شده، سه نمونه مستقل آزمایش شد.

۲-۴- پردازش داده‌ها و استخراج پارامترهای مکانیکی

در آزمون ضربه شبه‌استاتیک، نیروی اعمالی F و جابجایی ضربه‌زن D به صورت پیوسته توسط دستگاه ثبت شدند و منحنی نیرو-جابجایی برای هر نمونه به دست آمد. این منحنی مبنای استخراج پارامترهای مکانیکی شامل نیروی بیشینه، جابجایی متناظر، سختی، انرژی جذب شده و شاخص‌های مرتبط با آغاز آسیب قرار گرفت. نیروی بیشینه (F_{max}) به عنوان بیشترین نیروی ثبت شده در طول آزمون و جابجایی متناظر با آن (D_{max}) مستقیماً از داده‌های نیرو-جابجایی تعیین شدند. انرژی جذب شده کل (E_a) از مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی تا انتهای آزمون مطابق رابطه ۱ محاسبه شد [۱۷].

$$E_a = \frac{1}{1000} \int_{D_0}^{D_{end}} F(D) dD \quad (1)$$

در این رابطه، D_0 و D_{end} به ترتیب جابجایی اولیه و نهایی ثبت شده هستند و ضریب $1/1000$ برای تبدیل واحد $N \cdot mm$ به ژول به کار رفت. در محاسبات عددی، انتگرال به روش معین با استفاده از قاعده دوزنقه‌ای ارزیابی شد.

برای مقایسه رفتار اولیه نمونه‌ها، سختی اولیه (K_i) از شیب رگرسیون خطی منحنی در محدوده ۱۰ تا ۳۰ درصد F_{max} تعیین شد [۱۷].

$$F = K_i D + c, \quad 0.10F_{max} \leq F \leq 0.30F_{max} \quad (2)$$

همچنین، سختی مؤثر پیش از آسیب (K_{eff}) از شیب برازش خطی داده‌ها از ۱۰ درصد F_{max} تا بار متناظر با شاخص آغاز آسیب (F_d) محاسبه شد [۱۷].

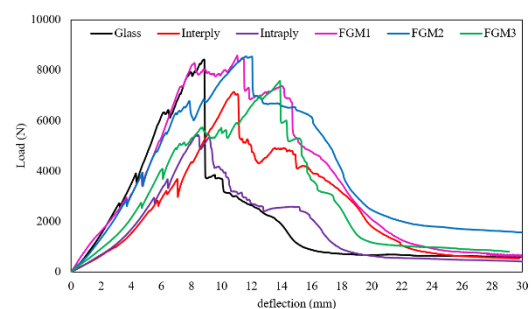
$$F = K_{eff} D + c, \quad 0.10F_{max} \leq F \leq F_d \quad (3)$$

از آنجا که تعیین قطعی آغاز یک سازوکار آسیب صرفاً از منحنی نیرو-جابجایی امکان‌پذیر نیست، در این پژوهش F_d به عنوان یک شاخص مکانیکی و عملیاتی برای نخستین افت معنادار ظرفیت باربری تعریف شد. پس از رسیدن نیرو به حداقل ۲۵ درصد F_{max} ، نخستین بیشینه موضعی که در فاصله جابجایی ۰٫۱۵ میلی‌متر پس از آن حداقل ۴ درصد افت نیرو نشان داد، به عنوان F_d انتخاب شد.

متمایزکننده تری است. به بیان دیگر، مسیر منحنی پس از نخستین تغییرات محسوس و نحوه افزایش نیرو تا نقطه ماکزیمم آن، اطلاعات مهمی درباره تحمل آسیب ساختار فراهم می‌کند. با این حال، افت نیرو یا تغییر شیب منحنی به تنهایی اثبات‌کننده وقوع یک سازوکار مشخص نظیر ترک خوردگی زمینه، لایه‌لایه‌شدگی یا شکست الیاف نیست. مطالعاتی که آزمون ضربه شبه‌استاتیک را با روش‌های پایش آسیب، از جمله نشر آکوستیک یا C-scan تلفیق کرده‌اند نشان داده‌اند که تغییرات نیرو-جابجایی ممکن است حاصل برهم‌کنش چند سازوکار آسیب باشد [۲۰، ۱۹]. بنابراین، در پژوهش حاضر این افت‌ها به عنوان شاخص‌های مکانیکی تغییر وضعیت تحمل نیرو تفسیر می‌شوند و شناسایی نوع آسیب باید با مشاهدات ماکروسکوپی مطابق شکل ۶ تکمیل شود.

نمونه شیشه خالص رفتار یک ساختار نسبتاً صلب را نشان می‌دهد. نیرو با شیب اولیه زیاد افزایش یافته و در جابه‌جایی ۸۰۸۵ میلیمتر به بیشینه ۸۴۲۸ نیوتن می‌رسد. سختی اولیه این نمونه برابر با ۹۶۰ نیوتن بر میلیمتر است که بالاترین مقدار در میان ساختارهای بررسی شده است و نشان‌دهنده مقاومت بیشتر آن در برابر تغییر شکل در ناحیه اولیه بارگذاری است. پس از این نقطه، افت شدید نیرو مشاهده می‌شود و ظرفیت تحمل نیرو در فاصله نسبتاً کوتاهی از جابه‌جایی با شدت کاهش می‌یابد. بنابراین، اگرچه نمونه شیشه خالص در ناحیه پیش از ماکزیمم نیرو از سختی و ظرفیت تحمل نیروی بالایی برخوردار است، توانایی آن برای حفظ نیرو پس از توسعه آسیب محدودتر است. لی^{۱۳} و زاهوتا^{۱۴} نشان دادند که در آزمون ضربه شبه‌استاتیک پس از عبور نیرو از آستانه آسیب، رشد آسیب داخلی ادامه یافته و در مراحل بالاتر، آسیب الیاف می‌تواند موجب تغییر شدید ظرفیت تحمل نیرو شود [۲۱]. فتوحی و همکاران نیز نشان دادند که خواص تقویت‌کننده بر شیب اولیه، جابه‌جایی قابل تحمل و شدت افت نیرو در آزمون ضربه شبه‌استاتیک تأثیر دارد [۲۰].

پاسخ اولیه نمونه‌ها دارد. نمونه شیشه خالص با سختی اولیه ۹۶۰ نیوتن بر میلیمتر بیشترین شیب را نشان می‌دهد و پس از آن نمونه‌های FGM1، FGM2، FGM3، Interply و Intraply به ترتیب با سختی‌های ۸۵۲، ۷۰۹، ۵۸۹، ۵۲۳ و ۴۶۷ نیوتن بر میلیمتر قرار می‌گیرند. کاهش سختی اولیه در ساختارهای هیبریدی را می‌توان به جایگزینی بخشی از الیاف شیشه با الیاف پلی‌استر با مدول کمتر و همچنین نحوه توزیع آنها در راستای ضخامت مرتبط دانست. در تحقیق‌های انجام شده بر روی نمونه‌های تقویت شده با الیاف ترد-انعطاف‌پذیر نیز روند مشابهی مشاهده شده است [۱۹، ۴].



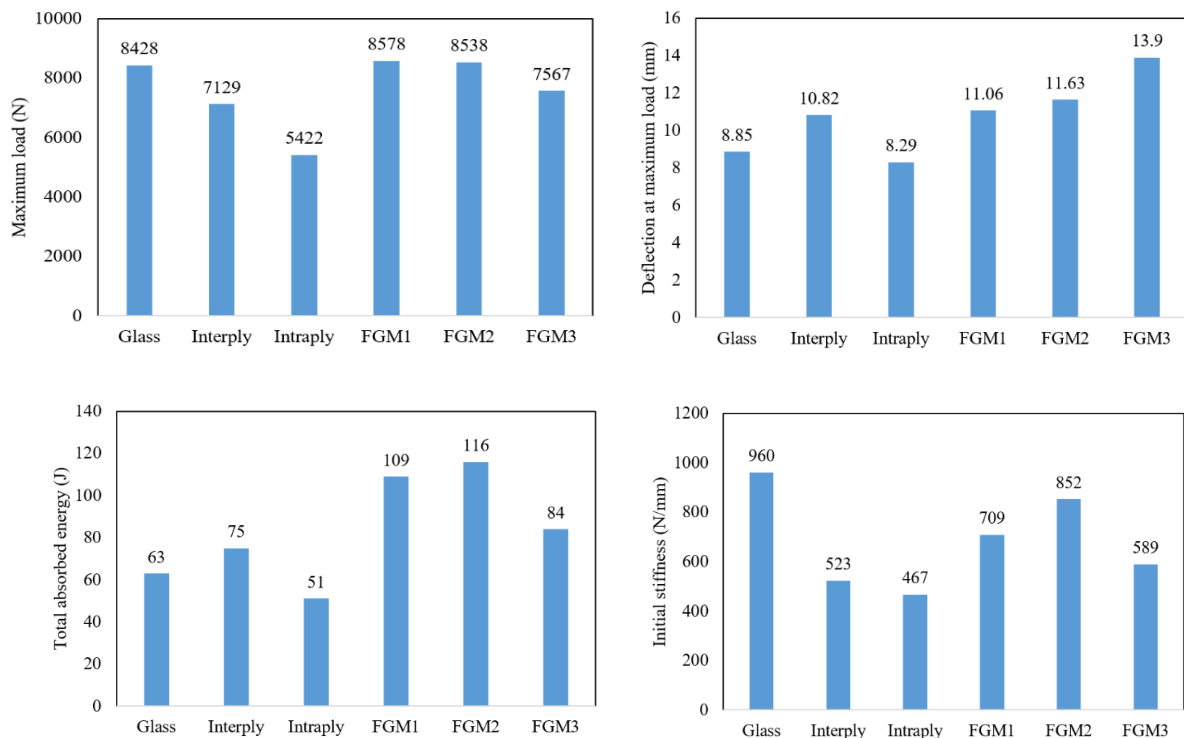
شکل ۴. منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه‌های مورد بررسی در آزمون ضربه شبه‌استاتیک

با وجود اختلاف قابل‌توجه در سختی اولیه، داده‌های جدول ۳ و شکل ۵ نشان می‌دهد نیروی متناظر با شاخص مکانیکی آغاز آسیب^{۱۲} (Fd) برای شش ساختار کامپوزیت بررسی شده در محدوده ۲۷۲۲ تا ۲۹۵۷ نیوتن قرار گرفته است. بنابراین، دامنه تغییرات Fd در بین ساختارها نسبتاً محدود است و این شاخص به تنهایی نمی‌تواند تفاوت عملکرد مکانیکی چیدمان‌های مختلف را به‌طور کامل نشان دهد. این نزدیکی مقادیر نشان می‌دهد که مهم‌ترین تفاوت میان چیدمان‌ها الزاماً در سطح نیروی متناظر با نخستین افت معنی‌دار ظاهر نمی‌شود، بلکه توانایی ساختار برای توزیع و ادامه تحمل نیرو پس از ورود به ناحیه غیرخطی، عامل

14. Zahuta

12. Mechanical Damage Initiation Index

13. Lee



شکل ۵. مقادیر نیروی بیشینه، خیز در نقطه نیروی بیشینه، انرژی جذب شده کل و سختی اولیه نمونه‌های مورد بررسی تحت آزمون ضربه شبه‌استاتیک

جدول ۳. پارامترهای مکانیکی نمونه‌های مورد بررسی تحت آزمون ضربه شبه‌استاتیک

Parameter (Unit)	Glass	Interply	Intraply	FGM1	FGM2	FGM3
Maximum load, F_{max} (N)	8428	7129	5422	8578	8538	7567
Deflection at maximum load, D_{max} (mm)	8.85	10.82	8.29	11.06	11.63	13.90
Total absorbed energy, E_a (J)	63	75	51	109	116	84
Initial stiffness, K_i (N/mm)	960	523	467	709	852	589
Effective stiffness, K_{eff} (N/mm)	973	597	611	734	871	646
Damage initiation load, F_d (N)	2722	2825	2935	2957	2854	2740
Deflection at damage initiation, D_d (mm)	3.22	5.74	5.50	3.69	3.68	4.65
Energy absorbed up to damage initiation, E_d (J)	3.94	6.45	6.32	5.50	4.70	5.42
Mean sustained load, F_{avg} (N)	2102	2537	1721	3656	3891	2890

ساختار حاضر بخشی از سختی و ظرفیت نیروی بیشینه را کاهش داده، اما امکان تغییر شکل بیشتر و اتلاف انرژی بالاتری را فراهم کرده است. نکته قابل توجه دیگر آن است که پس از رسیدن به ماکزیمم نیرو، منحنی Interply به‌طور ناگهانی به سطوح بسیار پایین نیرو سقوط نمی‌کند و نمونه در بازه بیشتری از جابه‌جایی، ظرفیت تحمل نیروی قابل‌ملاحظه‌ای را حفظ می‌کند. این ویژگی بیانگر آن است

در نمونه Interply، نیروی بیشینه به ۷۱۲۹ نیوتن کاهش یافته، در حالی که جابه‌جایی متناظر با آن به ۱۰٫۸۲ میلیمتر افزایش یافته است. در مقایسه با نمونه شیشه خالص، این تغییرات به ترتیب معادل کاهش حدود ۱۵٫۴ درصدی F_{max} و افزایش حدود ۲۲٫۳ درصدی D_{max} است. هم‌زمان، انرژی جذب‌شده کل از ۶۳ به ۷۵ ژول، یعنی حدود ۱۹ درصد، افزایش یافته است. در نتیجه، هیبریدسازی بین‌لایه‌ای در

که کاهش ظرفیت باربری در این نمونه نسبتاً تدریجی بوده و ساختار پس از شروع آسیب همچنان بخشی از ظرفیت خود را حفظ می‌کند. اهمیت موقعیت و توالی تقویت‌کننده‌ها در پاسخ خارج از صفحه کامپوزیت‌های هیبریدی در مطالعات قبلی نیز گزارش شده است [۱۸، ۲۲].

نمونه Intraply کمترین ظرفیت تحمل نیرو را در میان همه نمونه‌ها دارد. مقدار F_{max} برابر ۵۴۲۲ نیوتن است که حدود ۳۵۰۷ درصد کمتر از Glass بوده و انرژی جذب‌شده آن نیز با مقدار ۵۱ ژول کمترین مقدار ثبت‌شده است. سختی اولیه ۴۶۷ نیوتن بر میلی‌متر نیز این نتیجه را تأیید می‌کند. در عین حال، F_d این نمونه برابر ۲۹۳۵ نیوتن است و در میان مقادیر نسبتاً بالای جدول قرار می‌گیرد. این موضوع نشان می‌دهد که ضعف عملکرد Intraply را نمی‌توان صرفاً به پایین بودن نیروی مشخصه آغاز افت نسبت داد، بلکه باید رفتار نمونه در ادامه فرآیند تغییر شکل و میزان توانایی آن در حفظ و توسعه ظرفیت باربری را نیز در نظر گرفت. منحنی نشان می‌دهد که نمونه پس از ورود به ناحیه غیرخطی توانایی محدودتری برای افزایش و سپس حفظ سطح بار دارد. بنابراین، در چیدمان مورد استفاده در این پژوهش، اختلاط الیاف شیشه و پلی‌استر درون تقویت‌کننده نتوانسته است توازن مناسبی میان سختی، ظرفیت تحمل بار و قابلیت تغییر شکل ایجاد کند. گزارش ظفر و همکارانش درباره پایین‌تر بودن نیروی شکست ساختار Intraply نسبت به برخی چیدمان‌های Interply نیز از نظر روند کلی با این مشاهده مطابقت دارد [۲۲]؛ هرچند به دلیل تفاوت نوع الیاف، تعمیم کمی نتایج آن پژوهش به سیستم حاضر امکان‌پذیر نیست.

متمایزترین پاسخ نیرو-جابجایی در نمونه‌های مدرج تابعی، به‌ویژه FGM1 و FGM2، مشاهده می‌شود. بیشینه نیرو برای این دو ساختار به ترتیب ۸۵۷۸ و ۸۵۳۸ نیوتن است؛ بنابراین، برخلاف Interply و Intraply، ظرفیت تحمل نیروی بیشینه آنها تقریباً در سطح نمونه شیشه خالص حفظ شده و حتی به ترتیب حدود ۱۰۸ و ۱۰۳ درصد افزایش یافته است. در عین حال، جابه‌جایی متناظر با نیروی بیشینه به ۱۱۰۶ و ۱۱۶۳ میلی‌متر رسیده که نسبت به نمونه Glass به ترتیب حدود ۲۵ و ۳۱ درصد بیشتر است. این نتیجه نشان می‌دهد که آرایش مدرج در FGM1 و FGM2 امکان افزایش دامنه تغییر شکل را بدون کاهش محسوس ظرفیت تحمل

نیروی بیشینه فراهم کرده است. این ویژگی در انرژی جذب‌شده نمود آشکارتری دارد. مقادیر E_a برای FGM1 و FGM2 به ترتیب ۱۰۹ و ۱۱۶ ژول هستند که در مقایسه با Glass حدود ۷۳ و ۸۴ درصد افزایش دارند. همچنین، F_{avg} از ۲۱۰۲ نیوتن در نمونه شیشه خالص به ۳۶۵۶ و ۳۸۹۱ نیوتن در FGM1 و FGM2 افزایش یافته است. در نتیجه، افزایش انرژی جذب‌شده در این دو ساختار را نمی‌توان صرفاً به افزایش جابه‌جایی نسبت داد؛ بلکه آنها در قسمت بیشتری از فرایند ضربه شبه‌استاتیک قادر به حفظ سطح بالایی از نیرو بوده‌اند. با توجه به اینکه انرژی جذب‌شده از مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی حاصل می‌شود، ترکیب ظرفیت تحمل نیروی بالا و دامنه تغییر شکل گسترده‌تر عامل اصلی عملکرد برتر این دو نمونه است.

در میان نمونه‌های مدرج تابعی، FGM2 متوازن‌ترین پاسخ را نشان می‌دهد. با وجود آنکه F_{max} آن تنها حدود ۰٫۵ درصد کمتر از FGM1 است، مقادیر E_a ، D_{max} و F_{avg} آن همگی بالاتر هستند. افزون بر این، سختی اولیه FGM2 برابر ۸۵۲ نیوتن بر میلی‌متر است و بخش قابل توجهی از سختی نمونه شیشه خالص را حفظ کرده است. منحنی این نمونه پس از ماکزیمم نیرو نیز کاهش تدریجی نشان می‌دهد و سطح نسبتاً بالایی از نیرو تا جابه‌جایی‌های بیشتر حفظ می‌کند. در نتیجه، بر مبنای مجموعه شاخص‌های نیرو-جابجایی، FGM2 مطلوب‌ترین توازن میان سختی اولیه، ظرفیت تحمل نیرو، قابلیت تغییر شکل و جذب انرژی را ارائه کرده است. نحوه توزیع الیاف در راستای ضخامت می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در این رفتار باشد. در نمونه‌های مدرج تابعی، اعمال نیرو از سمت سطح غنی از الیاف شیشه انجام شده و سهم پلی‌استر با حرکت به سمت سطح مقابل افزایش می‌یابد. از دیدگاه مکانیکی، حضور تقویت‌کننده صلب‌تر در ناحیه بارگذاری می‌تواند به حفظ سختی و ظرفیت تحمل نیرو کمک کند، در حالی که افزایش سهم تقویت‌کننده شکل‌پذیرتر در راستای ضخامت می‌تواند امکان تغییر شکل بیشتر و کاهش تمرکز پاسخ‌شکننده را فراهم کند. همچنین در این حالت، گرادپان تدریجی خواص در ضخامت می‌تواند از ایجاد یک تغییر ناگهانی در خواص مکانیکی در فصل مشترک جلوگیری کرده و در نتیجه مسیر انتقال بار و نحوه توزیع تغییر شکل را تحت تأثیر قرار دهد. اهمیت موقعیت لایه‌های صلب و شکل‌پذیر بر پاسخ ضربه شبه‌استاتیک پیش‌تر نیز گزارش شده است [۱۸]

نسبت به Glass فراهم کرده است، در حالی که Intraply کمترین F_{max} ، E_a و F_{avg} را نشان می‌دهد. در مقابل، FGM1 و به‌ویژه FGM2 توانسته‌اند ظرفیت تحمل نیروی بالای نمونه شیشه را با تغییر شکل گسترده‌تر و جذب انرژی بیشتر ترکیب کنند. FGM3 نیز بیشترین قابلیت تغییر شکل را نشان می‌دهد. بنابراین، ارزیابی مقاومت این ساختارها در برابر بارگذاری متمرکز خارج از صفحه نباید صرفاً بر اساس F_{max} صورت گیرد؛ بلکه شکل کامل منحنی نیرو-جابجایی، سختی، دامنه تغییر شکل، توانایی حفظ نیرو پس از شکست و انرژی جذب شده باید به‌صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گیرند.

۳-۲- تحلیل مکانیزم‌های شکست و گسترش آسیب

شکل ۶ تصاویر سطوح رو و پشت نمونه‌های Glass، Interply، Intraply، FGM1، FGM2 و FGM3 را پس از آزمون ضربه شبه‌استاتیک نشان می‌دهد. همان‌گونه که در تصاویر مشاهده می‌شود، آسیب در اطراف محل اعمال بار متمرکز بوده و با توجه به ساختار چندلایه‌ها، در سطح پشت نمونه‌ها نیز به‌صورت تغییر شکل موضعی، لایه لایه شدن، بازشدگی الیاف و شکست و پاره شدن برخی الیاف گسترش یافته است. این الگو با ماهیت خمشی بارگذاری شبه‌استاتیک سازگار است؛ زیرا اعمال بار خارج از صفحه علاوه بر تنش‌های فشاری و برشی در نزدیکی سطح بارگذاری، موجب ایجاد تنش کششی در سطح مقابل می‌شود. در نتیجه، با افزایش تغییر شکل، احتمال پاره شدن و شکست کششی الیاف در پشت نمونه افزایش می‌یابد. در مطالعات مربوط به آزمون ضربه شبه استاتیک مشاهده شده است که نوع و آرایش الیاف در ضخامت لمینیت بر نحوه گسترش آسیب در سطوح رو و پشت و همچنین نوع شکست نهایی اثر قابل توجهی دارد [۱۸].

در نمونه Glass، آسیب پشت نمونه نسبتاً مشخص و همراه با شکست و بازشدگی الیاف مشاهده می‌شود. این رفتار را می‌توان به انتقال تنش کششی ناشی از خمش به لایه‌های پشتی و سپس شکست الیاف در این ناحیه نسبت داد. در نمونه Interply، تفاوت محسوس در آسیب سطوح رو و پشت را می‌توان به وجود فصل مشترک مشخص میان لایه‌های شیشه و پلی‌استر مرتبط دانست. اختلاف رفتار مکانیکی این لایه‌ها در هنگام خمش می‌تواند تنش‌های بین‌لایه‌ای ایجاد کرده و شرایط را برای شروع و گسترش آسیب بین‌لایه‌ای

[۲۲]. با این وجود، تأیید سازوکار دقیق انتقال تنش و نقش هر لایه نیازمند بررسی مستقیم آسیب داخلی است و از منحنی نیرو-جابجایی به‌تنهایی قابل اثبات نیست.

نمونه FGM3 رفتار متفاوتی نسبت به دو ساختار مدرج دیگر دارد. D_{max} این نمونه برابر ۱۳۰۹۰ میلی‌متر است و بنابراین بیشترین جابه‌جایی متناظر با نیروی بیشینه را نشان می‌دهد؛ مقداری که حدود ۵۷ درصد بیشتر از Glass است. در مقابل، F_{max} برابر ۷۵۶۷ بوده و حدود ۱۰ درصد کمتر از نمونه شیشه خالص است. انرژی جذب شده نیز ۸۴ ژول است؛ اگرچه این مقدار حدود ۳۳ درصد بیشتر از Glass است، اما از FGM1 و FGM2 پایین‌تر می‌باشد. این رفتار نشان می‌دهد که افزایش قابلیت تغییر شکل به‌تنهایی برای بیشینه‌کردن جذب انرژی کافی نیست؛ چندلایه باید هم‌زمان بتواند در حین تغییر شکل سطح مناسبی از نیرو را حفظ کند. بنابراین، FGM3 بیشترین قابلیت تغییر شکل را نشان می‌دهد، در حالی که FGM2 از نظر ترکیب ظرفیت باربری و تغییر شکل، کارآمدترین پاسخ را ارائه کرده است.

مقایسه ناحیه پس از ماکزیمم نیرو نیز تفاوت میان چیدمان‌ها را آشکار می‌کند. نمونه‌های Glass و Intraply پس از دستیابی به ماکزیمم نیرو، افت سریع‌تری در ظرفیت تحمل نیرو نشان می‌دهند، در حالی که Interply و به‌ویژه ساختارهای FGM توانایی بیشتری برای حفظ نیرو در جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر دارند. این تفاوت را می‌توان به تفاوت در نحوه پیشروی آسیب و توانایی ساختارهای هیبریدی برای توزیع مجدد بار پس از آغاز آسیب نسبت داد؛ با این حال، بدون مشاهده مستقیم آسیب داخلی نمی‌توان سهم هر مکانیزم را به‌طور قطعی تفکیک کرد [۱۸، ۲۰، ۲۱]. با این حال، آزمون حاضر تا نفوذ کامل ضربه‌زن ادامه یافته است؛ بنابراین، بخش انتهایی منحنی ممکن است علاوه بر مقاومت باقیمانده چندلایه، شامل سهم اصطکاک ضربه‌زن با لبه‌های ناحیه نفوذ نیز باشد [۱۸].

در مجموع، منحنی‌های شکل ۴ نشان می‌دهند که تغییر چیدمان تقویت‌کننده نه تنها مقدار نیروی بیشینه، بلکه کل مسیر تحمل نیرو و نحوه افت ظرفیت سازه‌ای را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نمونه Glass بیشترین سختی اولیه را همراه با ظرفیت تحمل نیروی بالا نشان می‌دهد، اما دامنه تغییر شکل و انرژی جذب شده آن محدودتر است. Interply با کاهش ظرفیت تحمل نیروی بیشینه، تغییر شکل و انرژی بیشتری

نشان داده‌اند، در حالی که انرژی جذب شده Glass برابر ۶۳ ژول بوده است. بنابراین، تصاویر شکل ۶ را می‌توان نشانه‌ای از توسعه تدریجی تر و توزیع شده‌تر آسیب در این ساختارها دانست. تغییر تدریجی ترکیب الیاف در راستای ضخامت می‌تواند موجب تغییر تدریجی خواص بین لایه‌های مجاور و در نتیجه تعدیل انتقال تنش در ضخامت شود. از این رو، شکست موضعی برخی الیاف یا ایجاد آسیب بین لایه‌ای الزاماً به شکست سریع کل لمینیت منجر نمی‌شود و امکان بازتوزیع نیرو میان بخش‌های سالم‌تر ساختار وجود دارد [۱۸].

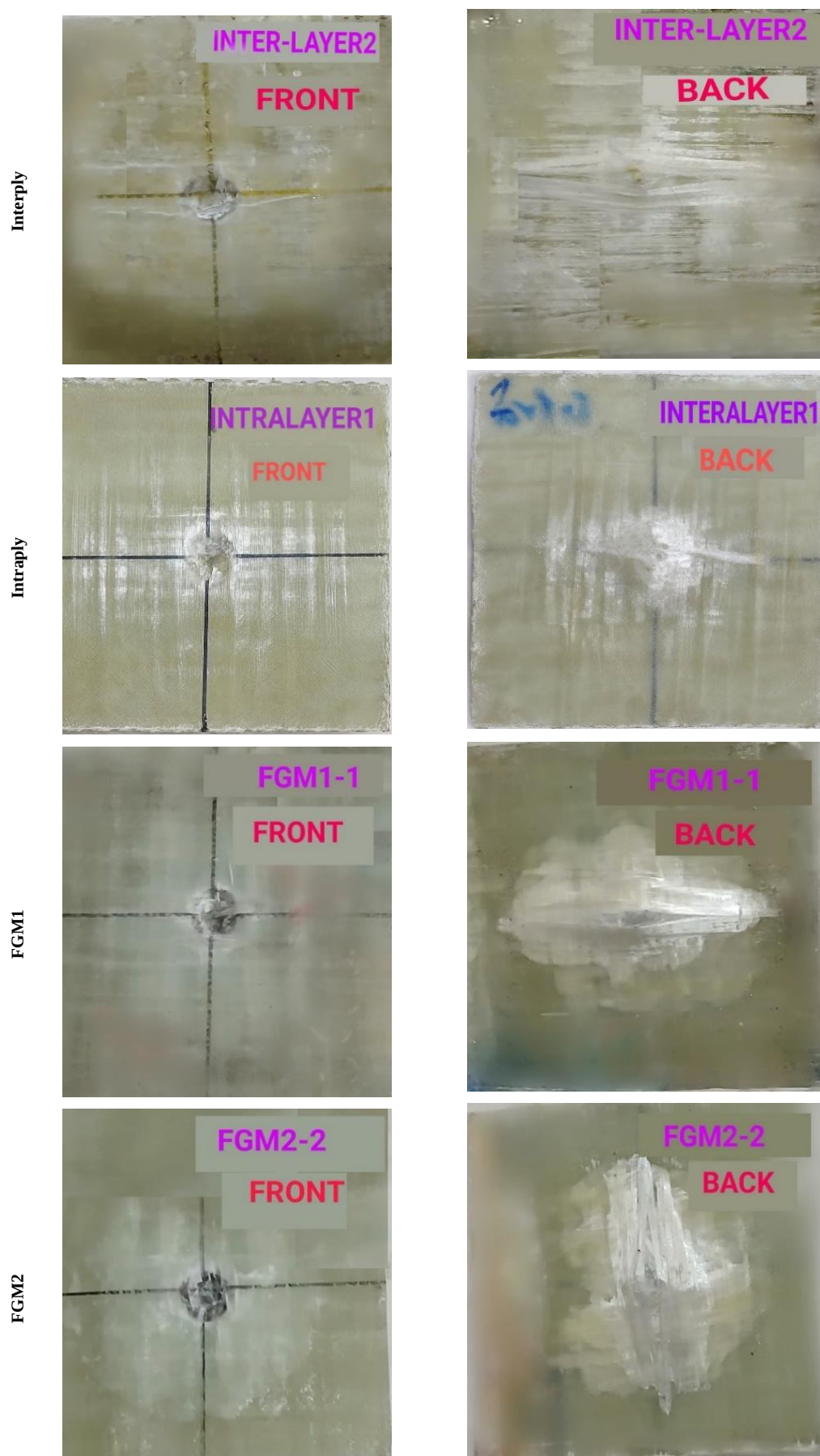
در FGM3، اگرچه بیشترین جابه‌جایی در نیروی بیشینه مشاهده شده است، اما شکل ۶ نشان می‌دهد که افزایش تغییر شکل الزاماً به معنی حذف آسیب یا عملکرد برتر نیست. مقدار بیشینه نیرو و انرژی جذب شده این نمونه به ترتیب ۷۵۶۷ نیوتن و ۸۴ ژول بوده است. بنابراین، در مقایسه مستقیم تصاویر شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که چیدمان گرادینانی مناسب، بیش از آنکه مانع ایجاد آسیب شود، بر نحوه توزیع و گسترش آن اثر می‌گذارد. به‌ویژه در FGM1 و FGM2، توسعه آسیب سطحی و شکست تدریجی الیاف با حفظ ظرفیت تحمل نیرو در تغییر شکل‌های بالاتر همراه شده است. در مقابل، در Glass توسعه آسیب در سطح پشتی با افت محسوس ظرفیت تحمل نیرو پس از نقطه اوج همراه بوده است. این تفاوت نشان می‌دهد که مزیت FGM1 و FGM2 نسبت به سایر نمونه‌ها، کنترل روند گسترش آسیب و تأخیر در شکست بحرانی الیاف می‌باشد و عدم وقوع آسیب در نمونه‌ها اهمیتی ندارد.

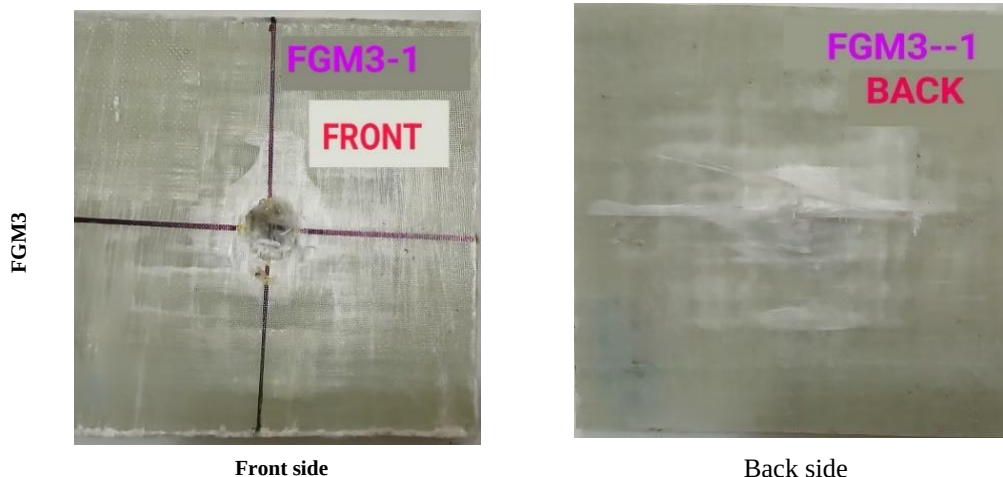
فراهم کند. مطالعات ضربه شبه‌استاتیک نشان داده‌اند که ترک‌های زمینه می‌توانند به رشد تدریجی ترک بین لایه‌ها منجر شوند و توسعه این آسیب‌ها در نهایت بر ظرفیت تحمل نیروی کامپوزیت اثر می‌گذارد [۲۳، ۲۴].

در نمونه Intraply، آسیب مشاهده شده در سطح پشت نشان‌دهنده آسیب از نوع لایه‌لایه شدن در درون ساختار هیبریدی است، اما شدت جداشدگی لایه‌ها در مقایسه با برخی نمونه‌های دیگر کمتر به نظر می‌رسد. این مشاهده در نگاه اول ممکن است با عملکرد مکانیکی پایین Intraply متناقض به نظر برسد، اما پایین بودن شدت ظاهری لایه‌لایه‌شدگی لزوماً به معنای آسیب کمتر یا عملکرد بهتر نیست؛ زیرا ظرفیت جذب انرژی و تحمل بار می‌تواند تحت تأثیر نوع، محل و توالی آسیب‌های موضعی مانند شکست الیاف، ترک زمینه و آسیب درون لایه‌ای نیز قرار گیرد. ترکیب همزمان الیاف شیشه و پلی‌استر در یک لایه، مسیر انتقال تنش و توسعه آسیب را به‌صورت متفاوتی نسبت به ساختارهای Interply و FGM تحت تأثیر قرار داده است. این مشاهده با عملکرد مکانیکی این نمونه نیز سازگار است؛ به‌طوری‌که Intraply کمترین نیروی بیشینه و انرژی جذب شده را در میان ساختارهای مورد بررسی داشته است.

مهم‌ترین تفاوت در شکل ۶ مربوط به نمونه‌های FGM1 و FGM2 است. در این دو نمونه، آسیب در سطح پشت به‌صورت یک ناحیه نسبتاً گسترده‌تر مشاهده می‌شود، اما این گسترش آسیب با افت سریع ظرفیت تحمل نیرو همراه نشده است. در واقع، FGM1 و FGM2 به ترتیب نیروی بیشینه ۸۵۷۸ و ۸۵۳۸ نیوتن و انرژی جذب شده ۱۰۹ و ۱۱۶ ژول را







شکل ۶. تصاویر رو و پشت نمونه‌های مختلف پس از آزمون ضربه شبه‌استاتیک (ابعاد نمونه‌ها ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر بوده است)

ساختارهای مدرج تابعی، به‌ویژه FGM1 و FGM2، عملکرد مطلوب‌تری ارائه کردند. FGM1 و FGM2 به‌ترتیب نیروی بیشینه ۸۵۷۸ و ۸۵۳۸ نیوتن و انرژی جذب‌شده ۱۰۹ و ۱۱۶ ژول را ثبت کردند؛ بنابراین، ضمن حفظ ظرفیت تحمل نیرو در سطح نمونه شیشه خالص، قابلیت جذب انرژی به‌طور محسوسی افزایش یافت. نمونه FGM2 با سختی اولیه ۸۵۲ نیوتن بر میلی‌متر و جابه‌جایی ۱۱۰۶۳ میلی‌متر در نقطه نیروی بیشینه، مناسب‌ترین توازن میان سختی، ظرفیت باربری، تغییر شکل و جذب انرژی را نشان داد. در مقابل، نمونه FGM3 اگرچه بیشترین جابه‌جایی در نقطه اوج نیرو را داشت، به دلیل کاهش ظرفیت باربری، عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمونه‌های FGM1 و FGM2 از خود نشان داد.

در مجموع، نتایج نشان داد که نحوه چیدمان الیاف در راستای ضخامت، راهبردی مؤثر برای دستیابی هم‌زمان به ظرفیت باربری مناسب و جذب انرژی بالاتر در کامپوزیت‌های هیبریدی است. در شرایط آزمون حاضر، FGM2 بهترین عملکرد کلی را ارائه کرد. با این حال، برای تعمیم این یافته‌ها، بررسی اثر نرخ بارگذاری، ضخامت، کسر حجمی الیاف و الگوهای مختلف گرادیان، همراه با مشخصه‌یابی مستقیم آسیب داخلی، در مطالعات آینده ضروری است.

منابع

[1] R Hesami, H Hassani, S Ajeli and A Zadhoosh, "Investigation into the Energy Absorption Capacity of Reinforced Composite by 3D weft-knitted Fabrics," Journal of Textile Science and Technology, 2 2 (2012): 65-70,

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر توزیع الیاف شیشه و پلی‌استر در راستای ضخامت بر رفتار مکانیکی و گسترش آسیب کامپوزیت‌های هیبریدی تحت بارگذاری شبه‌استاتیک بررسی شد. مقایسه نمونه شیشه خالص، ساختارهای هیبریدی بین‌لایه‌ای و درون‌لایه‌ای و سه ساختار مدرج تابعی نشان داد که آرایش الیاف در ضخامت، علاوه بر ظرفیت تحمل نیرو، بر سختی، قابلیت تغییر شکل، جذب انرژی و نحوه افت نیرو پس از آغاز آسیب اثر قابل‌توجهی دارد. از این رو، ارزیابی عملکرد این کامپوزیت‌ها صرفاً بر مبنای نیروی بیشینه، تصویر کاملی از رفتار آن‌ها ارائه نمی‌دهد.

نمونه شیشه خالص با سختی اولیه ۹۶۰ نیوتن بر میلی‌متر و نیروی بیشینه ۸۴۲۸ نیوتن، بیشترین سختی و ظرفیت تحمل نیرو را نشان داد؛ با این حال، انرژی جذب‌شده آن ۶۳ ژول بود و پس از رسیدن به نیروی بیشینه، افت قابل‌توجهی در ظرفیت باربری مشاهده شد. ساختار بین‌لایه‌ای با وجود کاهش نیروی بیشینه به ۷۱۲۹ نیوتن، انرژی جذب‌شده بیشتری معادل ۷۵ ژول داشت. ساختار درون‌لایه‌ای با نیروی بیشینه ۵۴۲۲ نیوتن و انرژی جذب‌شده ۵۱ ژول، ضعیف‌ترین عملکرد را در میان نمونه‌ها ارائه کرد. این نتایج نشان می‌دهد که نحوه استقرار دو نوع الیاف در ساختار، در بهره‌گیری از ویژگی‌های مکمل آن‌ها اهمیت بیشتری از صرفاً هیبریدسازی دارد.

- [12] E. Fadayee Fard, H. Sharifi, M. Tehrani, and E. Akbari, "Intra-ply, inter-ply and FG hybrid composites based on basalt and poly-ester fibers: Flexural and impact properties," *Advances in Materials Research*, vol. 12, no. 1, pp. 67–81, 2023, doi: 10.12989/amr.2023.12.1.067.
- [13] E. Fadayee Fard, M. Tehrani, H. Sharifi, and A. H. Sakhaei, "Residual impact strength of intra-ply, inter-ply and functionally gradient basalt/poly-ester hybrid composites subjected to Charpy impact," *Fibers and Polymers*, vol. 24, pp. 2147–2154, 2023, doi: 10.1007/s12221-023-00217-5.
- [14] M. Tehrani-Dehkordi, H. Nosraty, and M. H. Rajabzadeh, "Effects of plies stacking sequence and fiber volume ratio on flexural properties of basalt/nylon-epoxy hybrid composites," *Fibers and Polymers*, vol. 16, no. 4, pp. 918–925, 2015, doi: 10.1007/s12221-015-0918-8.
- [15] J. Jang and C. Lee, "Performance improvement of GF/CF functionally gradient hybrid composite," *Polymer Testing*, vol. 17, pp. 383–394, 1998.
- [16] Z. Behrooz, H. Nosraty, and M. Tehrani, "High velocity impact properties of composites reinforced by stitched and unstitched glass woven fabrics," *Journal of Industrial Textiles*, 2021, doi: 10.1177/1528083721999865.
- [17] ASTM International, "ASTM D6264/D6264M-23: Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite to a Concentrated Quasi-Static Indentation Force," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
- [18] M. Bulut and A. Erklığ, "The investigation of quasi-static indentation effect on laminated hybrid composite plates," *Mechanics of Materials*, vol. 117, pp. 225–234, 2018, doi: 10.1016/j.mechmat.2017.11.005.
- [19] C. Suresh Kumar, V. Arumugam, and C. Santulli, "Characterization of indentation damage resistance of hybrid composite laminates using acoustic emission monitoring," *Composites Part B: Engineering*, vol. 111, pp. 165–178, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.12.012.
- [20] M. Fotouhi, M. Damghani, M. C. Leong, S. Fotouhi, M. Jalalvand, and M. R. Wisnom, "A comparative study on glass and carbon fibre reinforced laminated composites in scaled quasi-static indentation tests," *Composite Structures*, vol. 245, article 112327, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112327.
- [21] S. M. Lee and P. Zahuta, "Instrumented Impact and Static Indentation of Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 204–222, 1991, doi: 10.1177/002199839102500205.
- [2] Y. Yang, Z. Miao, Y. Liu, H. Tu, and Y. Wei, "A comprehensive review of fiber-reinforced polymer-matrix composites under low-velocity impact," *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2025, doi: 10.1080/15376494.2025.2458772.
- [3] T. Dastan and M. S. Ahmadi, "Residual flexural strength and modulus after low-velocity impact in hybrid jute - polyester / epoxy composites," *Journal of Textile Science and Technology*, 5 3 (2015): 45-50,
- [4] M. Wang, Z. Pan, Q. Cai, L. Zhao, and Z. Wu, "Effects of carbon/Kevlar hybrid ply and intercalation sequence on mechanical properties and damage resistance of composite laminates under quasi-static indentation," *Polymers*, vol. 16, no. 13, article 1801, 2024, doi: 10.3390/polym16131801.
- [5] N. Li, J. Du, R. Liu, H. M. Lee, and H. P. Lee, "A comparative analysis of quasi-static indentation and low-velocity impact on the free edges of CFRP composite laminates," *Composites Part B: Engineering*, vol. 298, article 112395, 2025, doi: 10.1016/j.compositesb.2025.112395.
- [6] H. U. Herath, D. Cai, L. Inusha, P. L. Macias, and X. Wang, "Quasi-static indentation and compression behaviors of hybrid woven composite laminates," *Coatings*, vol. 15, no. 7, article 791, 2025, doi: 10.3390/coatings15070791.
- [7] L. Xue, S. Yang, Z. He, R. Wang, Y. Zheng, N. Li, K. Zheng, and Y. Ren, "Low velocity impact response of carbon fiber composite laminates with surface glass fibers," *Applied Composite Materials*, vol. 32, pp. 93–117, 2025, doi: 10.1007/s10443-024-10259-4.
- [8] X. Zhang, X. Wang, W. Zhang, et al., "Numerical study on low-velocity impact of carbon/glass fiber hybrid laminates: Hybridization strategy, fiber ratio, and stacking sequence," *Applied Physics A*, vol. 131, article 997, 2025, doi: 10.1007/s00339-025-09102-9.
- [9] M. Tehrani Dehkordi, H. Nosraty, M. M. Shokrieh, G. Minak, and D. Ghelli, "Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 3835–3844, 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.03.033.
- [10] M. Tehrani Dehkordi, H. Nosraty, M. M. Shokrieh, G. Minak, and D. Ghelli, "The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites," *Materials & Design*, vol. 43, pp. 283–290, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.07.005.
- [11] H. Nosraty, M. Tehrani-Dehkordi, M. M. Shokrieh, and G. Minak, "Intraply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics: Tensile and compressive properties," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2015.

[22] H. M. N. Zafar and F. Nair, "Comparison of Static/Dynamic Loading and Tensile Behavior of Interply and Intraply Hybridized Carbon/Basalt Epoxy Composites," *Applied Composite Materials*, vol. 29, pp. 451–472, 2022, doi: 10.1007/s10443-021-09973-0.

[23] P. Chen, Z. Shen, J. Xiong, S. Yang, S. Fu and L. Ye, "Failure mechanisms of laminated composites subjected to static indentation," *Composite Structures*, 75(1–4), 489–495, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.087>.

[24] A. Wagih, P. Maimí, N. Blanco, and J. Costa, "A quasi-static indentation test to elucidate the sequence of damage events in low velocity impacts on composite laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 180–189, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.11.041>