



## بررسی تجربی حد بالستیک و جذب انرژی در کامپوزیت‌های هیبریدی تشکیل شده از الیاف کولار و اینگرا

عرفان نکونام<sup>۱</sup>، پوریا اکبرزاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

### چکیده

در این پژوهش به مطالعه تجربی اثر ضربه سرعت بالا روی کامپوزیت‌های هیبریدی کولار/اینگرا و تاثیر افزودن الیاف اینگرا بر خواص بالستیکی نمونه کولار/اپوکسی پرداخته شده است. بدین منظور، ۶ دسته نمونه با پیکربندی‌های مختلف از الیاف پارچه‌ای کولار و اینگرا در ۵ لایه ساخته شد. سپس آزمون ضربه سرعت بالا (تفنگ گازی) در دو سرعت ۱۰۳ و ۱۳۶ متر بر ثانیه (بالتر از سرعت حد بالستیک) و به ترتیب در سطح انرژی ۳۷ و ۶۴ ژول توسط پرتابه‌ی استوانه‌ای سر مخروطی روی نمونه‌ها صورت گرفت. برای یافتن بهینه‌ترین چیدمان به کمک روابط انرژی، حد بالستیک و میزان جذب انرژی برای هر نمونه به صورت جداگانه محاسبه گردید و مشاهده شد که استفاده از الیاف اینگرا با پیکربندی IKIKI سبب افزایش جذب انرژی به میزان ۵۰/۵۷ درصد نسبت به نمونه کولار/اپوکسی شده است. در ادامه با توجه به عدم یکنواختی ضخامت و جرم در میان نمونه‌های ساخته شده، میزان جذب انرژی ویژه برای هیبریدهای کولار/اینگرا محاسبه شد که مقادیر به دست آمده برای نمونه‌های KIKIK و IKIKI به ترتیب ۶۱/۵ و ۲۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد. نتایج فوق نشان از تاثیر بالای استفاده از الیاف اینگرا در افزایش جذب انرژی نمونه‌ی کولار/اپوکسی است.

**کلمات کلیدی:** کامپوزیت هیبریدی؛ حد بالستیک؛ انرژی جذب ویژه؛ کولار؛ اینگرا.

## Experimental investigation of ballistic limit and energy absorption in hybrid composites made of Kevlar and Innegra fibers

E. Nekounam<sup>1</sup>, P. Akbarzadeh<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. of Mech. Eng., Sistan and Baluchestan Univ., Zahedan, Iran

<sup>2</sup> Assist. Prof., Mech. Eng., Sistan and Baluchestan Univ., Zahedan, Iran

### Abstract

In this research, the effect of high velocity impact on Kevlar/Innegra hybrid composites and the effect of adding Innegra fibers on the ballistic properties of Kevlar/epoxy samples have been studied experimentally. For this purpose, 6 sets of samples with different configurations of Kevlar and Innegra fabric fibers were made in 5 layers. Then, the high velocity impact test (gas gun) was performed on the samples at two velocities of 103 and 136 m/s (higher than the ballistic limit speed) and at the energy level of 37 and 64 joules, respectively, by the projectile of conical head cylinders. To find the most optimal configuration; With the help of energy relationships, the ballistic limit and energy absorption rate were calculated for each sample separately and it was observed that the use of Innegra fibers with IKIKI configuration increased energy absorption by 50.57% compared to the Kevlar/epoxy sample. Further, due to the non-uniformity of thickness and mass among the manufactured samples, the specific energy absorption rate was calculated for Kevlar/Innegra hybrids, and the values obtained for KIKIK and IKIKI samples show an increase of 61.5% and 23%, respectively. The above results show the high effect of using Innegra fibers in increasing the energy absorption of the Kevlar/epoxy sample.

**Keywords:** hybrid composite; ballistic limit; specific absorption energy; Kevlar; Innegra.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۴-۳۱۱۳۲۷۷۹

آدرس پست الکترونیک: [p.akbarzadeh@eng.usb.ac.ir](mailto:p.akbarzadeh@eng.usb.ac.ir)

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، با توجه به نوع زمینه و الیاف استفاده شده و چگونگی ترکیب با یکدیگر به انواع گوناگونی طبقه‌بندی می‌شوند. در جهان امروزه با توجه به نیازهای جدید صنعت، سری تازه‌ای از مواد مرکب که از ترکیب دو نوع فاز تقویت‌کننده به‌طور همزمان در بستر پلیمری به دست می‌آید؛ مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور کلی هدف از ترکیب دو یا چند الیاف در زمینه پلیمری (هیبرید کردن) در ساخت کامپوزیت‌ها، به‌دست آوردن فواید دو الیاف به‌طور همزمان و پوشش دادن ضعف‌های یکدیگر و ساخت ماده‌ای با عملکرد مکانیکی بهتر است که این مواد را گزینه بسیار مناسبی برای استفاده در صنایع مهندسی مهم نظیر: صنعت هوانوردی، نظامی، دریایی، هوافضا و حمل‌ونقل کرده‌است. با توجه به دامنه گسترده این مواد، شناسایی آسیب‌های به‌وجود آمده در اثر برخورد و اصابت اشیاء، در تعیین عملکرد آتی این مواد اهمیت ویژه‌ای دارد. پارچه‌ها از خواص کشسانی و قابلیت شکل‌پذیری بالایی برخوردارند که می‌توان به صورت منفرد و ترکیبی در فاز تقویت‌کننده قرار گرفته و در کاربردهایی که نیاز به جذب انرژی بالا است، مورد استفاده قرار گیرند [۱]. پارچه‌های کولار با وجود اینکه در خط مقدم پژوهش‌های علمی و کاربردهای حفاظتی قرار دارد، اما استحکام فشاری آن کمتر از استحکام کششی است و خمیدگی تحت بار فشاری یک مشکل اساسی برای این الیاف محسوب می‌شود و علت این امر به دلیل تفاوت استحکام کششی در دو جهت طولی و عرضی برای این الیاف است که در نهایت منجر به کاهش مقاوت به ضربه در کامپوزیت های کولار/اپوکسی می‌شود [۲]. پلی‌پروپیلن<sup>۱</sup> یک پلیمر گرمانرم و یکی از پر مصرف‌ترین پلیمرهای مورد استفاده در صنایع است. پلی‌پروپیلن‌ها هنگامی که با رزین اپوکسی پیوند می‌زنند، زنجیره‌های مولکولی بلندی را تشکیل می‌دهند که منجر به افزایش چقرمگی با ممانعت از انتشار آسیب می‌شود و در کاربردهایی که کامپوزیت تحت ضربه قرار می‌گیرد، کاربرد فراوان دارد. یکی از عوامل بهبود عملکرد ضربه و افزایش استحکام، بهبود چقرمگی در مواد کامپوزیتی است. بافت پارچه‌ای پلی‌پروپیلن که با نام اینگرا<sup>۲</sup> شناخته می‌شود، از پلیمر پلی‌پروپیلن با وزن کاهش یافته و عملکرد بالا است

[۳] که سبب کاربرد گسترده این الیاف در صنعت اتومبیل سازی، صنایع نظامی، هوافضا و دریایی شده‌است. رزین اپوکسی به دلیل قدرت چسبندگی بالا سبب نگهداری الیاف در کنار یکدیگر و انتقال تنش مناسب میان بستر پلیمری و فاز تقویت‌کننده می‌شود و استفاده از این مواد را برای کاربردهای حفاظتی با عملکرد بالا، ایده‌آل می‌کند؛ اما خواص تردی این نوع پلیمر منجر به محدودیت در کاربردهای وسیع تر این مواد شده که می‌توان با اضافه کردن تقویت‌کننده‌هایی که خود جاذب انرژی هستند، این ضعف را پوشش داد. از سوی دیگر استفاده از ماتریس اپوکسی باعث می‌شود، تغییر شکل‌های ایجاد شده در الیاف لایه اول به لایه‌های زیرین منتقل نشود [۴].

فعالیت‌های انجام شده روی خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های هیبریدی<sup>۳</sup> تقویت شده با الیاف، اهمیت موضوع ضربه در انتخاب این مواد به عنوان جاذب انرژی را به روشنی نشان می‌دهد. کامپوزیت‌های هیبریدی و چگونگی ساخت آن‌ها به سال ۱۹۷۰ میلادی باز می‌گردد، به‌طوری که دوری و همکارانش در سال ۱۹۷۶ میلادی به بررسی رفتار ضربه‌ای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار پرداختند و نشان دادند که قرارگیری الیاف کولار در سطح رویی، سبب افزایش آستانه تخریب در این مواد می‌شود [۵].

بریسکو و معتمدی [۶] در سال ۱۹۹۲ به مطالعه عملکرد بالستیکی پارچه‌های کولار و بررسی ضرایب اصطکاک بین لایه‌ای در سرعت‌های مختلف از پرتابه پرداختند و گزارش کردند که با افزایش ضریب اصطکاک بین لایه‌ای در چندلایه‌های کامپوزیتی، انرژی جذب شده بیشتر می‌شود.

در سال ۱۹۹۸ ریبولات [۷] تاثیر اصطکاک بین تار و پود، در پارچه‌های بافته شده را بررسی کرد. نتایج نشان داد که چگالی خطی نخ‌ها بیشترین تاثیر روی ضریب اصطکاک را دارد، به گونه‌ای که پارچه‌های بافته شده با چگالی خطی بیشتر، ضریب اصطکاک کمتری دارند.

در سال ۲۰۰۳ بوگتی و همکاران [۸] مروری روی پارامترهای تاثیرگذار روی عملکرد بالستیکی سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف‌های بافته شده، داشتند و نشان دادند که با تغییر در هندسه پرتابه، سرعت جسم ضربه زننده، نوع پیکربندی و

<sup>3</sup> Hybrid Composites

<sup>1</sup> Polypropylene

<sup>2</sup> Innegra

گرفته است. مطابق بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، در مواجهه با شلیک پرتابه، هنگامی که الیاف آرامید در سطح پشتی و لایه‌های درونی قرار دارند، عملکرد بالستیکی بهتری از خود نشان می‌دهند.

در تحقیق انجام شده توسط باندارو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۶ رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های ترموپلاستیک تقویت شده با پارچه‌های همگن و هیبریدی در ۵ پیکربندی مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که کامپوزیت‌های ترکیبی در مقایسه با کامپوزیت‌های پایه خود، رفتار درون صفحه‌ای بهتری در مقابل تنش‌های فشاری و کششی ارائه می‌دهند.

در سال ۲۰۱۷ چن و همکاران [۱۶] به بررسی راندمان جذب در کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف بافته شده و تأثیر پیکربندی‌های مختلف بر رفتار ضربه‌ای این نوع مواد پرداختند و نتایج متفاوت برای چیدمان‌های مختلف گزارش کردند.

وانگ و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثر افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و بازالت به صورت منفرد و ترکیبی روی خواص بتن پرداختند. نتایج نشان داد که کارایی بتن با افزودن این الیاف و افزایش کسر وزنی آن‌ها افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۲۰ آسمانی و همکاران [۱۸] قابلیت جذب کامپوزیت ۲ لایه کولار/الاستومر و کولار/اپوکسی، تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت بالا با پرتابه سر کروی در بازه ۱۱۷ تا ۱۲۵ متر بر ثانیه را بررسی و ارزیابی کردند و نشان دادند استفاده از الاستومر به دلیل برگشت‌پذیری و بالا بودن نسبت جذب انرژی نسبت به وزن، می‌تواند خواص ضربه‌ای کامپوزیت را برای کاربردهای بالستیک افزایش دهد که تغییر شکل، سرعت خروجی پرتابه و انرژی جذب شده را به عنوان نتایج گزارش کردند.

امیریان و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه اثر ضربه سرعت بالا روی کاپوزیت‌های هیبریدی کولار/بازالت پرداختند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از دو نوع فاز تقویت‌کننده در زمینه اپوکسی سبب بهبود خواص ضربه‌ای نسبت به نمونه منفرد این الیاف می‌شود.

نورازی [۲۰] در سال ۲۰۲۱ به مطالعه مروری روی عملکرد بالستیک کامپوزیت‌های زمینه پلیمری پرداخت و گزارش کرد که خواص تردی رزین اپوکسی سبب می‌شود، حداکثر کشش

تعداد لایه‌ها و مقدار اصطکاک در شرایط مرزی و محیطی مختلف، میزان جذب انرژی برای این سازه‌ها متفاوت خواهد بود.

در تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۰۴ توسط داسیلوا [۹] گزارش شد که استفاده از الیاف کولار به عنوان فاز تقویت‌کننده در برابر بارگذاری ضربه‌ای با توجه به نسبت استحکام به وزن بالای این الیاف، بهترین گزینه برای استفاده در کاربردهای حفاظتی و بالستیکی است، اما به دلیل قیمت بالای این الیاف، استفاده از آن مقرون به صرفه نمی‌باشد و راه‌حل این مشکل، جایگزین الیاف کولار با الیاف‌هایی با قابلیت کشسانی و استحکام بالا است.

زنگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۶ به بررسی اثر اصطکاک روی تاروپود الیاف بافته و درگیری موثر میان پرتابه و الیاف، برای کاربردهای حفاظتی و زرهی پرداختند. نتایج آنان به این صورت بود که در سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک، پاسخ بالستیکی نمونه بسیار تأثیرپذیر از اصطکاک نخ‌ها است، به گونه‌ای که با افزایش اصطکاک بیش از حد مجاز، گسیختگی زودرس در الیاف رخ می‌دهد و عملکرد سازه در جذب انرژی پرتابه کاهش می‌یابد.

دانگ و سان [۱۱] در سال ۲۰۰۹ استحکام کششی پارچه‌های کولار بافته شده با ضخامت و وزن‌های مختلف را مورد مطالعه قرار دادند، آنها گزارش کردند که الیاف با قابلیت کشسان بالاتر یا به عبارت دیگر پارچه‌هایی که الیاف با نیروی کشیدگی بالاتر است، عملکرد بالستیکی بهتری از خود نشان می‌دهند.

در سال ۲۰۱۲ چن و همکاران [۱۲] گزارش کردند که به دلیل کریستالی بودن بالای الیاف کولار، سطوح الیاف کولار از لحاظ شیمیایی صاف و یک دست می‌باشد و باعث اتصال و چسبندگی ضعیف با ماتریس می‌شود که می‌تواند بر استحکام ضربه‌ای نمونه نهایی، تأثیر بسزایی بگذارد.

پیرمحمدی و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۴ به مطالعه تجربی ضربه سرعت بالا روی کامپوزیت‌های هیبریدی پرداختند. آن‌ها با بررسی مکانیزم شکست در سازه کامپوزیتی و میزان جذب انرژی توسط هر لایه نشان دادند که پوسته رویی نسبت به پوسته زیرین نقش بیشتری در جذب انرژی ایفا می‌کند.

انتخاب بهترین چیدمان در جذب انرژی نمونه‌های هیبریدی کربن، شیشه و آرامید در پژوهش انجام شده توسط باندارو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۵ در برابر ضربه سرعت بالا صورت

## ۲- آزمون تفنگ گازی

آسیب‌هایی که به سازه‌های کامپوزیتی وارد می‌شود، در دو دسته کلی، آسیب‌هایی که سازه را دچار واماندگی و از کار افتادگی می‌کند و آسیب‌های دیگر که عملکرد آتی سازه را مختل و باعث کاهش طول عمر سازه می‌گردد، طبقه‌بندی می‌شوند. برای یافتن اثر برخورد میان پرتابه و نمونه کامپوزیتی در مقابل بارگذاری ضربه‌ای و ناگهانی در بازه‌های سرعتی مختلف، آزمون تفنگ گازی انجام می‌گیرد. برای انجام آزمون ضربه روی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف، در محدوده گسترده‌ای از سرعت‌ها با توجه به نیاز صنایع مدرن، از دستگاه تفنگ گازی، برای شناخت خصوصیات مواد مهندسی استفاده می‌شود. سه پارامتر مهم که توسط این دستگاه در اختیار کاربر قرار می‌گیرد، شامل: سرعت حد بالستیک، سرعت باقیمانده در پرتابه پس از عبور از هدف و ظرفیت جذب انرژی در نمونه است.

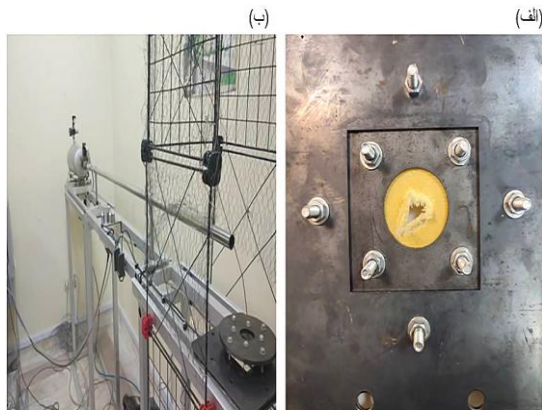
سرعت حد بالستیک، کمترین سرعتی از پرتابه یا جسم خارجی است که باعث ایجاد نفوذ و عبور از سطح سازه می‌شود. آگاهی از سرعتی که قطعه در آستانه تخریب و واماندگی قرار می‌گیرد در انتخاب درست این مواد در مقابل بارگذاری‌های ضربه‌ای، نقش بسزایی دارد [۲۴-۲۵].

اساس کار تفنگ گازی، ایجاد ارتباط میان لوله شلیک پرتابه و مخزن ذخیره گاز به کمک یک شیر برقی سنولوییدی و یک منبع تغذیه پرفشار نظیر کمپرسور است. هنگامی که شیر برقی متصل می‌شود، فشار در پشت دیافراگم محفظه ذخیره گاز افزایش می‌یابد و سبب آزاد کردن ناگهانی گاز برای شلیک پرتابه می‌شود. پارامتر تعیین‌کننده برای ایجاد سرعت مد نظر در پرتابه، فشار گاز است که این فشار گاز خود، تابع جنس، قطر و طول لوله شلیک، شکل و جرم پرتابه است و در تعیین سرعت اولیه برای پرتابه نقش بسزایی دارد. با رسیدن پرتابه به سطح نمونه، سرعت آن توسط سرعت سنج؛ با استفاده از دو منبع نور لیزری متمرکز، تعیین می‌گردد. به‌طوریکه مدت زمانی که پرتابه دو نور لیزر متمرکز را قطع می‌کند، سرعت پرتابه تعیین می‌شود. این دستگاه قابلیت شلیک با پرتابه‌های مختلف (هندسی) در محدوده سرعت‌های متفاوت را دارد. MIL-P-46593A [۲۶] از رایج‌ترین استانداردها برای ساخت پرتابه‌های شبه گلوله‌ای است که برای آزمون‌های ضربه سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از پرتابه

در الیاف رخ ندهد که می‌توان با اضافه کردن تقویت‌کننده‌هایی با قابلیت کشسان بالا این ضعف را پوشش داد.

لیو و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۲ به مطالعه آسیب روی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری گرماسخت و بررسی نوع شکست به کمک تصاویر میکروسکوپی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که ماتریس رزین اپوکسی بعد از پخت، ترد و شکننده می‌شود و جذب انرژی نمونه را کاهش می‌دهد.

با مطالعات صورت گرفته روی مقالات گزارش شده در خصوص کامپوزیت‌های کولار/اپوکسی علی‌رغم اینکه تحقیقات بسیاری روی عملکرد بالستیک و مکانیزم‌های خرابی این مواد صورت گرفته است، اما با توجه به نبود استاندارد مشخص در آزمون تفنگ گازی و تفاوت در پارامترهایی نظیر، سرعت پرتابه در لحظه برخورد، جنس و جرم پرتابه، ابعاد و هندسه نمونه، تعداد تکرار در آزمایش و شرایط محیطی مختلف، میزان خرابی به همراه حد بالستیک سازه‌های کامپوزیتی، در منابع مورد بررسی، تفاوت زیادی را نشان می‌دهد [۲۲]. به‌طور خلاصه، با توجه به ضعف‌های ساختاری الیاف کولار و ایجاد پیوند ضعیف با رزین اپوکسی و ضعف الیاف کولار در مقابل نیروی فشاری [۲۳]؛ در این پژوهش سعی شده‌است که با استفاده از الیاف اینگرا و ترکیب آن با الیاف کولار، عملکرد بالستیکی نمونه کولار/اپوکسی بهبود داده شود. از طرف دیگر یکی از شاخص‌های مهم در طراحی و انتخاب ماده، مقرون به صرفه بودن الیاف در ساخت نمونه نهایی در راستای کاهش هزینه‌های اقتصادی است که با توجه به وارداتی بودن الیاف کولار و قیمت گزاف این الیاف، تولید نمونه‌های کولار/اپوکسی توجیه اقتصادی ندارد و برای کاربردهایی که نیازمند لایه‌های زیادی از الیاف کولار است، استفاده از الیاف اینگرا و ساخت نمونه‌های هیبریدی کولار/اینگرا، علاوه بر بهبود ضعف‌های کولار و افزایش جذب انرژی، موجب کاهش هزینه‌های اقتصادی در ساخت نمونه نهایی می‌گردد که این موضوع برای صنایع دفاعی و نظامی دارای اهمیت ویژه‌ای است؛ همچنین با توجه به تفاوت ضخامت و وزن میان نمونه‌های ساخته شده و اهمیت انتخاب این مواد در کاربردهای حفاظتی، به بررسی اثر دقیق این دو پارامتر (وزن و جرم) بر رفتار جاذب‌های هیبریدی کولار/اینگرا پرداخته شده‌است که به خوانندگان این پژوهش درک صحیح‌تری در انتخاب این مواد در مقابل بارگذاری‌های ضربه‌ای می‌دهد.



شکل ۲- الف) نمونه و نگه دارنده نمونه  
ب) دستگاه تفنگ گازی، آزمون ضربه سرعت بالا

## ۲-۱- مکانیزم‌های خرابی رخ داده در اثر ضربه سرعت بالا

کامپوزیت‌ها به دلیل استفاده از چند ماده با خواص رفتاری مختلف در کنار یکدیگر، دارای عملکرد بالستیکی متفاوت‌تری نسبت به بقیه مواد مهندسی می‌باشند. از مفاهیم مهم در مکانیک ضربه مواد مرکب بررسی مکانیزم‌های خرابی به وجود آمده و نقش هر یک در جذب انرژی پرتابه است که مانع از سوراخ شدن نمونه می‌شود. هنگام فرایند نفوذ مقداری از انرژی اولیه پرتابه با ایجاد کشیدگی در الیاف کاهش می‌یابد و پس از اینکه این انرژی بر استحکام کششی و فشاری نهایی نمونه برتری یابد، سبب ایجاد سوراخ برشی ناشی از نفوذ پرتابه برشی در سطح نمونه می‌شود. هنگامی که یک چند لایه کامپوزیتی تحت ضربه سرعت بالا قرار دارد؛ مکانیزم‌های تخریبی که در آن ایجاد می‌شود شامل: جدایش بین لایه‌ای<sup>۱</sup>، ترک‌های ایجاد شده در ماتریس<sup>۲</sup>، گسیختگی در الیاف<sup>۳</sup> و بیرون کشیدن از زمینه است. گسیختگی در الیاف ناشی از تنش کششی به وجود آمده در راستای تار و پود آن است. ایجاد ترک در فاز زمینه که می‌تواند در راستای الیاف یا در راستای ضخامت نمونه باشد و به عنوان اولین حالت شکست در چند لایه‌های کامپوزیتی به شمار می‌رود [۲۷]. ترک‌های به وجود آمده در زمینه و رسیدن آن به فصل مشترک میان ماتریس و الیاف، موجب جدایش آن از زمینه می‌شود که اثر بسزایی، روی استحکام مکانیکی قطعه

استوانه‌ای سرمخروطی (شکل ۱) استفاده شده است که دلیل انتخاب این پرتابه، بحرانی‌تر بودن نوک پرتابه نسبت به پرتابه‌های سرتخت و سرکروی سبب ایجاد یک تنش برشی مضاعف بر تنش کششی در نقطه برخورد می‌شود و شکست الیاف را تسریع می‌کند که این رویداد می‌تواند بر روی میزان جذب تاثیر گذار باشد. مشخصات پرتابه استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- گلوله استفاده شده

### جدول ۱- مشخصات پرتابه استفاده شده در این پژوهش

سختی (Rockwell)	وزن (gr)	قطر (mm)	جنس	طول پرتابه (mm)	طول دماغه (mm)
۶۰-۶۲	۶/۸۶	۶	فولاد سخت کاری شده	۴۰	۲۰

در شکل ۲ دستگاه تست ضربه سرعت بالا به همراه نگه‌دارنده نمونه با شرایط تکیه‌گاهی چهار طرف ثابت نشان داده شده است. این دستگاه مدل High Velocity Impact Test M211 واقع در آزمایشگاه مواد و سازه‌های کامپوزیتی پیشرفته و هوشمند دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی است.

<sup>3</sup> Fiber fracture

<sup>1</sup> Delamination

<sup>2</sup> Matrix cracking

حد کشیدگی (%)	۲/۴
استحکام کششی (MPa)	۱۷۸۹
نسبت پواسون	۰/۳۶

### ۳-۲- الیاف اینگرا

الیاف پلی‌پروپیلن خریداری شده<sup>۲</sup> (شکل ۴) ساخت کشور استرالیا و دارای بافت ساتن<sup>۴</sup> است که برخی از خصوصیات مکانیکی و فیزیکی آن در جدول ۳ گزارش شده است.



شکل ۴- بخشی از الیاف اینگرا مورد استفاده در این پژوهش

### جدول ۳- مشخصات الیاف پارچه‌ای پلی‌پروپیلن

مقدار	ویژگی
۰/۸۴	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
۲۰۰	چگالی سطحی (gr/m <sup>2</sup> )
۱۳۷۱۶	مدول کششی (GPa)
۱۰	حد کشیدگی (%)
۶۶۷	استحکام کششی (MPa)

### ۳-۳- رزین اپوکسی

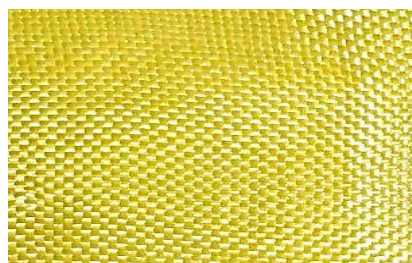
بستر پلیمری مورد استفاده در این پژوهش، رزین اپوکسی پی-سی ۵۱۰۵ ساخت کشور کره جنوبی، با سخت‌کننده<sup>۶</sup> ۲۰ درصد است. این نوع اپوکسی (شکل ۵) یک مایع بی‌رنگ و به دلیل ویسکوزیته پایین و خواص مکانیکی مطلوبی دارد که مناسب برای ساخت چند لایه‌های کامپوزیتی<sup>۷</sup> است.

کامپوزیتی دارد. به‌طور کلی هر یک از این خرابی‌ها، سبب کاهش انرژی جنبشی در پرتابه و تفاوت در عملکرد بالستیکی نمونه‌های موجود می‌شود که شناسایی این آسیب‌ها در طراحی سازه با عملکرد بالا، نقش بسزایی دارند. در حالت کلی، تغییر شکل کلی سازه و روند جذب انرژی برای نمونه‌های ۵ لایه هیبریدی و غیر هیبریدی ساخته شده ناشی از خمش، تنش برشی، تغییر شکل‌های غشائی و تغییر شکل‌های محلی در محل برخورد است که باعث ایجاد یک سری از مکانیزم‌های خرابی در سطح سازه شده است.

### ۳- مواد و روش ساخت

#### ۳-۱- الیاف کولار

الیاف کولار خریداری شده (شکل ۳) با نام تجاری ۱۰۰دی-پی<sup>۱</sup> تولید شده، توسط شرکت چینی واقع در شانگهای کشور چین است. نوع بافت الیاف کولار به‌صورت ساده<sup>۲</sup> است. لازم به ذکر است، این نوع الیاف از نوع کولار ۴۹ است. در جدول ۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف کولار ذکر شده است.



شکل ۳- بخشی از الیاف کولار مورد استفاده در این پژوهش

### جدول ۲- مشخصات الیاف کولار مورد استفاده در این

مقدار	ویژگی
۱/۴۴	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
۱۱۰	چگالی سطحی (gr/m <sup>2</sup> )
۱۱۲	مدول کششی (GPa)
۰/۱۳	ضخامت (mm)

#### تحقیق

<sup>5</sup> PC-105

<sup>6</sup> Hardener

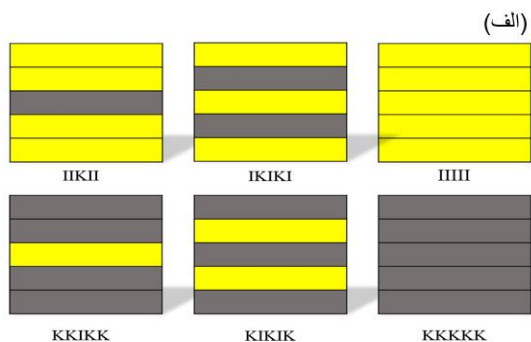
<sup>1</sup> C1 composite Laminate

<sup>1</sup> Aramid Fabric HM

<sup>2</sup> Woven Plain

<sup>3</sup> Innegra IS-2800

<sup>4</sup> Satin Woven



(الف)



(ب)

شکل ۶- (الف) شماتیک پیکربندی‌های ساخته شده و (ب) نمونه‌های آماده شده برای آزمون ضربه

پس از ساخت نمونه‌ها، برای جداسازی نمونه کامپوزیتی از قالب و رسیدن به ابعاد آزمایشگاهی مورد نیاز، لازم است حداقل ۲۴ ساعت از فرآیند قالب‌گیری و پرس نمونه‌های کامپوزیتی گذشته باشد. پس از گذشتن زمان اشاره شده می‌توان اقدام به جداسازی نمونه‌ها از قالب نمود؛ بدین گونه که به کمک دست به آرامی قطعه شیشه‌ای بالایی را تحت فشار قرار داده و اگر سلیکون به خوبی و به کفایت اسپری شده باشد؛ نمونه به راحتی از قالب جدا خواهد شد. در انتها برای برش نمونه‌های ساخته شده و رسیدن به ابعاد مورد نیاز (۷×۷ سانتی‌متر) از دستگاه برش لیزر استفاده شده‌است که سبب کاهش خطا در هنگام برش شده‌است. لازم به ذکر است که تعداد نمونه‌های برش خورده برای کامپوزیت‌های منفرد و هیبریدی ساخته شده از الیاف کولار و اینگرا برای هر پیکربندی، ۹ عدد بوده است که در جدول ۴ مشخصات فیزیکی نمونه‌های مورد استفاده، گزارش شده‌است. در ادامه برای محاسبه میزان حباب و تخلخل در نمونه‌های ساخته شده؛ به کمک معادلات بیان شده در مرجع [۲۸]، ابتدا درصد وزنی و حجمی برای نمونه‌های منفرد و هیبریدی ساخته شده از



شکل ۵- رزین مورد استفاده در پژوهش

### ۳-۴- ساخت

نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده در این پژوهش، با استفاده از لایه‌چینی دستی<sup>۱</sup> در ۶ پیکربندی مختلف در ابعاد ۱۰×۳۰ سانتی متر آماده شدند. از شیشه با ضخامت بالا برای داشتن سطحی یکنواخت و سهولت در پخش رزین به عنوان قالب استفاده شده‌است که برای بالا بردن کیفیت و پاکیزگی سطح از تینر ۲۰۰۰۰ برای تمیز کردن استفاده شد. در ادامه قسمت پایین قالب توسط پنبه آغشته به واکس جداکننده چرب و سپس از فاصله مناسب روی آن اسپری PVA<sup>۲</sup> پاشیده شد. با انجام این کار هنگام جداسازی نمونه از قالب مشکلی پیش نخواهد آمد. پس از توزین استاندارد رزین و سخت‌کننده مقداری از رزین روی سطح قالب ریخته و لایه اول کولار یا اینگرا روی آن قرار می‌گیرد. این روش تا رسیدن به لایه‌چینی دلخواه ادامه خواهد داشت. پس از رسیدن به لایه‌چینی مد نظر برای تولید نهایی محصول می‌بایست فشار ثابت و مستقیم به نمونه‌ها اعمال گردد؛ بنابراین برای جدا کردن حباب‌های اضافی، داشتن سطحی یکنواخت و چسبیدن بهتر لایه‌ها در مرحله پخت (دمای محیط)، از وزنه ۱۰ کیلویی برای پرس نمونه‌ها استفاده شد. مدت زمان اعمال فشار تا رسیدن به پخت نهایی ۲۴ ساعت بوده‌است. شکل ۶، نشان دهنده انواع مختلف پیکربندی‌های ساخته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد که رنگ زرد نشان‌دهنده الیاف کولار (K) و رنگ خاکستری (I) نشان‌دهنده الیاف اینگرا است.

<sup>3</sup> Polyvinyl Alcohol

<sup>2</sup> Hand Lay-up

$$E_p = \frac{1}{2} m_p (V_r^2 - V_i^2) \quad (۴)$$

$$V_{BL} = \sqrt{V_r^2 - V_i^2} \quad (۵)$$

در روابط بالا،  $E_i$  و  $E_r$  انرژی پرتابه بر حسب ژول به ترتیب قبل و بعد از برخورد هستند.  $E_p$  میزان ژول انرژی تلف شده در طول فرآیند ضربه،  $m_p$  جرم گلوله بر حسب کیلوگرم،  $V_i$  سرعت اولیه پرتابه هنگام برخورد،  $V_r$  سرعت باقیمانده هنگام خروج پرتابه و  $V_{BL}$  سرعت حد بالستیک است.

یکی از پارامترهای مهم دیگر در بررسی جاذب‌های انرژی، جذب انرژی ویژه ( $SEA^1$ ) است [۲۹]. این پارامتر به صورت مقدار جذب شده انرژی بر واحد جرم نمونه محاسبه می‌گردد که واحد آن ژول بر گرم است.

$$SEA = \frac{E_p}{m} \quad (۶)$$

معادله ۶ جذب انرژی ویژه را نشان می‌دهد که  $E_p$  بیانگر انرژی جذب شده و  $m$  بیانگر جرم نمونه است.

علت بررسی این پارامتر را می‌توان اینگونه بیان کرد که اگرچه استحکام یک سازه به عنوان یکی از مهمترین مباحث در مکانیک شکست است و با محاسبه انرژی جذب شده در نمونه های کامپوزیتی تعریف و مورد بررسی قرار می‌گیرد، اما عامل مهم دیگر در طراحی نمونه‌های کامپوزیتی برای کاربردهای حفاظتی، پارامتر وزن است، به گونه‌ای که اگر سازه دارای قابلیت جذب انرژی بالایی باشد، اما حمل کردن آن به علت وزن زیاد سخت باشد؛ چنان مطلوب نخواهد بود و یک اثر منفی به شمار می‌رود.

به طور خلاصه آزمایش ضربه سرعت بالا در دو سرعت ۱۰۳ و ۱۳۶ متر بر ثانیه (بالاتر از سرعت حد بالستیک) روی نمونه های ۵ لایه (هر آزمایش سه مرتبه) انجام شد و سرعت برخورد و خروج پرتابه از نمونه‌ها، توسط دستگاه اندازه‌گیری شد. به کمک معادلات ۱ تا ۵، پارامترهای مربوط به انرژی و سرعتی که پرتابه از نمونه عبور نمی‌کند؛ برای تمامی نمونه‌ها محاسبه گردید که میانگین نتایج برای کامپوزیت‌های هیبریدی و غیرهیبریدی اینگرا/کولار در جدول ۵ بیان شده‌است.

الیاف کولار و اینگرا، محاسبه شد. پس از انجام محاسبات، میزان تخلخل و حباب محاسبه شده [۲۸] برای نمونه‌های موجود، مقادیر ۰/۱ تا ۰/۵۸ را نشان داد که بیانگر کیفیت ساخت نمونه‌ها است.

جدول ۴- مشخصات هیبریدهای کولار/اینگرا

پیکربندی	تعداد لایه	چگالی ( $gr/cm^3$ )	ضخامت (mm)	جرم (gr)
KKKKK	۵	۱/۲	۰/۹۵	۵/۶۰
IIII	۵	۱/۰۱	۲/۴۷	۱۲/۱۸
IIKII	۵	۰/۹۰	۲/۲۳	۹/۷۳
KIKIK	۵	۱/۰۳	۱/۶۰	۸/۱۱
IKIKI	۵	۰/۹۳	۲/۰۰	۹/۲۰
KKIKK	۵	۱/۰۱	۱/۳۰	۶/۳۷

#### ۴- پارامترهای انرژی و سرعت حد بالستیک

هدف از انجام آزمایشات ضربه بر روی چند لایه‌های کامپوزیتی، به‌دست آوردن میزان مقاومت به ضربه این مواد در مقابل برخورد پرتابه و اجسام خارجی و تعیین سرعتی است که باعث ایجاد خرابی و کاهش عملکرد حفاظتی برای این مواد می‌شود. مرسوم‌ترین روش در تعیین میزان جذب انرژی چندلایه‌های کامپوزیتی، به دست آوردن میزان هدر رفت انرژی جنبشی، پس از نفوذ و عبور پرتابه از نمونه است؛ بنابراین جذب انرژی کامپوزیت را از لحاظ تئوری می‌توان در اختلاف انرژی میان انرژی باقیمانده در پرتابه و انرژی اولیه آن به‌دست آورد. در نتیجه، می‌توان با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ میزان جذب انرژی را برای نمونه‌های ساخته شده محاسبه کرد.

$$E_i = \frac{1}{2} m_p V_i^2 \quad (۱)$$

$$E_r = \frac{1}{2} m_p V_r^2 \quad (۲)$$

$$E_p = E_r - E_i \quad (۳)$$

پس از محاسبه انرژی جذب شده (معادله ۳)؛ به کمک معادلات ۴ و ۵، مقدار حد بالستیک برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه می‌شود.

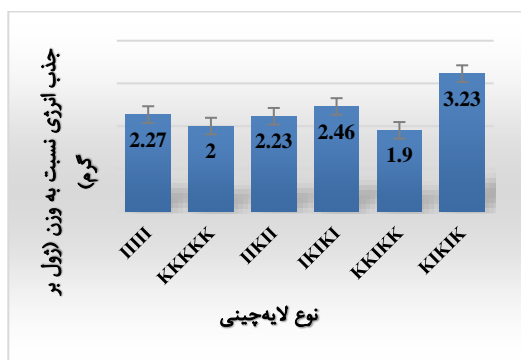
<sup>1</sup> Specific Energy Absorption



۴-۱- جذب انرژی ویژه (جذب انرژی نسبت به وزن) در

هیبریدهای کولار/اینگرا

شکل ۷ نمودار جذب انرژی ویژه نمونه‌های ساخته شده به صورت منفرد و هیبریدی را پس از برخورد پرتابه در پیکربندی‌های مختلف از الیاف کولار و اینگرا را نشان می‌دهد. این معیار این‌گونه بیان می‌شود که هرچه انرژی جنبشی جذب شده توسط نمونه نسبت به وزن آن مقدار بیشتری باشد با افزایش کمی وزن، انرژی جذب شده در نمونه افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار جذب انرژی ویژه مربوط به نمونه با پیکربندی KIKIKI است که نسبت به نمونه کولار/اپوکسی و اینگرا/اپوکسی به ترتیب ۶۱/۵ و ۴۲/۲۹ درصد افزایش در جذب انرژی ویژه را نشان می‌دهد که این مقدار برای نمونه با پیکربندی IKIKI به ترتیب ۲۳ و ۸ درصد است؛ همچنین نمونه هیبریدی KKIKK کمترین میزان جذب انرژی ویژه را در مقایسه با سایر نمونه‌های هیبریدی دارد. تفاوت در مقادیر جذب انرژی ویژه هیبریدهای کولار/اینگرا، نشان‌دهنده تاثیر بالای چیدمان و نقش مهم لایه اول در هنگام ساخت نمونه‌ها است که تاثیر بالای استفاده از الیاف اینگرا در افزایش جذب انرژی ویژه نمونه کولار/اپوکسی را به خوبی نشان می‌دهد؛ یعنی استفاده از الیاف اینگرا باعث افزایش جذب انرژی نسبت به نمونه منفرد کولار شده است و استفاده از آن در کنار الیاف کولار، افزایش استحکام ضربه‌ای در هیبریدهای کولار/اینگرا را به همراه خواهد داشت.



شکل ۷- نمودار انرژی جذب شده نسبت به وزن برای هیبریدهای کولار/اینگرا

جدول ۵- میانگین نتایج مورد استفاده در تحقیق

پیکربندی	سرعت ورودی (متر بر ثانیه)	سرعت خروجی (متر بر ثانیه)	جذب انرژی (ژول)
KIKIKI	۱۳۶	۱۱۴	۱۹/۲۴
	۱۰۳	۷۱/۵	۱۹/۰۲
	۷۴	۰	۲۰/۵۸
KKIKK	۱۳۶	۱۲۱/۵	۱۳/۰۵
	۱۰۳	۷۴/۵	۱۷/۷۰
	۶۶	۰	۱۵/۴۹
KKKKK	۱۳۶	۱۲۶/۵	۸/۷۲
	۱۰۳	۸۲	۱۳/۵۸
	۵۶	۰	۱۱/۲۳
IKIKI	۱۳۶	۱۱۳/۵	۱۹/۶۳
	۱۰۳	۵۶	۲۷/۳۷
	۸۰	۰	۲۲/۷۲
IIKII	۱۳۶	۱۱۶	۱۷/۶۰
	۱۰۳	۵۴/۵	۲۶/۷۳
	۷۸	۰	۲۱/۷۳
IIIII	۱۳۶	۱۰۴	۲۶/۸۶
	۱۰۳	۴۹/۵	۲۸/۷۸
	۸۹	۰	۲۷/۷۳

با دقت به سرعت حد بالستیک تخمین زده برای نمونه اینگرا/اپوکسی (۸۹ متر بر ثانیه) و مقایسه آن با نمونه کولار/اپوکسی (۵۶ متر بر ثانیه) می‌توان به این نتیجه رسید که نمونه اینگرا/اپوکسی، عملکرد بالستیکی مطلوبی از خود نشان داده‌است؛ همچنین نمونه اینگرا/اپوکسی در مقایسه با نمونه کولار/اپوکسی دارای محدوده سرعت ضربه مجاز بیشتری است و استفاده از آن برای ساخت هیبریدهای کولار/اینگرا، سبب افزایش عملکرد بالستیکی و کاهش هزینه‌ها نسبت به نمونه کولار/اپوکسی می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۵) برای نمونه اینگرا/اپوکسی و عملکرد مطلوب الیاف اینگرا در جذب انرژی پرتابه مخروطی شکل، استفاده از آن در کنار الیاف کولار (به صورت ترکیبی) سبب افزایش عملکرد بالستیکی و کاهش هزینه‌های اقتصادی نسبت به نمونه کولار/اپوکسی می‌شود که می‌تواند برای صنایع نظامی و دفاعی گزینه بسیار مناسبی باشد.

پرداخته شده‌است و با توجه به یکسان بودن ضخامت (تقریبی) میان نمونه با پیکربندی IKIKI و KIKIK به مقایسه سطوح شکست و مقایسه عملکرد بالستیکی نمونه‌های ذکر شده؛ پرداخته شده‌است.

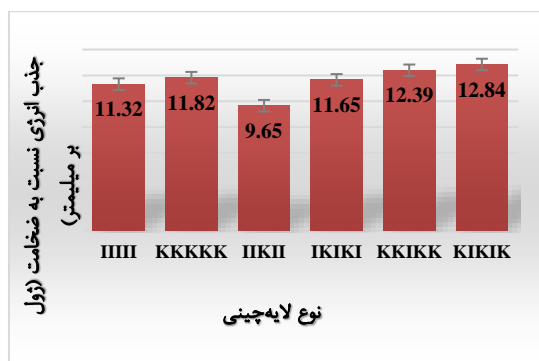
#### ۵-۱- سطوح شکست در نمونه کولار/اپوکسی و

##### اینگرا/اپوکسی

در شکل ۹ و شکل ۱۰ میزان تخریب در سطح جلویی و عقبی؛ در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک و تخریب ناشی از حد بالستیک برای کامپوزیت‌های منفرد الیاف کولار و اینگرا نمایش داده شده‌است. با مقایسه میزان تخریب در نمونه کولار/اپوکسی و اینگرا/اپوکسی مشاهده می‌شود، هنگامی که الیاف اینگرا در مقابل اصابت پرتابه قرار می‌گیرند، میزان تخریب در محل برخورد افزایش یافته است. این تفاوت هم در محل ورود و هم محل خروج پرتابه قابل مشاهده است. همچنین برخلاف نمونه تمام کولار که محل ورود و خروج تقریباً دایره‌ای شکل است؛ در نمونه تمام اینگرا محل ورود گلوله به‌صورت غیرکروی و کشیده است و در محل خروج گلوله، پارگی الیاف و پدیده گلبرگ زنی ناشی از بیرون کشیدگی الیاف<sup>۱</sup> به خوبی نمایان است. این تفاوت در میزان تخریب، ناشی از تفاوت در رفتار این دو الیاف است. عامل شکست در نمونه کولار/اپوکسی، گسیختگی پتالینگ<sup>۲</sup> و ایجاد سطح مخروطی شکل در پشت نمونه است. برای نمونه کولار/اپوکسی در سرعت‌های بالاتر از حد بالستیک مساحت سطح آسیب با سطح مقطع پرتابه برابر خواهد بود؛ همچنین الیاف اینگرا چقرمگی و انعطاف‌پذیری بیشتری را نشان می‌دهد که منجر به افزایش تغییر فرم پلاستیک در کامپوزیت اینگرا/اپوکسی شده‌است.

#### ۴-۲- جذب انرژی نسبت به ضخامت در هیبریدهای کولار/اینگرا

ضخامت به صورت مطلق و نسبی می‌تواند روی عملکرد بالستیکی و جذب انرژی در سازه‌های مرکب بگذارد و سبب تغییر در الگوی شکست در هیبریدهای کولار/اینگرا شود. با نظر به تفاوت ضخامت در نمونه‌های ساخته شده از الیاف کولار و اینگرا و نیاز صنایع به مواد با ضخامت‌های مختلف، به بررسی پارامتر جذب انرژی نسبت به ضخامت پرداخته شده‌است و برای هر نمونه مقدار این پارامتر به دست آمده و با دیگر نمونه‌ها مقایسه شده‌است. با توجه به عدم یکنواختی ضخامت در هیبریدهای کولار/اینگرا، تفاوت در چگونگی تغییر شکل غشایی و تفاوت در انتشار موج ضربه در ورق‌های نازک و ضخیم در برابر اصابت پرتابه، مکانیزم‌های خرابی و به تبع آن مقادیر جذب انرژی نسبت به ضخامت برای این نمونه‌ها مقادیر متفاوتی را نشان می‌دهد. شکل ۸ نمودار جذب انرژی نسبت به ضخامت را برای هیبریدهای کولار/اینگرا نشان می‌دهد که بیشترین مقدار مربوط به نمونه با پیکربندی KIKIK و پس از آن KKIKK است که به ترتیب مقادیر ۱۲/۸۶ و ۱۲/۳۹ ژول بر میلیمتر را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۸- نمودار انرژی جذب شده نسبت به ضخامت برای هیبریدهای کولار/اینگرا

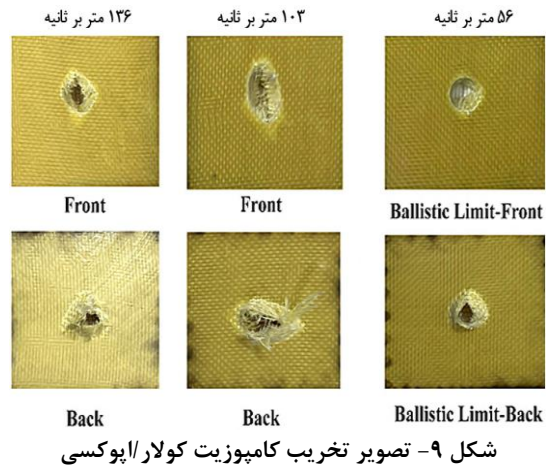
#### ۵- بررسی ماکروسکوپی سطوح شکست

لازم به ذکر است که با توجه به عدم یکسان بودن ضخامت در میان نمونه‌های ساخته شده، ابتدا به ساز و کارهای خرابی ایجاد شده در نمونه‌های منفرد کولار/اپوکسی و اینگرا/اپوکسی

<sup>2</sup> Petaling

<sup>1</sup> Pull-out

کولار/اپوکسی، انرژی کرنشی ساز و کار غالب در پارچه است و با افزایش اصطکاک بین الیافی در نمونه اینگرا/اپوکسی، انرژی جنبشی به ساز و کار غالب در پارچه تبدیل شده است که روی چگونگی و گسترش آسیب تأثیر بسزایی گذاشته است. به علت تغییرات نیروی تماس میان پرتابه و لایه بیرونی که ناشی از تفاوت اصطکاک بین لایه‌ای و اصطکاک بین پرتابه و الیاف است، بررسی نوع پیکربندی در هیبریدهای کولار/اینگرا اهمیت ویژه‌ای دارد. هرچه اصطکاک بین تار و پود بیشتر در لایه‌های اولیه بیشتر باشد، لایه‌های پایین‌تر فرصت بیشتری برای گسترش تنش و موج ایجاد شده در سطح نمونه دارند که جذب انرژی در آن‌ها را افزایش می‌دهد.

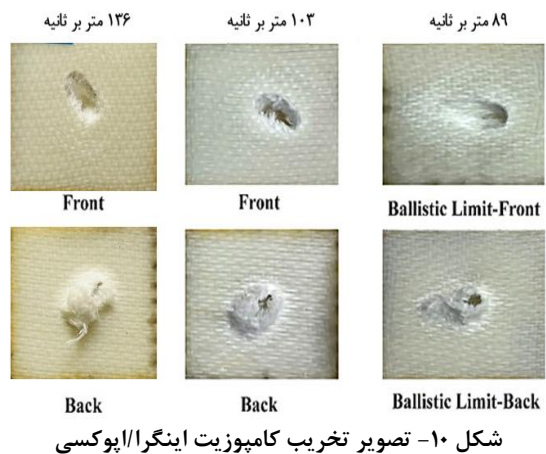


شکل ۹- تصویر تخریب کامپوزیت کولار/اپوکسی

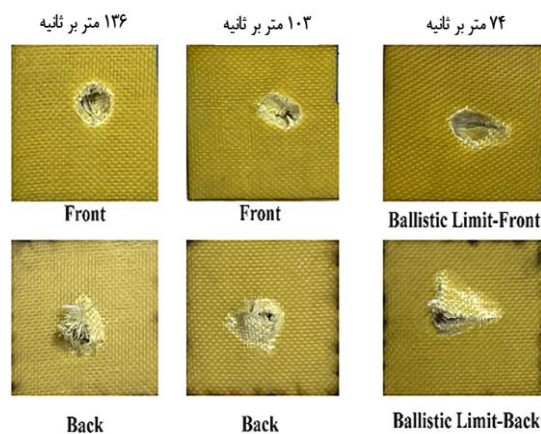
### ۵-۲- سطوح شکست در هیبریدهای IKIKI و

#### KIKIK

در شکل ۱۱ و ۱۲ میزان و چگونگی آسیب برای نمونه با پیکربندی KIKIK و IKIKI به همراه سرعت حد بالستیک تخمین زده، نشان داده شده است. هنگامی که الیاف کولار در لایه اول و آخر قرار دارد، آسیب موضعی‌تر است و بلعکس با قرارگیری الیاف اینگرا در لایه اول، آسیب جدایش بین لایه‌ای در اطراف محل برخورد رخ داده است. در سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک این جدایش بین لایه‌ای برای نمونه با پیکربندی IKIKI مشهودتر است. تفاوت در نحوه خرابی موجب تغییر در عملکرد بالستیکی و نشان از نقش مهم لایه اول در جذب انرژی پرتابه است.



شکل ۱۰- تصویر تخریب کامپوزیت اینگرا/اپوکسی

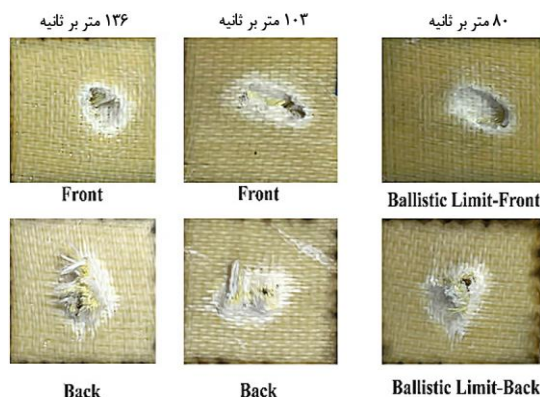


شکل ۱۱- اصابت پرتابه بر روی هیبرید کولار/اینگرا با پیکربندی KIKIK

در سرعت حد بالستیک برای نمونه اینگرا/اپوکسی به علت نزدیک بودن انرژی پرتابه به انرژی قابل جذب در نمونه، انحراف عرضی ایجاد شده به همراه شکست زمینه سبب آسیب بیشتر در این نمونه شده است که این افزایش آسیب نسبت به نمونه کولار/اپوکسی ناشی از افزایش اصطکاک، زمان نفوذ و اختلاف نسبت پواسون میان الیاف اینگرا و رزین است؛ همچنین به دلیل افزایش کرنش‌های برشی، مسیر رشد ترک به امتداد فصل مشترک بین الیاف اینگرا و رزین رسیده که باعث ایجاد شکست و لهیدگی در زمینه و شکست الیاف به همراه بیرون کشیده شدن از زمینه در نمونه اینگرا/اپوکسی شده است. این در حالی است که در سرعت حد بالستیک برای نمونه کولار/اپوکسی آسیب ایجاد شده در سطح پشتی از نوع گسیختگی پتالینگ است. گمان می‌شود در نمونه

الیاف کولار و اینگرا و ایجاد گسیختگی پتالینگ در سطح پشتی شده‌است.

به طور خلاصه، اصطکاک میان پرتابه و الیاف در نمونه‌ای که کولار در سطح بالایی و در معرض برخورد پرتابه قرار می‌گیرد، کمترین مقدار را داراست و باعث کاهش جذب انرژی نسبت به هنگامی شده‌است که الیاف اینگرا در سطح رویی قرار دارد؛ همچنین در نمونه‌هایی که الیاف کولار در سطح رویی قرار گرفته است، تغییر شکل‌های کم در نمونه رخ داده است که این تغییر شکل‌ها، با کاهش سرعت ورودی در پرتابه، سبب افزایش میزان خرابی در سطح پشتی شده است.



شکل ۱۲- اصابت پرتابه بر روی هیبرید کولار/اینگرا با

پیکربندی IKIKI

### ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر افزودن الیاف اینگرا به کامپوزیت ساخته شده تمام کولار در تعیین انرژی جذب شده در کامپوزیت‌های هیبریدی کولار/اینگرا مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است که با توجه به نوع پیکربندی‌های مورد بحث، مشاهدات صورت گرفته به شرح ذیل است:

- عملکرد بالستیکی مناسب نمونه اینگرا/پوکسی در مقایسه با نمونه کولار/پوکسی بیانگر توانایی بالا الیاف اینگرا در جذب انرژی و کاهش انرژی جنبشی پرتابه است و استفاده از آن در ساخت کامپوزیت‌های کولار/پوکسی و هیبرید کردن آن با الیاف کولار سبب افزایش جذب انرژی در کامپوزیت‌های کولار/اینگرا شده‌است.
- با توجه به عدم یکنواختی ضخامت در میان نمونه‌های ساخته شده می‌توان اینگونه اظهار داشت که کامپوزیت تشکیل شده از ۵ لایه اینگرا به لحاظ اقتصادی و وارداتی بودن الیاف کولار، مقرون به صرفه‌تر از کامپوزیت تشکیل شده از ۵ لایه کولار خواهد بود و استفاده از آن در ساخت جاذب‌های انرژی توجیه اقتصادی دارد. به بیان دیگر، با توجه به گران بودن الیاف کولار و وارداتی بودن این الیاف، می‌توان میزان جذب انرژی در ۵ لایه‌های کولار/پوکسی را با استفاده از الیاف اینگرا بهبود داد.
- استفاده از الیاف اینگرا در نمونه کولار/پوکسی با پیکربندی IKIKI و KIKIKI سبب افزایش عملکرد

مکانیزم غالب خرابی در نمونه KIKIKI (شکل ۱۱) گسیختگی و به بیرون راندن الیاف از زمینه شده‌است. لازم به ذکر است، به علت قرارگیری الیاف اینگرا در وسط بینابین نمونه KIKIKI و با رسیدن پرتابه به لایه میانی (الیاف اینگرا) سبب کاهش سطح انرژی پرتابه و چرخش در سطح نمونه می‌شود که باعث ایجاد سطح مخروطی شکل در پشت نمونه شده‌است.

همچنین مکانیزم‌های خرابی رخ داده در نمونه هیبریدی IKIKI (شکل ۱۲) برای سطوح بالایی شامل: لهیدگی ماتریس و شکست الیاف و برای لایه‌های زیرین؛ گسیختگی الیاف به همراه بیرون زدن از زمینه است که در نهایت موجب جدایش بین لایه‌ای شده‌است.

با افزایش سرعت شلیک پرتابه (بالاتر از حد بالستیک) نمونه دیگر فرصت کافی برای انتقال موج تنش به اطراف محل برخورد در نمونه را ندارد و الیاف به سرعت دچار گسیختگی شده و پرتابه از سطح نمونه عبور و منجر به ایجاد سوراخ برشی در هیبریدهای IKIKI و KIKIKI شده‌است. سوراخ برشی ایجاد شده در اثر عبور پرتابه و افزایش سطح شکست در نمونه هیبریدی IKIKI نسبت به نمونه KIKIKI نشان‌دهنده کشش حداکثری الیاف اینگرا در جهت خروج پرتابه است؛ همچنین رشته رشته شدن الیاف اینگرا در حین پارگی، موجب افزایش عملکرد بالستیکی و مسدود کردن کامل سوراخ برشی شده است که افزایش عملکرد بالستیکی را برای نمونه IKIKI به همراه داشته است. در نمونه KIKIKI گسیختگی الیاف در جهت تار و بود متفاوت بوده و با عبور پرتابه، منجر به بیرون کشیدن

- قطر سوراخ برشی ایجاد شده در تمامی نمونه‌های مورد آزمایش، مقدار کمتری نسبت به قطر پرتابه را نشان می‌دهد (ناشی از نیروی الاستیک پسماند) به گونه‌ای که پس از خارج شدن پرتابه مخروطی شکل از سطح پشتی نمونه‌های ساخته شده، مجدد نمی‌توان پرتابه را از درون سوراخ ایجاد توسط همان پرتابه، به صورت دستی عبور داد.
- با نزدیک شدن سرعت پرتابه به سرعت حد بالستیک میزان کشیدگی الیاف در هیبریدهای کولار/اینگرا بیشتر خواهد شد و پس از کشیده شدن الیاف، پرتابه آن‌ها را پاره نمی‌کند.
- هنگامی که الیاف کولار در سطح بیرونی و به عنوان لایه اول در مقابل برخورد پرتابه سرمخروطی قرار می‌گیرد، مود لایه لایه شدن در اطراف محل برخورد نسبت به وقتی که الیاف اینگرا در سطح رویی قرار دارد، کاهش یافته است.
- در نمونه IKIKI اصطکاک بین الیاف بیشتر می‌شود و انحراف عرضی در محل ضربه بطور چشمگیری در مقایسه با چیدمان‌های دیگر زیاد شده و این افزایش انحراف، سبب جذب انرژی بیشتر با افزایش درگیری الیاف به همراه مساحت آسیب بیشتر و در نتیجه بهبود عملکرد بالستیکی برای این نمونه شده است.

### مراجع

- [1] Shanazari, H., Liaghat, G. H., Hadavinia, H., & Aboutorabi, A. (2017). Analytical investigation of high-velocity impact on hybrid unidirectional/woven composite panels. *J. Thermoplastic Compo. Mat.*, 30(4), 545-563.
- [2] Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112-121.
- [3] Karger-Kocsis, J. (Ed.). (2012). *Polypropylene structure, blends and composites: Volume 3 composites*. Springer Science & Business Media.
- [4] Swolfs, Y., Gorbatick, L., & Verpoest, I. (2014). Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 67, 181-200.
- [5] Dorey, G., Sidey, G. R., & Hutchings, J. (1978). Impact properties of carbon fibre/Kevlar 49 fibre hybrid composites. *Composites*, 9(1), 25-32.

- بالستیکی نسبت به نمونه منفرد الیاف کولار شده است
- بیشترین مقدار جذب انرژی نسبت به وزن مربوط به نمونه KIKIK و پس از آن نمونه با پیکربندی IKIKI است که به ترتیب مقادیر ۳/۲۳ و ۲/۴۶ ژول بر گرم را به خود اختصاص داده‌اند.
- بیشترین مقدار جذب انرژی نسبت به ضخامت مربوط به نمونه با پیکربندی KIKIK بوده است که مقدار آن برابر ۱۲/۸۴ ژول بر میلیمتر است.
- افت سرعت در پرتابه برای نمونه KIKII نسبت به نمونه IKIKI مقدار کمتری را نشان داد. به عبارت دیگر، هنگامی که الیاف اینگرا در لایه اول قرار می‌گیرد، موجب افت حداکثری در سرعت پسماند پرتابه پس از عبور شده است.
- در نمونه تمام کولار/اپوکسی و نمونه KIKIK به دلیل نازک بودن نمونه، تغییر شکل غشایی بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی اینگرا مشاهده شد و بیشترین سهم در جذب پرتابه، مربوط به خمش و کشش غشایی لایه‌ها است و باقی مانده‌ی انرژی جذب شده به شکست الیاف و شکست برشی لایه‌های تشکیل‌دهنده مربوط می‌شود.
- در نمونه‌هایی که الیاف اینگرا در لایه اول و آخر قرار دارد، تحمل فشار نسبت به کشش برای نمونه بیشتر است و موج تنش بعد از رسیدن به لایه آخر و هنگام خروج پرتابه، از نوع کششی است که سبب بیرون کشیدن الیاف و پدیده گلبرگ‌زنی در نمونه IKIKI شده است.
- اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک بین پرتابه و الیاف و اصطکاک بین لایه‌ای در نمونه هیبریدی با پیکربندی IKIKI بهتر از نمونه هیبریدی با پیکربندی KIKIK عمل کرده است.
- میزان آسیب و به هم‌ریختگی سطحی در الیاف و زمینه، در لایه اول بیشینه مقدار را دارد و با رسیدن به لایه‌های زیرین، این کرنش به حداقل می‌رسد که در نمونه‌هایی که الیاف کولار در سطح بالایی قرار داشته‌اند؛ اختلاف کرنش حداقل بوده است.

- equations. *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(6), 3657-3672.
- [19] Amirian, A., Rahmani, H., & Moeinkhah, H. (2022). An experimental and numerical study of epoxy-based Kevlar-basalt hybrid composites under high velocity impact. *J. Indust. Textiles*, 51(1\_suppl), 804S-821S.
- [20] Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Abdullah, N., Aisyah, H. A., Rafiqah, S. A., ... & Sapuan, S. M. (2021). A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications. *Polymers*, 13(4), 646.
- [21] Liu, A., Chen, Y., Hu, J., Wang, B., & Ma, L. (2022). Low-velocity impact damage and compression after impact behavior of CF/PEEK thermoplastic composite laminates. *Polymer Composites*, 43(11), 8136-8151.
- [22] Andrew, J. J., Srinivasan, S. M., Arockiarajan, A., & Dhakal, H. N. (2019). Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review. *Composite Structures*, 224, 111007.
- [23] Ramasamy, M., Daniel, A. A., Nithya, M., Kumar, S. S., & Pugazhenti, R. (2021). Characterization of natural-Synthetic fiber reinforced epoxy based composite-Hybridization of kenaf fiber and kevlar fiber. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1699-1705.
- [24] Stopforth, R., & Adali, S. (2019). Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles. *Defence Technology*, 15(2), 186-192.
- [25] Babaei, H., Jamali, A., Mirzababaie Mostofi, T., & Ashraf Talesh, H. (2016). Experimental Study and Mathematical Modeling of Deformation of Rectangular Plates under the Impact Load. *J. Solid and Fluid Mech.*, 6(1), 143-152.
- [26] Keane, M. P., Lingenfelter, A. J., Walker, M., & Hill, R. R. (2020). Ballistic Limit Shot Dependency Testing in Composite Materials. In *AIAA Scitech 2020 Forum* (p. 1218).
- [27] Gholizadeh, S. (2019). A review of impact behaviour in composite materials. *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, 7(3), 2320-2092.
- [28] Zal, V., Moslemi Naeini, H., Bahramian, A. R., Behraves, A. H., & Abbaszadeh, B. (2018). Investigation and analysis of glass fabric/PVC composite laminates processing parameters. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(3), 529-540.
- [29] Zimmermann, N., & Wang, P. H. (2020). A review of failure modes and fracture analysis of aircraft composite materials. *Engineering failure analysis*, 115, 104692.
- [6] Briscoe, B. J., & Motamedi, F. (1992). The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: the influence of interface friction. *Wear*, 158(1-2), 229-247.
- [7] Rebouillat, S. (1998). Tribological properties of woven para-aramid fabrics and their constituent yarns. *J. Mat. Sci.*, 33(13), 3293-3301.
- [8] Cheeseman, B. A., & Bogetti, T. A. (2003). Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Composite structures*, 61(1-2), 161-173.
- [9] Da Silva Junior, J. E. L., Paciornik, S., & d'Almeida, J. R. M. (2004). Evaluation of the effect of the ballistic damaged area on the residual impact strength and tensile stiffness of glass-fabric composite materials. *Composite Structures*, 64(1), 123-127.
- [10] Zeng, X. S., Tan, V. B. C., & Shim, V. P. W. (2006). Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour. *Int. J. Numerical Methods Eng.*, 66(8), 1309-1330.
- [11] Dong, Z., & Sun, C. T. (2009). Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 40(12), 1863-1869.
- [12] Chen, W., Qian, X. M., He, X. Q., Liu, Z. Y., & Liu, J. P. (2012). Surface modification of Kevlar by grafting carbon nanotubes. *J. Appl. Polym. Sci.*, 123(4), 1983-1990.
- [13] Pirmohammad, N., Liaght, G. H., & Pol, M. H. (2014). Experimental investigation on ballistic behavior of sandwich panels made of honeycomb core. *Modares Mechanical Engineering*, 14(4), 21-26.
- [14] Bandaru, A. K., Vetiyatil, L., & Ahmad, S. (2015). The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of hybrid composite armors. *Composites Part B: Engineering*, 76, 300-319.
- [15] Bandaru, A. K., Patel, S., Sachan, Y., Ahmad, S., Alagirusamy, R., & Bhatnagar, N. (2016). Mechanical behavior of Kevlar/basalt reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 642-652.
- [16] Yang, Y., & Chen, X. (2017). Investigation of energy absorption mechanisms in a soft armor panel under ballistic impact. *Textile Research Journal*, 87(20), 2475-2486.
- [17] Wang, D., Ju, Y., Shen, H., & Xu, L. (2019). Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. *Construction and Building Materials*, 197, 464-473.
- [18] Asemiani, S. S., Liaghat, G., Ahmadi, H., Anani, Y., & Khodadadi, A. (2021). Comparison of penetration process of 2-layer elastomeric composite with thermoset composite using energy absorption