

## بررسی تجربی صفحات کامپوزیتی هیبرید شیشه/کناف تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین

جابر میرزایی<sup>۱</sup>، حسین تقی پور<sup>۲\*</sup>

۱- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه ولایت ایرانشهر، ایرانشهر، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۳)

### چکیده

امروزه، کاربرد مواد کامپوزیتی به طور وسیعی گسترش یافته است. قطعات کامپوزیتی تحت بارهای ضربه‌ای، همراه با نرخ‌های مختلف بارگذاری قرار دارند و لذا باید استحکام کافی در مقابل این گونه بارگذاری‌ها را داشته باشند. در این مقاله رفتار کامپوزیت هیبریدی با لایه‌های الیاف شیشه و کناف تحت بارگذاری ضربه‌ای نفوذی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. تاثیر تعداد لایه‌ها بر میزان جذب انرژی، نیروی بیشینه اولیه و همچنین ناحیه تخریب بحث شده است. در ادامه نتایج آزمون‌های تجربی با روش عددی توسط نرم‌افزار اباکوس مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج نشان از تطابق خوب دو روش با یکدیگر دارند. در پایان تاثیر چیدمان لایه‌ها و ترتیب قرارگیری الیاف شیشه و کناف بر جذب انرژی و نیروی نفوذی بررسی شده است. نتایج نشان داد افزایش تعداد لایه‌ها از ۵ تا ۱۳ لایه میزان استحکام و مقاومت اولیه را تا ۸۵ درصد افزایش می‌دهد. همچنین با مطالعه میزان جذب انرژی ویژه (SEA)، مشخص شد افزایش تعداد لایه‌ها در نقطه‌ای بهینه باعث افزایش SEA می‌شود به طوری که افزایش تعداد لایه‌ها از ۵ به ۹ لایه باعث کاهش ۳ درصدی می‌شود و در ادامه با افزایش تعداد لایه‌ها تا ۱۳ لایه SEA را ۲۶ درصد افزایش می‌دهد. مشاهده شد با آرایش مناسب لایه‌های الیاف شیشه و کناف جذب انرژی ۵۱ درصد بهبود پیدا کرد. در پایان مطالعه سطح شکست کامپوزیت‌ها نشان داد مکانیزم اصلی جذب انرژی در سطح پشتی صفحات کامپوزیتی جدایش لایه‌ها به همراه شکست ماتریس و پاره‌گی الیاف می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت لایه‌ای، جاذب انرژی، ضربه نفوذی، الیاف شیشه، الیاف کناف

## Experimental Investigation of Glass / Hemp Hybrid Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading

1<sup>st</sup> Jaber Mirzaei, 2<sup>nd</sup> Hossein Taghipoor

### Abstract

Today, the use of composite materials has become widespread. Composite parts are subjected to different loading rates under mechanical loads and therefore must have sufficient strength against such various loads. In this paper, the behavior of hybrid composite with layers of glass and kenaf fibers under impact loading is investigated and analyzed. The effect of a number of layers on energy absorption, initial peak force as well as damage area was discussed. In the following, the results of experimental tests are compared with the numerical method by ABAQUS/EXPLICIT Software, and the results show that the two methods are in good agreement and close to each other. The results indicated that increasing the number of layers from 5 to 13 layers increases the initial strength and peak force by 85%. Also, by studying the specific energy absorption (SEA), it was found that increasing the number of layers at the optimal point increases the SEA so that increasing the number of layers from 5 to 9 layers causes a decrease of 3% and then increasing the number of layers up to 13 layers increases SEA by 26%. It was observed that the energy absorption improved by 51% with the proper arrangement of layers of glass fibers and kenaf. At the end of the study, the failure mode of composites disclosed that the main mechanism of energy absorption in the back surface of composite plates is the deboning of layers with matrix fracture and fiber breakage.

**Key words:** Laminated composite, Energy absorber, Low-velocity impact, Glass fibers, Hemp fibers

## مقدمه

تولید مواد نسل جدید از منابع تجدیدپذیر، در حال حاضر یک زمینه مهم تحقیق و توسعه است. تقاضا برای مواد با استحکام بیشتر، سفت تر و سبک تر در بیشتر صنایع ضروری است. الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت را می توان به دو دسته الیاف طبیعی و الیاف مصنوعی تقسیم بندی کرد. الیاف طبیعی (که بیشتر از درختان و گیاهان به دست می آیند) دوستدار محیط زیست هستند و به همین دلیل در سال های اخیر توجه زیادی از صنایع، از جمله صنایع هوافضا، خودروسازی، دریایی، نظامی و صنایع دفاعی را به خود جلب کرده است. در واقع، مطابق یافته ها، الیاف طبیعی بیش از ۳۰۰۰ سال پیش به عنوان تقویت کننده مواد در بسیاری از کشورها مورد استفاده قرار می گرفتند [1]. امروزه بیشتر تحقیقات بر توسعه کامپوزیت های تقویت شده با الیاف طبیعی جدید تأکید می کنند که بهترین عملکرد را از نظر خواص مکانیکی، مانند مقاومت کششی، خمشی و ضربه ای از خود نشان می دهند [2]–[4]. استفاده از الیاف طبیعی به عنوان یک ماده تجدیدپذیر، استفاده از الیاف مصنوعی را کاهش می دهد [5]، که در نتیجه به حفظ منابع فسیلی طبیعی کمک می کند.

گیاه کناف، یک گیاه علفی یکساله است که منشا آن غرب آفریقا است [6] و به خوبی از طریق مصر به آسیا گسترش یافته است. انواع مختلفی از گیاهان کناف وجود دارد که برنامه گلدهی متفاوتی دارند. تولید شش تا ده تن فیبر خشک در هکتار در سال به این معنی است که گیاه کناف در مقایسه با سایر گیاهان عملکرد قابل برداشت بالایی دارد. گیاه کناف به سرعت رشد می کند و یک منبع تجدید پذیر است. از این رو، ممکن است تامین ماده ای اولیه با هزینه تولید و ساخت کم را تضمین کند. گیاه کناف دارای دو نوع فیبر بلند و کوتاه است. ساقه گیاه از الیاف هسته داخلی تشکیل شده است که توسط فیبر پایه بیرونی احاطه شده است. از این الیاف می توان به عنوان الیاف تقویت کننده برای کامپوزیت ها استفاده کرد. ورق های کناف خواص مکانیکی ناهمسانگردی مشابه ورق های کامپوزیت دارند. از طرفی استحکام کششی و مدول یانگ الیاف کناف پایین است با این وجود همچنان می توانند با کامپوزیت ها مقایسه شوند [7]. بنابراین، الیاف کناف پتانسیل خوبی برای جایگزینی مواد تقویت کننده فعلی در کامپوزیت های زیست تخریب پذیر با کارایی بالا دارند. چندین مطالعه تحقیقاتی بر روی کامپوزیت های پلیمری کناف انجام شده است، مانند مطالعات تجزیه و تحلیل در مورد اثر ترکیب الیاف شیشه و کف و تقویت رزین ها که توسط داوودی و همکاران [8] در ساخت سپر خودرو استفاده شده

است. الیاف کناف را می توان با ارائه راه حل های ضروری برای پیشرفت های جدید در صنایع مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار داد.

انواع مواد به عنوان ماتریس را می توان با الیاف شیشه تقویت کرد و به پلیمرهای تقویت شده با الیاف تبدیل کرد. این ماتریس ها ممکن است پلی استر، وینیل استر، اپوکسی یا پلی پروپیلن باشند. محدوده ترکیبی برای هر عنصر از الیاف شیشه، مشخصه های مهم آن، از جمله حضور اکسیدهای معدنی در طول فرآیند ساخت شیشه ها را تعیین می کند [9]. انواع الیاف های شیشه با یک علامت حروف نامگذاری می شوند، زیرا مطابق با مشخصات ASTM هستند. الیاف شیشه تحت بارگذاری کششی، سختی و استحکام خوبی را از خود نشان می دهند، اما تحت بارگذاری فشاری، به دلیل کماتش الیاف بلند و باریک از خود ضعف نشان می دهند [10]. که این ضعف را می توان در حین ساخت با چیدمان در آرایش لایه ها در جهت مختلف برطرف و کنترل کرد. الیاف شیشه اغلب در صنعت خودروسازی در تولید سپر، جاذب انرژی و سایر قطعات خودرو استفاده می شود. درها، پوسته هواپیما و سایر قطعات داخلی در صنعت هوافضا نیز از الیاف شیشه به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شده است.

در مقایسه با الیاف طبیعی، الیاف مصنوعی بادوام تر و مستحکم تر هستند و از طرفی قابل شستشو بوده و نگهداری آنها آسان تر است. با این حال، کاربرد الیاف مصنوعی، مانند الیاف شیشه، فیبر کربن و کولار، بسیار پرهزینه است. یکی دیگر از معایب الیاف مصنوعی این است که یک ماده زیست تخریب پذیر نیست و استفاده از آن ممکن است باعث ایجاد خطرات زیست محیطی و سایر اثرات مضر شود [11]. به عنوان مثال، سوزاندن الیاف مصنوعی ممکن است گازهای سمی منتشر کند که هوا و محیط اطراف را آلوده می کند. استفاده از الیاف طبیعی به عنوان مواد تجدیدپذیر باعث کاهش استفاده از الیاف مصنوعی و در نتیجه حفظ منابع فسیلی طبیعی و محیط زیست می شود.

امروزه کامپوزیت ها اجزای اصلی در تولید قایق ها، قطعات هوافضا و خودرو محسوب می شوند [12]، [13]. استفاده از کامپوزیت ها این ظرفیت را دارند که وزن اجزای ساخته شده را تا ۸۰ درصد در مقایسه با قطعات فولادی و ۲۰ تا ۵۰ درصد در مقایسه با قطعات آلومینیومی کاهش دهند [14]. علاوه بر این، به دلیل نگرانی در مورد جذب رطوبت مواد و هزینه های فرآوری، نمونه های جدیدی از کامپوزیت های ترکیبی با الیاف کربن و

شیشه معرفی و تولید می‌شوند.

به طور کلی، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترکیبی در مقایسه با آلیاژهای فلزی، استحکام بسیار بالا، سختی بالا و همچنین مقاومت بالایی در برابر خوردگی و آسیب خستگی از خود نشان می‌دهند [15]. همچنین استفاده از ماتریس اپوکسی، کمک می‌کند کامپوزیت از زنگ زدگی و خوردگی محافظت شود؛ زیرا اپوکسی برای چسبندگی و همچنین برای پوشش‌دهی مواد استفاده می‌شود [12]. کاربرد کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترکیبی در سطح صنعتی شامل ساخت توربین بادی است [12]. در اجزای اصلی برای ساخت قایق، صنایع هوافضا و خودرو نیز از این کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [13]. جایگزینی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترکیبی به طور فزاینده‌ای در حال گسترش است [16]. این به دلیل مزایای مختلف این مواد مانند چگالی کم و استحکام ویژه بالا و همچنین تجدیدپذیری الیاف طبیعی است. فرآیند ترکیب الیاف کناف با الیاف شیشه در فاز تقویت کننده، پتانسیل ماده به دست آمده را از نظر عملکرد کششی را افزایش می‌دهد، در نتیجه به کناف این اجازه را می‌دهد که با سایر الیاف رقابت کند، به طوری که در کار اسماعیلی و همکاران [17]، نشان داده شد ترکیب الیاف کناف و شیشه قابلیت جذب بالا تا 40J را تحت بارگذاری ضربه خواهد داشت.

زایک<sup>۱</sup> و همکاران [18] به تحلیل و بررسی تجربی و عددی پاسخ ضربه سرعت پایین در کامپوزیت‌های لمینیت پلی استر/الیاف شیشه پرداختند. ضربه توسط دستگاه سقوط وزنه جهت تعیین نیروی ضربه، جذب انرژی و شکست نمونه‌ها اعمال شد. در طی تست‌های انجام شده میانگین انرژی جذب شده، دو بار کمتر از کل انرژی ضربه بود. مقادیر انرژی جذب شده و پارامترهای تنش با نتایج آزمایشگاهی تطبیق خوبی دارند.

شاربا و همکاران [10] نشان دادند در ترکیب الیاف کناف و شیشه، اضافه کردن تنها یک لایه کناف تا ۲۰ درصد وزن کامپوزیت را کاهش می‌دهد در صورتیکه مقاومت فشاری کمتر از ۱ درصد کاهش پیدا می‌کند.

یاهایا<sup>۲</sup> و همکاران [20]، به بررسی تاثیر نحوه چینش لایه‌ها در کامپوزیت هیبریدی بافته شده با کناف/کولار با ضخامت لایه‌های مختلف کناف/کولار پرداختند. تاثیر نحوه چینش لایه‌ها و نیز رفتار شیمیایی بر خواص مکانیکی کشش و انعطاف‌پذیری و نیز پاسخ ضربه در ادامه بررسی شد. سپس رفتار شکست کامپوزیت نیز تحلیل شد.

یاهایا و همکاران<sup>۳</sup> [21]، تست بالستیک را بر شش کامپوزیت هیبریدی با الیاف کناف و کولار ۱۲۹ با درصد حجمی‌های مختلف کناف و با چینش‌های مختلف لایه‌ها انجام دادند. نتایج نشان داد کامپوزیت هیبریدی (۱۴ لایه کولار و ۲ لایه کناف) بهترین عملکرد بالستیک را نسبت به سایر نمونه کامپوزیت‌ها دارند. همچنین آنها دریافتند با افزایش چگالی سطح و ضخامت نمونه‌ها خصوصیات بالستیک مانند پاسخ ضربه و جذب انرژی افزایش می‌یابد. این در حالیست که با افزایش کناف این خصوصیات کاهش می‌یابد.

هدف این مقاله بررسی توانایی الیاف طبیعی (الیاف کناف) در جایگزینی جزئی با الیاف مصنوعی (الیاف شیشه) که به طور گسترده به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود، با توسعه کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترکیبی است. بنابراین، کار حاضر اثر افزودن کناف را بررسی می‌کند. نمونه کامپوزیت تقویت شده با الیاف کناف و شیشه در بستر رزین، برای بررسی خواص جذب انرژی و استحکام نفوذی و همچنین ارزیابی ویژگی‌های آسیب مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. میزان جذب انرژی در صفحات کامپوزیتی هیبریدی شامل الیاف طبیعی و مصنوعی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت پایین با دستگاه سقوط وزنه به صورت تجربی و عددی بررسی می‌شود. برهمکنش میان الیاف شیشه و کناف و چگونگی مکانیزم تخریب این دو الیاف بتحت بار نفوذی تشریح می‌گردد. در ادامه تاثیر تعداد لایه‌ها و قرارگیری الیاف کناف در میان لایه‌های الیاف شیشه بر میزان جذب انرژی بررسی می‌شود. در پایان تاثیر چگونگی آرایش لایه‌های الیاف کناف و شیشه بر رفتار ضربه‌پذیری کامپوزیت هیبریدی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

### فرایند ساخت و معرفی نمونه‌ها

در این مقاله برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی LR620 همراه با هاردنر پلی آمینی با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۰ عنوان زمینه پلیمری استفاده شده است. برای تهیه صفحات کامپوزیتی از پارچه با الیاف شیشه با خواص طولی و عرضی یکسان و چگالی ۲۰۰ گرم بر متر مکعب و همچنین پارچه‌ی کتان استفاده شده است. پس از آماده شدن مخلوط رزین و هاردنر با نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۰ است ترکیب به مدت ۵ دقیقه با همزن

<sup>3</sup> R. Yahaya

<sup>1</sup> Zike

<sup>2</sup> R. Yahaya

تامین میکند، مورد آزمون تجربی قرار می‌گیرد. شکل کلی دستگاه سقوط وزنه و آهنربایی که ضربه زننده را تا ارتفاع یک متری بالا می‌برد در شکل ۲ نشان داده شده است. برای انجام این آزمون از ضربه زننده با دماغه‌ی نیم‌کروی با قطر ۲۰ میلی‌متر استفاده شده که باعث می‌شود بیشترین جذب انرژی صفحات کامپوزیتی مشخص شوند.

مطابق شکل ۲ نمونه تحت شرایط آزمون ضربه نشان داده شده است. در این دستگاه، ضربه زننده به سنسور نیرو سنج پیزوالکتریک و شتاب سنج مجهز است که نمودار نیرو-جابجایی حاصل از برخورد پرتابه به نمونه کامپوزیتی را در کامپیوتری که با آن متصل است در اختیار کاربر قرار می‌دهد.



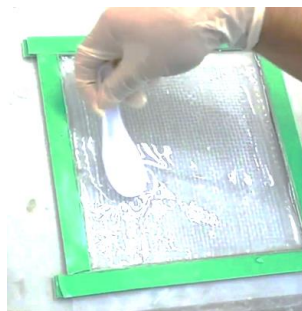
شکل ۲- دستگاه تست سقوط وزنه جهت آزمون ضربه نفوذی

### بررسی تجربی

در این مقاله، بررسی تجربی میزان جذب انرژی در صفحات کامپوزیتی با تغییر در تعداد لایه‌های کامپوزیت انجام می‌شود. در شکل ۳ نمونه کامپوزیت در دستگاه سقوط وزنه بعد از ضربه مشاهده می‌شود.



برقی به آرامی هم‌زده می‌شود. سپس به روش دستی مطابق شکل ۱ رزین بر روی لایه‌های الیاف ریخته و با قلتک کاملاً آغشته می‌شوند. ترتیب لایه‌چینی به این صورت بوده است که لایه اول از پارچه با الیاف شیشه و لایه بعدی پارچه با الیاف کف گذاشته می‌شود، به همین ترتیب لایه چینی ادامه پیدا کرده و با توجه به تعداد لایه‌ها در نهایت آخرین لایه الیاف شیشه قرار می‌گیرد، این روش چیدمان به ترتیبی که اولین و آخرین لایه الیاف شیشه باشند، بالاترین جذب انرژی را نشان می‌دهد [22]. در پایان لایه‌های آغشته به رزین در زیر دستگاه پرس قرار گرفته تا رزین اضافی از نمونه خارج شده و در نهایت بعد از پخت نمونه‌ها در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها آماده آزمون تجربی هستند. نمونه‌ها جهت قرار گیری در دستگاه آزمون ضربه در ابعاد ۱۰ در ۱۰ سانتیمتری و مطابق جدول ۱ از هر نمونه سه عدد جهت تکرار ساخته می‌شوند.



شکل ۱- ساخت نمونه کامپوزیتی به روش دستی و قلتک رزین روی الیاف

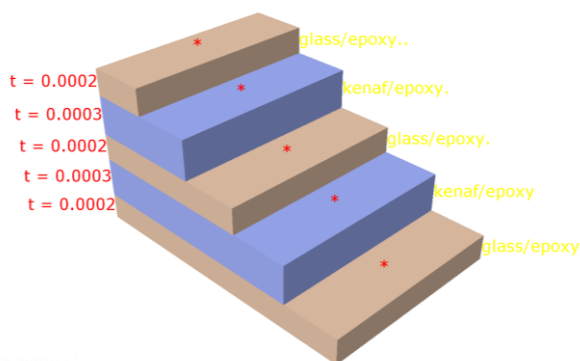
جدول ۱- مشخصات نمونه‌های کامپوزیت‌های هیبریدی در بررسی

تعداد لایه‌ها	
نمونه	تعداد لایه‌ها
S1-5	۵
S2-5	۵
S3-5	۵
S4-9	۹
S5-9	۹
S6-9	۹
S7-13	۱۳
S8-13	۱۳
S9-13	۱۳

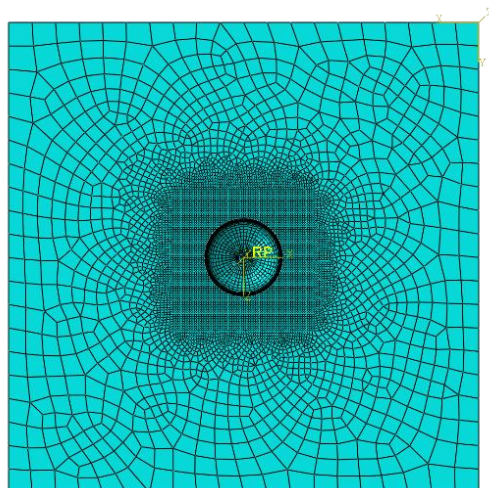
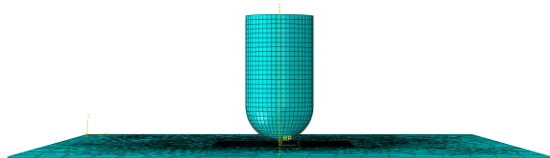
### آزمون ضربه سرعت پایین

نمونه‌های کامپوزیتی چند لایه هیبریدی توسط دستگاه تست ضربه دراپ هامر که انرژی لازم جهت اعمال ضربه نفوذی را به واسطه سقوط آزاد وزنه با جرم ۳ کیلوگرم از ارتفاع ۱ متری

گردید. ضربه زنده به صورت المان‌های جامد سخت مدل شد و تمام درجات آزادی آن فقط در راستای سقوط مقید گردید. در شرایط بارگذاری به ضربه زنده، سرعت 4.4 m/s به صورت سرعت اولیه اعمال گردید. سطوح تماس بین ضربه زنده و کامپوزیت به صورت تماس صفحه‌ای با ضریب اصطحاک ۰٫۳ مدل گردید. شکل نهایی سطح تخریب از نمای جلو و پشت در شکل ۶ نشان داده شده است. با مقایسه نمودار نیرو جابه‌جایی حاصل از تحلیل عددی و آزمون تجربی که در شکل ۷ برای نمونه ۵ لایه آمده است دیده می‌شود همپوشانی مناسبی بین این روش وجود دارد.



شکل ۴- چینش لایه‌های کامپوزیت در نمونه ۵ لایه



شکل ۵- محل قرارگیری ضربه زنده و نمونه صفحه مش‌بندی شده

شکل ۳- آسیب نمونه کامپوزیت پنج لایه (S3-5) در سرعت اولیه برخورد  $4.4 \frac{m}{s}$

محاسبه پارامترهای مهم در جذب انرژی

نیروی پیک اولیه ( $P_{peak}$ )، نیروی میانگین ( $P_{mean}$ )، ظرفیت جذب انرژی ( $E_a$ ) و بازده نیروی فروریزش  $CFE^4$ ، پارامترهایی هستند که برای سنجیدن خواص جاذب استفاده می‌شوند. به علاوه پارامتر دیگری نیز وجود دارد که از اهمیت بالایی در مطالعه‌ی جاذب‌های انرژی برخوردار است، که انرژی جذب شده بر واحد وزن  $SEA^5$  می‌باشد. معادلات شماره ۱ الی ۳ به ترتیب نشان دهنده انرژی جذب شده، نیروی پیک اولیه، بازده نیروی فروریزش و انرژی جذب شده ویژه می‌باشد.

این پارامترها در سیستم طراحی بسیار مهم هستند و وزن، به عنوان فاکتور محدود کننده می‌باشد. مقدار انرژی جذب شده همان سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی است. بازده نیروی فروریزش، از نسبت نیروی میانگین بر نیروی پیک اولیه بدست می‌آید [23]. نتایج محاسبه شده از آزمایش تجربی نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

$$E_a = \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

$$P_{mean} = \frac{1}{\delta_{max}} \int_0^{\delta_{max}} F(\delta) d\delta \quad (2)$$

$$SEA = \frac{E_a}{W_m} \quad (3)$$

### تحلیل المان محدود

در بررسی عددی، لایه چینی پارچه‌های الیاف شیشه و کنف تقویت شده، در کامپوزیت‌های لایه‌ای ۵ لایه که خواص مکانیکی آن‌ها در جدول ۲ گزارش شده‌اند مطابق شکل ۴ مدل شده است. رفتار این صفحات توسط المان‌های پوسته در نرم افزار ABAQUS، شبیه‌سازی شده است. مکانیسم آسیب صفحات کامپوزیتی با استفاده از معیار آسیب هاشین که به صورت تکامل آسیب مبتنی بر انرژی است، ایجاد گردید. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، در مش زنی با استفاده از المان صفحه‌ای انتگرال کاهش یافته (S4R) و با روش دینامیک صریح تحلیل انجام

<sup>4</sup> specific energy absorption

<sup>5</sup> crashing force efficiency

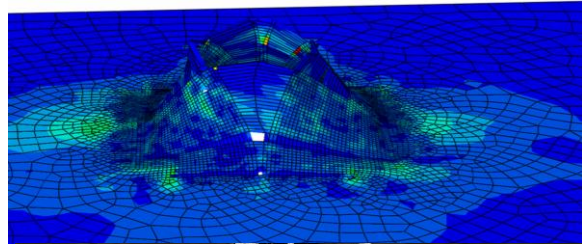
## نتایج و بحث

### بررسی تاثیر تعداد لایه‌ها بر رفتار ضربه‌پذیری

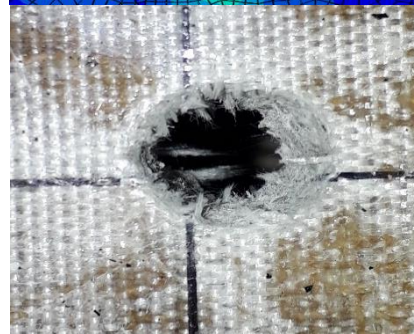
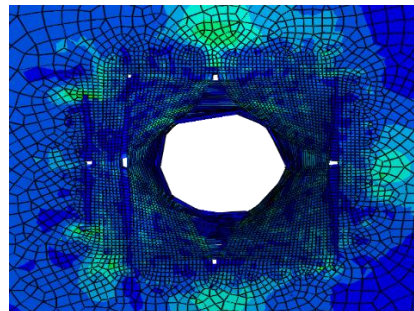
کلید نتایج شامل میزان جذب انرژی، انرژی جذب شده ویژه، نیروی بیشینه، و همچنین نوع تخریب و مکانیزم جذب انرژی در جدول ۳ مشخص شده است.

همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص است در ابتدا سطح نمودار نیرو-جابجایی تا مقدار اوج نیرو افزایش یافته که با شروع تخریب لایه‌ها به اتمام می‌رسد؛ در ادامه مشاهده می‌گردد که با شروع نفوذ پرتابه در صفحه کامپوزیت سطح نمودار شروع به کاهش می‌کند.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که در صفحات کامپوزیتی با تعداد لایه بیشتر میزان جذب انرژی افزایش قابل توجهی داشته است. میزان جذب انرژی کامپوزیت‌های سیزده لایه S8-13 و S9-13 به ترتیب ۲۲,۰۶۴۰۴ و ۲۲,۱۸۸۹۵ ژول است که معادل ۷۵ درصد کل انرژی ضربه یعنی ۲۹.۴۳ ژول است. در رتبه دوم میزان جذب انرژی، کامپوزیت‌های نه لایه با مقدار متوسط ۱۳,۰۱ ژول، قرار دارند و در انتها کامپوزیت‌های پنج لایه با مقدار متوسط ۸,۰۲ ژول کمترین میزان انرژی جذب شده را به خود اختصاص می‌دهند. با توجه به جدول بیشترین میزان جذب انرژی ویژه (SEA) به طور میانگین نیز به نمونه‌های سیزده لایه به میزان ۰,۳۶۵ J/gr اختصاص یافته است. در رتبه بعدی کامپوزیت‌های پنج لایه، با جذب انرژی ویژه به مقدار ۰,۲۹۸۸ J/gr قرار گرفته‌اند. با افزایش لایه‌ها از ۵ تا ۹ لایه، مطابق معادله ۳ که وزن سازه به عنوان یک محدودیت عمل می‌کند، دیده می‌شود که به علت افزایش وزن صفحات کامپوزیتی و از طرفی افزایش نه چندان زیاد در جذب انرژی (E<sub>a</sub>)، میزان SEA کاهش یافته است.



(الف)



(ب)

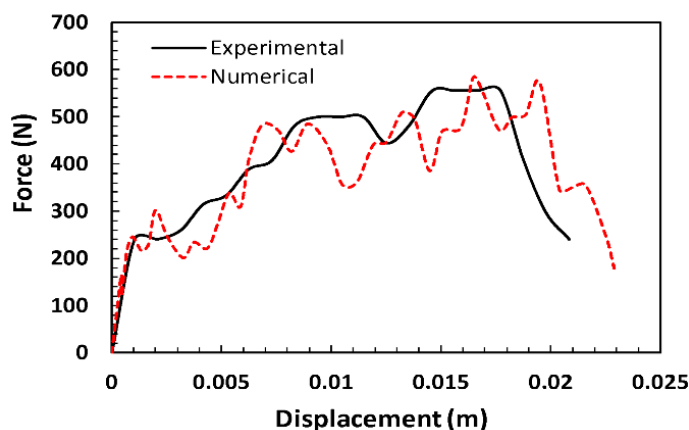
شکل ۶- مقایسه سطح تخریب حاصل از شبیه سازی عددی با آزمون تجربی (الف) سطح پشت نمونه، (ب) جلوی نمونه

جدول ۲ - خواص مکانیکی صفحات شیشه و کنف

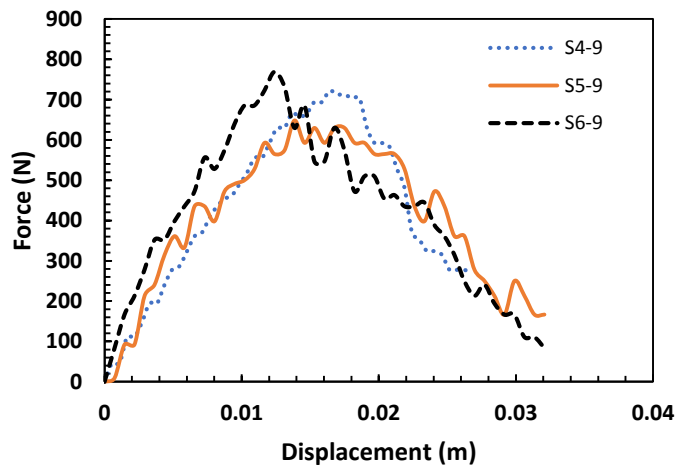
نوع صفحه	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	$\nu_{12}$	G <sub>12</sub> (GPa)	G <sub>13</sub> (GPa)	G <sub>23</sub> (GPa)	X <sup>T</sup> (MPa)	X <sup>C</sup> (MPa)	Y <sup>T</sup> (MPa)	Y <sup>C</sup> (MPa)
Reinforcing fiberglass epoxy layers [24]	1750	40	8	0.25	4	4	2.8	1000	600	50	120
Reinforcing kenaf epoxy layers [25], [26]	89	38.6	11.4	0.13	2.3	2.3	1.5	300	28	200	12

جدول 3: نتایج حاصل از ضربه نفوذی بر نمونه های کامپوزیتی لایه ای هیبریدی

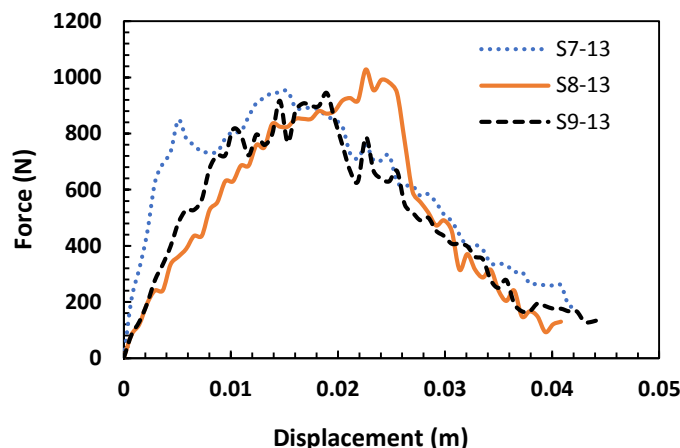
نوع تخریب	سطح تخریب (cm <sup>2</sup> )	میانگین جذب انرژی ویژه	جذب انرژی ویژه (J/gr)	جرم نمونه (gr)	میانگین نیروی بیشینه	نیروی بیشینه (N)	جذب انرژی تجربی (J)	جذب انرژی عددی (J)	تعداد لایه	نمونه
شکست الیاف	۴×۲	۰,۲۹۸۸	0.3017	28	۵۵۸	600	8.44	۹,۳۶	۵ لایه	S1-5
شکست الیاف	۲,۲×۳		0.3362	25.21		555.55	8.47			S2-5
شکست الیاف	۳×۳		0.2586	27.63		518.51	7.14			S3-5
شکست الیاف	۲,۵×۱۰	۰,۲۸۹۲	0.2752	42.59	۷۱۲,۹۶	722.22	11.72	۱۵,۴۲	۹ لایه	S4-9
شکست الیاف	۲,۲×۳,۵		0.2815	49.07		648.14	13.81			S5-9
جدایش لایه ها/ شکست الیاف	۲,۲×۴		0.3109	43.46		۷۶۸,۵۱	13.51			S6-9
جدایش لایه ها/ شکست الیاف	۳,۵×۳,۸	0.365	0.3485	74	۹۷۴,۳۸	950.92	25.79	۲۱,۵۳	۱۳ لایه	S7-13
جدایش لایه ها/ شکست الیاف	۳×۵		0.3899	56.58		1027.77	22.06			S8-13
جدایش لایه ها/ شکست الیاف	۳,۱×۴,۵		0.3566	62.22		944.44	22.18			S9-13



شکل ۷\_ مقایسه نمودار نیرو جابه جایی حاصل از نتایج آزمون تجربی و شبیه سازی عددی برای نمونه ۵ لایه



شکل 8- نمودار نیرو -جابه جایی نمونه کامپوزیتی ۹ لایه



شکل 9- نمودار نیرو - جابجایی نمونه کامپوزیت سیزده لایه

شامل الیاف شیشه و کف هستند پوشش داده شود. به طور مثال در استفاده تنها از الیاف کف نتایج آزمون تجربی شکست بسیار ترد همراه با جدایش قطعات با اندازه بزرگ را نشان داد که این نوع تخریب سطح انرژی بسیار پایین و جذب محدودی از انرژی ضربه را به همراه داشت. شکل ۱۰ سطح شکست صفحه کامپوزیتی با الیاف کف تنها را قبل و بعد از آزمون ضربه نشان می‌دهد.

#### بررسی تاثیر چینش لایه‌ها بر رفتار ضربه‌پذیری

در این بخش، بر روی نمونه ۵ لایه که میزان جذب انرژی ویژه بالاتری نسبت به نمونه ۹ لایه از خود نشان داد؛ تاثیر چیدمان و آرایش لایه‌ها به صورت شبیه سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. چگونگی آرایش لایه‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج جذب انرژی و نیروی بیشینه برای ۴ نمونه با چیدمان متفاوت لایه‌ها در جدول ۴ آمده است همچنین نمودار نیرو- جابه‌جایی این نمونه‌ها در شکل ۱۲ دیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌هایی که با لایه‌ی شیشه در چیدمان لایه‌ها شروع می‌شود سریعتر به نیروی بیشینه رسیده و حضور الیاف شیشه سطح نمودار نیرو را افزایش می‌دهد. در نمونه KG و GK که الیاف یکی در میان تغییر میکند، نمونه‌ای که با الیاف شیشه شروع شده (GK) نسبت به نمونه‌ای که با الیاف کف شروع شده است (KG) چون تعداد لایه شیشه بیشتر است در میزان جذب انرژی حدود ۵۱ درصد افزایش پیدا کرده است. از طرفی با مقایسه نمونه 3G2K که با الیاف شیشه شروع شده، با نمونه 3K2G دیده می‌شود، میزان جذب انرژی ۱۸۲ درصد افزایش داشته است. با مقایسه نمونه GK با نمونه 3G2K که تعداد لایه‌های شیشه و کف برابر دارند دیده می‌شود نمونه با توزیع یکنواخت الیاف شیشه در کف (GK) جذب انرژی ۰,۷



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- نمونه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کف تنها  
(الف) قبل از آزمون، (ب) سطح شکست بعد از آزمون ضربه

نتایج نیروی بیشینه نشان می‌دهد افزایش تعداد لایه‌ها از ۵ به ۱۳ لایه نیروی بیشینه اولیه را تا ۷۴,۶ درصد افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد چیدمان هیبریدی لایه‌ها این کمک را به صفحات کامپوزیتی می‌کند که ضعف هر کدام از لایه‌ها که

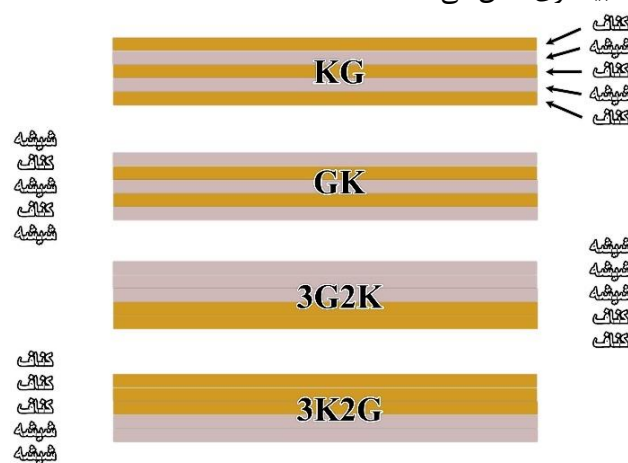


دیده می‌شود، نوع آسیب در سطح رویی به صورت شکست الیاف و پارگی در زیر نوک ضربه زنده است. با توجه به شکل نمونه‌ها پس از برخورد، بیشترین مقدار آسیب‌دیدگی در اثر شکست ماتریس و شکست الیاف در محل ضربه ایجاد شده است. همچنین جدایش لایه‌ها در پشت صفحات و در محل ضربه مشهود می‌باشد. می‌توان گفت مطابق انتظار از نتایج جذب انرژی و مقایسه آن با اشکال ۱۲ و ۱۳، میزان ناحیه تخریب و سطح شکست زمینه در پشت سه نمونه سیزده لایه S8-13، S7-13 و S9-13 به دلیل جذب انرژی بالاتر و در نتیجه تخریب بیشتر، از تمامی نمونه‌ها بیشتر است.

مطابق نتایج سطح تخریب و جدایش لایه‌ها دیده می‌شود در نمونه‌های ۵ لایه مقاومت به ضربه، به علت وجود کمترین میزان آسیب، کمتر از سایر نمونه‌ها است. در مقابل نمونه‌ها با ۱۳ لایه میزان آسیب‌دیدگی و و سطح جدایش لایه‌ها روند افزایشی داشته است که تایید کننده جذب انرژی بالاتر، مطابق جدول ۳ است. در نمونه های یک، دو و سه با ۵ لایه، به دلیل تعداد لایه کمتر و در نتیجه ضخامت پایین تر، تنش‌های خمشی بزرگتری نسبت به تنش‌های برشی بوجود آمده و مد شکست به صورت میکروتکرک‌های ماتریسی و جدایش الیاف از ماتریس می‌باشند که در طرف ضربه خورده (سطح رویی) ایجاد می‌شود.

مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ در پشت صفحات کامپوزیتی به دلیل تمرکز تنش بالاتر و تنش‌های خمشی زیاد شکست الیاف، نسبت به سطح رویی اعمال ضربه محسوس تر است. زمانیکه شکست الیاف شیشه و کتان به حد بحرانی برسد، نفوذ پرتابه کروی رخ می‌دهد. در نمونه‌های هفت، هشت و نه به دلیل تعداد لایه‌های بالاتر انرژی ضربه به فرم لایه‌لایه شدن و خمش الاستیک جذب می‌شوند و در نتیجه درصد تخریب نمونه افزایش می‌یابد.

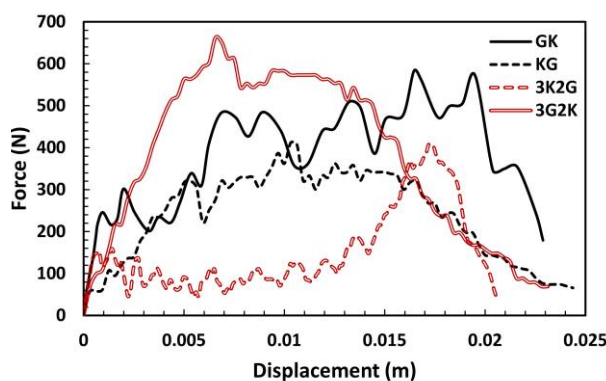
درصد افزایش پیدا کرده است، از طرفی در این نمونه دیده می‌شود نیروی بیشینه به تعویق افتاده و در میزان جابه‌جایی بیشتری اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۱- چگونگی آرایش و چینش لایه‌ها

جدول ۴- نتایج جذب انرژی و نیروی بیشینه در نمونه‌های ۵ لایه با تغییر در آرایش لایه‌ها حاصل از شبیه سازی عددی

نمونه	تعداد لایه	جذب انرژی (J)	نیروی بیشینه (N)
3K2G	۵ لایه	3.12	408.1176
3G2K	۵ لایه	8.81	661.72
KG	۵ لایه	5.86	411.52
GK	۵ لایه	8.87	582.75

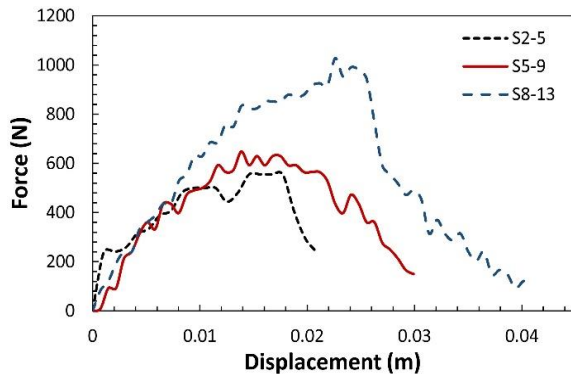


شکل ۱۲\_ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها با تغییر در چینش لایه‌ها حاصل از شبیه سازی عددی

### بررسی سطح شکست و مکانیزم‌های تخریب

شکل نفوذ در سطح رویی عمدتاً دایره‌ای است و در سطح پشت نامنظم‌تر و به صورت برآمدگی دیده می‌شود. ابعاد تقریبی پیشروی آسیب و جدایش لایه‌ها در جدول ۳ برای تمامی نمونه کامپوزیت‌ها اندازه‌گیری شده است. همانطور که در شکل ۱۱

دچار آسیب دیدگی شدیدتری نسبت به نمونه های ۹ لایه در محل ضربه شده اند، نمودار نیرو-جابجایی سطح بالاتری داشته است، که بدین معناست که الیاف شیشه برای شکست انرژی بیشتری را مطالبه می کنند و ثابت می کند که سالم بودن و آسیب دیدگی الیاف شیشه، در صفحات کامپوزیتی بر میزان مقاومت به ضربه تاثیر بیشتری دارد. میزان نیروی بیشینه در نمونه S8-13 با ۱۳ لایه نسبت به نمونه S2-5 با ۵ لایه و نمونه S5-9 با ۹ لایه به ترتیب ۸۵ و ۵۸ درصد افزایش داشته است.



شکل ۱۴- نمودار نیرو- جابه جایی سه نمونه با تعداد لایه های ۵، ۹ و ۱۳

### نتیجه گیری و جمع بندی

با مطالعه تجربی بر روی صفحات کامپوزیتی لایه ای تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین نفوذی بعنوان سیستم های جاذب انرژی، نتایج ذیل بدست آمده است:

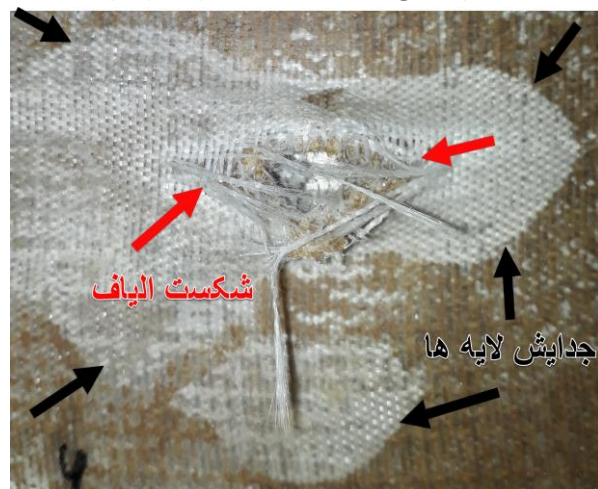
- نتایج نشان داد افزایش تعداد لایه ها از ۵ تا ۱۳ لایه میزان استحکام و مقاومت اولیه را تا ۸۵ درصد افزایش می دهد.
- میزان جذب انرژی ویژه (SEA) با افزایش تعداد لایه ها از ۵ به ۹ لایه به علت افزایش وزن صفحات کامپوزیتی، ۳٫۲ درصد کاهش می یابد.
- در کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه/کناف به علت تمرکز تنش در فصل مشترک لایه ها در پشت نمونه ها جدایش لایه ها یکی از اصلی ترین مکانیزم های تخریب است.
- نتایج نشان می دهد میزان SEA در ابتدا با افزایش لایه ها تا ۹ لایه روند کاهشی داشته و در ادامه افزایش پیدا می کند به طوریکه در نمونه



شکل ۱۱- ناحیه تخریب در سطح رویی و شکست الیاف



شکل ۱۲- سطح پشتی نمونه S5-9 و مشخص شدن نوع تخریب



شکل ۱۳- سطح پشتی نمونه S8-13 و مشخص شدن نوع تخریب

همانطور که در شکل ۱۴ دیده می شود، تاثیر مکانیزم های مختلف شکست بر نمودارهای نیرو-جابجایی مشخص است؛ به طوریکه در نمونه های ۱۳ لایه که الیاف شیشه

- mechanical, and thermal analysis of Shorea robusta -dispersed polyester composite,” *Int. J. Polym. Anal. Charact.*, vol. 21, no. 4, pp. 314–326, May 2016, doi: 10.1080/1023666X.2016.1155818.
- [5] M. F. Ismail, M. T. H. Sultan, A. Hamdan, and A. U. Md Shah, “A Study on the Low Velocity Impact Response of Hybrid Kenaf-Kevlar Composite Laminates through Drop Test Rig Technique,” *BioResources*, vol. 13, no. 2, Mar. 2018, doi: 10.15376/biores.13.2.3045-3060.
- [6] J. I. Mwasiagi *et al.*, “Characterization of the Kenyan Hibiscus,” *Fibres Text. East. Eur.*, vol. 3, no. 105, pp. 31–34, 2014.
- [7] A. Hamdan, F. Mustapha, K. A. Ahmad, A. S. Mohd Rafie, M. R. Ishak, and A. E. Ismail, “The Effect of Customized Woven and Stacked Layer Orientation on Tensile and Flexural Properties of Woven Kenaf Fibre Reinforced Epoxy Composites,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2016, pp. 1–11, 2016, doi: 10.1155/2016/6514041.
- [8] M. M. Davoodi, S. M. Sapuan, D. Ahmad, A. Ali, A. Khalina, and M. Jonoobi, “Mechanical properties of hybrid kenaf/glass reinforced epoxy composite for passenger car bumper beam,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 10, pp. 4927–4932, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.05.021.
- [9] F. T. Wallenberger and P. A. Bingham, Eds., *Fiberglass and Glass Technology*. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [10] M. J. Sharba, Z. Leman, M. T. H. Sultan, M. R. Ishak, and M. A. A. Hanim, “Tensile and Compressive Properties of Woven Kenaf/Glass Sandwich Hybrid Composites,” *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2016, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1155/2016/1235048.
- [11] A. U. Md Shah, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, F. Cardona, and A. R. Abu Talib, “A Review on the Tensile Properties of Bamboo Fiber Reinforced Polymer Composites,” *BioResources*, vol. 11, no. 4, pp. 10654–10676, Sep. 2016, doi: 10.15376/biores.11.4.Shah.
- [12] Y. N. Shah AUM, Sultan MTH, Cardona F, Jawaid M, Talib ARA, “Thermal analysis of bamboo fibre and its composites,” *BioRes*, vol. 12, no. 2, pp. 2394–2406, 2017.
- [13] S. S. Suhaily, H. P. S. A. Khalil, W. O. W. Nadirah, and M. Jawaid, “Bamboo Based Biocomposites Material , Design and Applications,” *Mater Sci*, vol. 549, 2013, doi: 10.1080/1023666X.2016.1155818.
- ۱۳ لایه در مقایسه با نمونه ۹ لایه ۲۶ درصد شاهد افزایش میزان SEA هستیم.
- دیده شد شکست الیاف و ماتریس مکانیزم اصلی جذب انرژی در سطح رویی صفحات کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه‌ای نفوذی است.
- مکانیزم اصلی جذب انرژی در سطح پشتی صفحات کامپوزیتی جدایش لایه‌ها به همراه شکست ماتریس و پاره‌گی الیاف گزارش شد.
- نتایج نشان داد نمونه کامپوزیتی با ۱۳ لایه با جذب انرژی ۲۲,۱۸۸۹۵ ژول، ۷۵ درصد کل انرژی ضربه یعنی ۲۹.۴۳ ژول را جذب کرده است.
- استفاده از صفحات هیبریدی با کاهش شکست ترد الیاف کنف و افزایش مکانیزم لایه‌لایه شدن بین لایه‌های کنف و شیشه به علت تغییر در جنس صفحات کامپوزیت، باعث بهبود عملکرد این صفحات کامپوزیتی تحت ضربه شده است.
- با آرایش مناسب لایه‌ها در کامپوزیت جذب انرژی به میزان ۵۱ درصد افزایش پیدا کرد.
- در نمونه کامپوزیت که لایه چینی با الیاف شیشه شروع می‌شود، نیروی بیشینه‌ی نفوذ در جابه‌جایی کمتری اتفاق می‌افتد.

## مراجع و منابع

- [1] R. Nadlene, S. M. Sapuan, M. Jawaid, M. R. Ishak, and L. Yusriah, “A Review on Roselle Fiber and Its Composites,” *J. Nat. Fibers*, vol. 13, no. 1, pp. 10–41, Jan. 2016, doi: 10.1080/15440478.2014.984052.
- [2] A. Chauhan and P. Chauhan, “Natural Fibers Reinforced Advanced Materials,” *J. Chem. Eng. Process Technol.*, vol. s6, 2013, doi: 10.4172/2157-7048.S6-003.
- [3] N. H. Mostafa, Z. Ismarrubie, S. Sapuan, and M. Sultan, “The influence of equi-biaxially fabric prestressing on the flexural performance of woven E-glass/polyester-reinforced composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 24, pp. 3385–3393, Oct. 2016, doi: 10.1177/0021998315620478.
- [4] P. Vimalanathan, N. Venkateshwaran, and V. Santhanam, “Mechanical, dynamic

- 10.1016/j.matdes.2014.11.024.
- [21] R. Yahaya, S. M. Sapuan, M. Jawaid, Z. Leman, and E. S. Zainudin, "Measurement of ballistic impact properties of woven kenaf-aramid hybrid composites," *MEASUREMENT*, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.09.016.
- [22] E. Randjbaran, R. Zahari, N. Aswan, A. Jalil, D. Laila, and A. Abdul, "Hybrid Composite Laminates Reinforced with Kevlar / Carbon / Glass Woven Fabrics for Ballistic Impact Testing," vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/413753.
- [23] C. Graciano, G. Martínez, and D. Smith, "Experimental investigation on the axial collapse of expanded metal tubes," *Thin-Walled Struct.*, vol. 47, no. 8–9, pp. 953–961, 2009, doi: 10.1016/j.tws.2009.02.002.
- [24] Z. Asaee and F. Taheri, "Enhancement of performance of three-dimensional fiber metal laminates under low velocity impact – A coupled numerical and experimental investigation," *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 21, no. 6, pp. 2127–2153, Sep. 2019, doi: 10.1177/1099636217740389.
- [25] N. Sapiai, A. Jumahat, and R. N. Hakim, "Tensile and compressive properties of hybrid carbon fiber/ kenaf polymer composite," *Adv. Environ. Biol.*, vol. 8, no. 8 SPEC. ISSUE 3, pp. 2655–2661, 2014.
- [26] A. K. Barouni and H. N. Dhakal, "Damage investigation and assessment due to low-velocity impact on flax/glass hybrid composite plates," *Compos. Struct.*, vol. 226, no. July, p. 111224, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111224.
- <http://dx.doi.org/10.5772/56700>.
- [14] G. Z., "Analysis of glass fiber mat structures and their impact on the resin absorption process and on the characteristics of composites," in *Budapest University of Technology and Economics*, 2010.
- [15] C. FC., *Structural composite materials*. ASM Int US, 2010.
- [16] Y. B. Shalwan A, "In state of art: mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres," *Mater. Des.*, vol. 48, pp. 4–24, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.014>.
- [17] M. F. Ismail, M. T. H. Sultan, A. Hamdan, A. U. M. Shah, and M. Jawaid, "Low velocity impact behaviour and post-impact characteristics of kenaf / glass hybrid composites with various weight ratios," *Integr. Med. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 2662–2673, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.04.005.
- [18] S. Zike, K. Kalnins, O. Ozolins, and M. Knite, "An Experimental and Numerical Study of Low Velocity Impact of Unsaturated Polyester / Glass Fibre Composite," vol. 17, no. 4, 2011.
- [19] R. B. Yusoff, H. Takagi, and A. N. Nakagaito, "Tensile and flexural properties of polylactic acid-based hybrid green composites reinforced by kenaf, bamboo and coir fibers," *Ind. Crops Prod.*, 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.09.017.
- [20] R. Yahaya, S. M. Sapuan, M. Jawaid, Z. Leman and E. S. Zainudin, "Effect of layering sequence and chemical treatment on the mechanical properties of woven kenaf – aramid hybrid laminated composites," *J. Mater.*, vol. 67, pp. 173-179, 2015, doi: