مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۲۰/ شماره ۱/ صفحه ۱۲۵-۱۴۱

نشریه علمی مکانیک هوافضا

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.1.8.0

بررسی تجربی نفوذ پرتابه با سرعت‌بالا در کامپوزیت ساخته‌شده از پارچه اینگرا

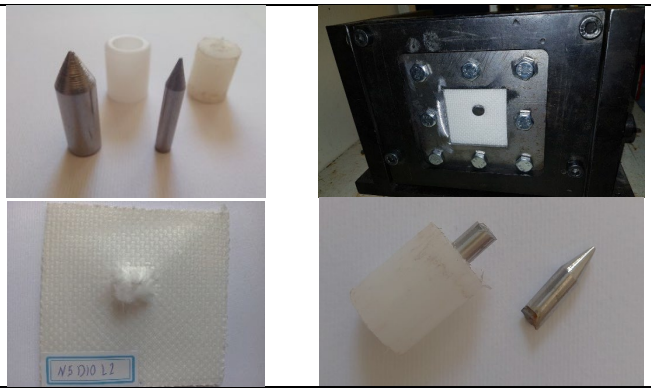
سعید شعبانی نودهی[۱]، سیدروح‌الله کاظمی[۲*]، مجتبی ضیاءشمامی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[۲] استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

[۲] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- سرعت حد بالستیک برای کامپوزیت اینگرا دو و چهار لایه با پرتابه مخروطی به قطر ۱۰ میلی‌متر به ترتیب ۵۴ و ۸۲ متر برثانیه است.
- میزان جذب انرژی با پرتابه مخروطی به جرم ۱۵/۱ گرم برای کامپوزیت اینگرا دو و چهار لایه به ترتیب ۲۷/۳۳ و ۴۸/۷۰ ژول می‌باشد.

چکیده

مقاومت در برابر نفوذ پرتابه با سرعت‌بالا یک نیاز کلیدی برای سازه‌ها با کارایی پیشرفته است. در این پژوهش به بررسی رفتار تجربی کامپوزیت ساخته‌شده از پارچه اینگرا تحت ضربه با سرعت‌بالا خواهیم پرداخت. نمونه‌ها به روش اینفیوژن خلأ با استفاده از پارچه اینگرا که یک پارچه بافته‌شده از جنس الیاف پلی‌پروپیلن با مدول بالا می‌باشد به‌عنوان تقویت‌کننده و اپوکسی به‌عنوان ماتریس ساخته‌شده و تحت آزمایش ضربه با سرعت‌بالا توسط تفنگ گازی قرار می‌گیرند. در مقاله حاضر عملکرد بالستیکی کامپوزیت‌های دو و چهارلایه تحت پرتابه با قطرهای مختلف ۵ و ۱۰ میلی‌متر بررسی‌شده و تأثیر قطر پرتابه و سابوت موردمطالعه قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها برای کامپوزیت دو و چهار لایه در محدوده سرعت۳۰ تا ۱۶۰ متر بر ثانیه انجام‌شده است. همچنین سرعت پسماند پرتابه، سرعت حد بالستیک، مقدار جذب انرژی جهت سوراخ شدن کامپوزیت و میزان آسیب بررسی‌شده است. نتایج به‌دست‌آمده عملکرد بالستیکی مناسب کامپوزیت اینگرا-اپوکسی در مقایسه با کامپوزیتی نظیر کولار- اپوکسی را نشان می‌دهد. حد بالستیک با استفاده از آزمایش تجربی کامپوزیت دو لایه با پرتابه مخروطی نوک‌تیز به قطر ۱۰ میلی‌متر ۵۴ متر بر ثانیه و برای کامپوزیت چهار لایه با ۵۲٪ افزایش برابر ۸۲ متر بر ثانیه می‌باشد و میزان جذب انرژی برای کامپوزیت دولایه ۲۷/۳۳ ژول و کامپوزیت اینگرا اپوکسی چهار لایه با ۷۸٪ افزایش ۴۸/۷۰ ژول می‌باشد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

*نویسنده مسئول:

kazemi@guilan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

نفوذ پرتابه با سرعت‌بالا

حد بالستیک

کامپوزیت بافته‌شده اینگرا-اپوکسی

اینفیوژن خلأ

جذب انرژی

* حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه جامع امام حسین (ع) داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (License Commons Creative) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://maj.ihu.ac.ir دیدن فرمائید.

۱- مقدمه

مواد کامپوزیت به دلیل ویژگی‌های مکانیکی برتر ذاتی خود مانند استحکام ویژه و سختی بالا، به‌طور گسترده در صنایع مانند هوافضا، عمران و زره‌های حفاظتی کاربرد دارند [۱ و ۲]. مطالعه ضربه، آسیب و نفوذ در کامپوزیت‌های برای بسیاری از کاربردهای صنعتی، خودروسازی، هوافضا و دفاعی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای نمونه، زره انعطاف‌پذیر یا نرم برای محافظت از بدن در برابر آسیب‌های بالستیک بدون محدودیت قابل‌توجهی در تحرک پوشنده استفاده می‌شود. پارچه‌های بافته‌شده با کارایی بالا مواد اصلی در طراحی‌های مدرن زره‌های نرم می‌باشد. جذب انرژی و مقاومت بالستیک این‌گونه مواد به‌طور گسترده از طریق آزمایش موردبررسی قرار می‌گیرد [۳]. پارچه‌های بافته‌شده با کارایی بالا مانند پاراآرامید (کولار، توارون)، پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا (اسپکترا، داینما) و پارچه‌های پلی‌پروپیلن با مدول بالا (اینگرا) باوجود چگالی کم، استحکام و جذب انرژی بالا، درزمانی که به تعداد لایه زیاد پارچه نیاز است (تقریباً ۲۰ تا ۵۰ لایه در ساخت زره‌های معمولی) به‌ویژه برای اهدافی شامل حفاظت شخصی و سازه‌ها سبک در صنایع هوایی کاربرد گسترده دارند [۴]. مطالعه رفتار بالستیک کامپوزیت‌ها عمدتاً بر مواردی همچون سرعت حد بالستیک، سرعت باقیمانده، میزان جذب انرژی و حالت‌های شکست متمرکز است. سه روش اصلی این مطالعات شامل بررسی تجربی، تحلیلی و شبیه‌سازی عددی است. مطالعه تجربی یکی از روش‌های اصلی در مطالعه ضربه با سرعت‌بالا می‌باشد، زیرا نه‌تنها به فرآیند فیزیکی واقعی نزدیک‌تر است، بلکه پایه سایر روش‌ها نیز می‌باشد [۵].

خدادادی و همکاران در ابتدا به تحلیل نفوذ در پارچه کولار و عوامل مؤثر بر عملکرد مکانیکی این پارچه شامل خواص ماده و هندسه پرتابه، شرایط مرزی و ابعاد و تعداد لایه پارچه و اصطکاک پرداختند. حد بالستیک پارچه دو لایه تحت نفوذ پرتابه سر کروی و سر تخت به ترتیب ۳۶ متر بر ثانیه و ۲۰ متر بر ثانیه و برای پارچه چهار لایه تحت ضربه با پرتابه سر کروی ۴۶ متر بر ثانیه گزارش شد [۶]. سپس به تحلیل عملکرد بالستیکی کامپوزیت ساخته‌شده از پارچه کولار و رزین اپوکسی در برابر نفوذ پرتابه با سرعت‌بالا پرداختند. نمونه‌ها به تعداد پنج عدد کامپوزیت دو لایه و پنج عدد کامپوزیت چهار لایه به روش لایه‌گذاری دستی ساخته و تحت ضربه با سرعت‌بالا با پرتابه استوانه‌ای سر کروی قرار گرفت. حد بالستیک برای نمونه دو و چهار لایه به ترتیب ۳۰ و ۴۰ متر بر ثانیه به دست آمد [۷].

برسیانی و همکاران به بررسی رفتار نفوذ بالستیک پرتابه سر تخت از جنس تنگستن بر روی پارچه‌های بافته ساده کولار با ماتریس اپوکسی به ضخامت‌های ۵ و ۱۰ میلی‌متر پرداختند. حد بالستیک برای نمونه به ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته‌شده از ۱۲ لایه پارچه کولار برابر ۱۴۳ متر بر ثانیه و برای نمونه به ضخامت ۱۰ میلی‌متر متشکل از ۲۴ لایه کولار برابر ۱۷۶ متر بر ثانیه محاسبه شد [۸]. زارعی و همکاران به بررسی عملکرد کامپوزیت الیاف پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا در برابر پرتابه با سرعت‌بالا پرداختند، شش نمونه پنل کامپوزیتی پلی‌اتیلن با جرم مولکولی بالا با تعداد ۲۰ و ۴۵ لایه به ضخامت ۳ میلی‌متر و ۶/۷۵ میلی‌متر ساخته‌شده و تحت برخورد پرتابه مخروطی نوک‌تیز با سرعت‌های مختلف قرار گرفت و حد بالستیک برای نمونه ۲۰ لایه‌ای حدود ۵۰ متر بر ثانیه و برای نمونه ۴۵ لایه‌ای ۱۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد [۹]. وانگ و همکاران به بررسی اثرات صلبیت ماتریس در فرآیند نفوذ پرتابه با سرعت‌بالا بر کامپوزیت‌های پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا پرداختند. نمونه‌های کامپوزیت نساجی از یک پارچه ساده (شامل الیاف اسپکترا) و چهار نوع ماده ماتریس مختلف تولید شدند. آزمایش‌های ضربه‌ای با سرعت‌بالا با پرتاب یک پرتابه فولادی کروی برای ضربه زدن به نمونه‌های آماده‌شده از طریق یک تفنگ گازی انجام شد. کامپوزیت‌های با ماتریس انعطاف‌پذیر همیشه مقاومت بالاتر اما تغییرشکل بزرگ‌تری نسبت به همتایان ماتریس صلب در محدوده ضخامت و سرعت آزمایش‌شده داشتند [۱۰]. آسمانی و همکاران به بررسی رفتار بالستیکی کامپوزیت ساخته‌شده از پارچه کولار و ماتریس الاستومتر پرداختند. نمونه‌ها به‌صورت کامپوزیت دو و چهار لایه به ضخامت یک و دو میلی‌متر ساخته و تحت ضربه با سرعت‌بالا توسط تفنگ گازی با پرتابه استوانه‌ای سر کروی قرار گرفت. الاستومر نقش مهمی در انتقال انرژی

جنبشی پرتابه و موج ضربه‌ای آن به هدف دارد. وجود الاستومر نه‌تنها از تغییرشکل پارچه جلوگیری می‌کرد، بلکه باعث می‌شد پارچه حداکثر کشش خود را تجربه کند و انرژی بیشتری جذب کند. سرعت حد بالستیک برای کامپوزیت کولار/ الاستومتر دو و چهار لایه به ترتیب ۶۴ و ۱۲۲ متر بر ثانیه گزارش شد [۱۱ و ۱۲]. حسن‌زاده و همکاران به بررسی عملکرد پارچه‌های پلی‌پروپیلن با مدول بالا (اینگرا) آغشته به سیال‌های غلیظ شونده برشی در ضربه با سرعت‌بالا با پرتابه به شکل اوجایو پرداختند. استفاده از سیال ضخیم کننده برشی موجب بهبود خواص بالستیک و مقاومت در برابر سوراخ شدن در پارچه بافته‌شده آغشته به سیال‌های غلیظ شونده برشی شد [۱۳]. بودیا و همکاران به توسعه کلاه ایمنی با استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن و رزین الیم و الیاف هیبریدی پلی‌پروپیلن و کربن با رزین الیم پرداختند و نتایج را با کلاه ایمنی پرکاربرد پلی‌کربنات مقایسه نمودند. مکانیسم‌های شکست و جذب انرژی برای نمونه‌ها موردمطالعه قرار گرفت و مشخص شد کلاه‌های ایمنی ساخته‌شده از الیاف اینگرا تا ۶۵ درصد انرژی جذب‌شده را نشان می‌دهند درحالی‌که این رقم برای نمونه پلی کربنات ۱۳ درصد می‌باشد، همچنین که استفاده از نمونه اینگرا احتمال آسیب را تا ۴۰ درصد و نمونه هیبریدی تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهد [۱۴]. رحمانی و همکاران به بررسی تأثیر افزودن نانولوله‌های کربنی بر رفتار بالستیکی چندلایه‌های الیافی-فلزی به‌صورت تجربی پرداختند، آزمایش ضربه با استفاده از پرتابه استوانه‌ای سر مخروطی انجام شد و نشان داده شد که افزودن نانولوله کربنی تأثیر مستقیمی بر افزایش سرعت حد بالستیک دارد [۱۵].

در زمینه تأثیر ضربه با سرعت کم، ابراهیمی و همکاران به بررسی پاسخ غیرخطی ضربه سرعت‌پایین ورق کامپوزیتی چندلایه تقویت‌شده با فیبر کربن و نانولوله‌های کربنی در محیط حرارتی رطوبتی پرداختند. با افزودن مقدار کم نانولوله کربنی به کامپوزیت تقویت‌شده با فیبر کربن، بیشینه نیروی تماس افزایش و مقدار نفوذ و مدت‌زمان تماس کاهش می‌یابد همچنین افزایش دما و رطوبت، بیشینه نیرو تماس، میزان نفوذ ضربه زننده در ورق و مدت‌زمان تماس کاهش پیدا می‌کند [۱۶]. موسی زاده و همکاران به بررسی اثر تقویت‌کننده‌های با مقطع عرضی مختلف روی ورق‌های فولادی مسطح و منحنی تحت ضربه با سرعت‌پایین ناشی از سقوط آزاد وزنه پرداختند و نشان دادند که انحنا باعث کاهش شتاب ضربه، افزایش تغییرشکل ماندگار و جذب انرژی می‌شود و تقویت‌کننده‌های استوانه‌ای از عملکرد بهتری نسبت به دیگر جاذب‌ها برخوردار است [۱۷]، همچنین استفاده از تقویت‌کننده باعث افزایش جزئی در شتاب ورق و کاهش قابل‌توجه تغییرشکل دائمی آن می‌شود. مقدار انرژی جذب‌شده توسط ورق‌های تقویت‌شده کمی کمتر از ورق‌های ساده است [۱۸ و ۱۹].

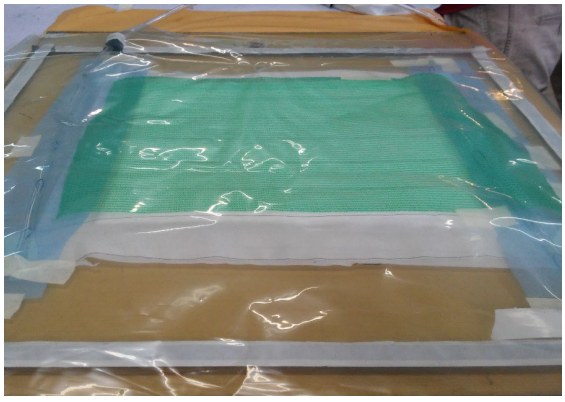
الیاف اینگرا توسط شرکت مواد پیشرفته اینگرا در گرین‌ویل کالیفرنیا جنوبی توسعه یافت و تولید تجاری این نوع الیاف از سال ۲۰۰۹ آغاز شد. الیاف اینگرا از جنس پلی‌پروپیلن با مدول بالا است، این نوع الیاف با توجه به ویژگی‌هایی همچون چگالی و خزش کم، آب‌گریز بودن، خواص عالی دی‌الکتریک، مقاومت در برابر ضربه، تحمل آسیب بالا، پایداری شیمیایی و قابلیت بازیافت می‌توانند در صنایع گوناگونی همچون هوافضا، صنایع خودرو، صنایع نظامی و دریایی کاربرد گسترده‌ای داشته باشد. تحقیقات انجام‌شده بر روی کامپوزیت ساخته‌شده از پارچه اینگرا در بحث ضربه و نفوذ اندک است و آزمایش تعیین سرعت حد بالستیک برای این نوع کامپوزیت احتمالاً به دلایلی همچون جدید بودن محصول و میزان دسترسی انجام‌نشده است، در تحقیق حاضر به بررسی تجربی رفتار بالستیکی کامپوزیت ساخته‌شده از پارچه اینگرا و رزین اپوکسی به روش اینفیوژن خلأ پرداخته‌شده است. این مطالعه با استفاده از پرتابه با قطرهای مختلف و همچنین کامپوزیت دو و چهار لایه انجام‌گرفته و سرعت حد بالستیک، میزان جذب انرژی و میزان خسارت اندازه‌گیری می‌شود. همچنین با توجه به چگالی پایین پارچه اینگرا، خاصیت رادار گریزی و خواص بالستیکی مناسب می‌تواند جایگزین مناسبی برای ساخت زره‌های محافظتی سبک باشد.

۲- ساخت

برای ساخت ماده مرکب می‌توان از تکنیک‌های مختلفی همچون قالب‌گیری تماس باز، تزریق رزین، قالب‌گیری

فشاری، قالب‌گیری تزریقی، فرآیند رشته پیچی، پالتروژن، استفاده نمود. انتخاب روش ساخت برای یک نمونه ماده مرکب به نوع ماده، طراحی قطعه، عملکرد، کاربرد و استفاده نهایی آن بستگی دارد. در این تحقیق، نمونه مواد مرکب به روش اینفیوژن خلأ ساخته‌شده است، در این روش میزان حفره هوا در محصول نهایی بسیار کم بوده و کامپوزیت ساخته‌شده دارای خواص مکانیکی مناسب می‌باشد. برای ساخت از پارچه اینگرا به‌عنوان تقویت‌کننده و رزین با ترکیب اپوکسی و هاردنر به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۵ طبق استاندارد سازنده استفاده می‌شود. قالبی که عملیات ساخت روی آن انجام می‌شود، شیشه سکوریت مسطح با ضخامت بالا می‌باشد. در مرحله اول جهت تمیز نمودن و ایجاد سطحی صاف و یکدست در سطح این قالب از حلال مناسب مانند تینر لوساید ۲۰۰۰۰ استفاده می‌شود. سپس جهت پرداخت سطح برای شروع فرآیند ساخت طی دو مرحله قالب واکس‌زده می‌شود. در مرحله اول به مدت ۱۰ دقیقه واکس با قابلیت پرداخت بالا و ذرات ریز اعمال می‌شود و سپس واکس جداکننده به‌وسیله پنبه روی سطح قالب انجام می‌شود. برای درزبندی بهتر و جلوگیری از چسبندگی قطعه به سطح قالب، یک لایه نایلون مایع با ضخامت ناچیز در حد میکرون به‌عنوان فیلم جداکننده روی سطح شیشه ریخته می‌شود. مدت زمان لازم برای خشک شدن این لایه نایلونی که تمام سطح شیشه را پوشش می‌دهد، حدود ۳۰ تا ۴۰ دقیقه است. سپس خمیر درزگیری یا سیل در اطراف محل قرارگیری پارچه قرار داده می‌شود.

به‌منظور لایه‌چینی برای ساخت، ابتدا یک لایه داکرون و سپس پارچه اینگرا روی سطح قالب قرار می‌گیرند، برای ایجاد تعداد لایه بیشتر لایه‌گذاری با پارچه اینگرا تکرار می‌شود. برای ساخت قطعات موردنظر، این روند دو و چهار بار برای ماده مرکب دو لایه و چهار لایه تکرار می‌شود. در انتها نیز یک لایه داکرون بر روی نمونه قرار می‌گیرد. وجود لایه داکرون بالایی و پایینی به جهت جمع‌آوری رزین اضافی از روی سطح پارچه و همچنین ایجاد فشار متعادل و یکنواخت روی لایه‌های اینگرا هنگام ایجاد خلأ می‌باشد. سپس یک لایه مش اینفیوژن بر روی نمونه قرار می‌گیرد که هدف آن، هدایت رزین و انتقال حباب‌های خروجی هوا در زمان ایجاد خلأ و همچنین روان‌سازی رزین روی سطح قالب است. در انتها، برای ایجاد خلأ و همچنین تزریق رزین، مجراهای موردنظر در دو طرف نمونه قرار می‌گیرند و سپس کل قالب توسط نایلون وکیوم پوشیده شده و توسط خمیر درزگیر مطابق با شکل **۱** ثابت می‌شود. در مرحله اول شیر مجرای رزین بسته‌شده و مجرای وکیوم توسط کمپرسور بازشده تا خلأ موردنظر ایجاد شود. پس‌ازاینکه فشار به کمتر از ۰/۲ بار رسید، شیر مربوط به وکیوم از سوی کمپرسور بسته می‌شود تا گیج فقط میزان خلأ قطعه کار را نشان دهد. پس از ۵ تا ۱۰ دقیقه گیج دوباره بررسی‌شده تا میزان خلأ افت نداشته باشد. در صورت کاهش میزان خلأ باید درزبندی نمونه دوباره بررسی شود. سپس شیر مجرای رزین بازشده تا رزین وارد قالب شود. پس از تزریق نمونه به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) قرار می‌گیرد و سپس بر اساس استاندارد سازنده رزین و هاردنر در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۲ ساعت پخته می‌شود و در انتها کامپوزیت ساخته‌شده برای تست ضربه به ابعاد ۷ در ۷ سانتی‌متر برش داده می‌شود.



شکل (۱): ساخت نمونه به روش اینفیوژن خلأ.

جدول (۱): ویژگی‌های فیزیکی رزین و هاردنر.

جز	کد	رنگ	درصد ترکیب
رزین	ERR 1080	زرد روشن	۱۰۰ گرم
هاردنر	ERR 1080	آبی روشن	۱۵ گرم

۳- تست ضربه سرعت‌بالا

برای شلیک پرتابه‌ها به سمت هدف با سرعت‌بالا از سیستم تفنگ گازی استفاده می‌شود، تفنگ گازی اساساً از یک

مخزن فشارقوی، یک لوله استوانه‌ای و یک مخزن ایمنی ساخته‌شده است.

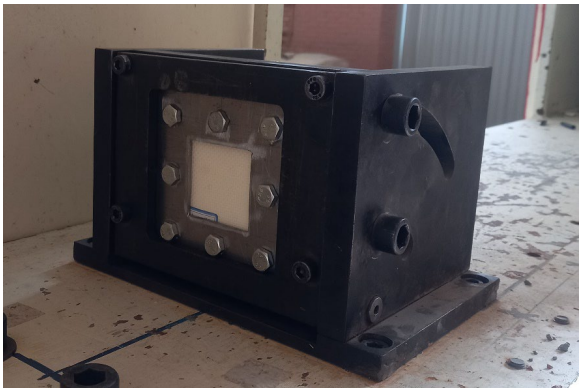
در شکل **۲** سیستم تفنگ گازی دانشگاه امام حسین (ع) که برای تست ضربه از آن استفاده شد، نشان داده‌شده است.

سرعت ورودی با استفاده از فشار مخزن نیتروژن تنظیم‌شده و سپس پرتابه که در یک سابوت محصورشده با باز شدن شیر سلونوئیدی مطابق با فشار ذخیره‌شده پشت آن، شلیک می‌شود. به دلیل ابعاد صفحات کامپوزیتی هدف، یک نگه‌دارنده میانی از جنس فولاد به ابعاد خارجی ۱۴ در ۱۴ سانتی‌متر و حفره مربعی داخلی به ضلع ۵ سانتی‌متر ساخته‌شده تا ابتدا هدف در نگه‌دارنده میانی جاسازی‌شده و سپس در موقعیت نگه‌دارنده اصلی مطابق (شکل **۳**) قرار گیرد. سرعت پیش از برخورد با استفاده از سنسور که در انتهای لوله استوانه‌ای نصب‌شده (شکل **۴**) محاسبه‌شده و خروج پرتابه از هدف توسط دوربین با سرعت‌بالا فیلم‌برداری می‌شود. سرعت پس از برخورد نیز با پردازش تصویر برحسب میزان جابه‌جایی تقسیم بر مدت زمان بر اساس تعداد فریم برداشت‌شده (مطابق شکل **۵**) تخمین زده می‌شود.

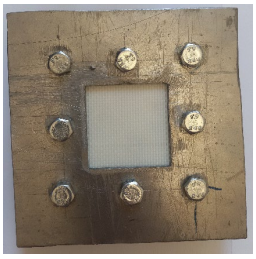
۳-۱- پرتابه به قطر ۵ میلی‌متر

در مرحله اول ضربه با پرتابه مخروطی از جنس فولاد ابزار با زاویه ۶۰ درجه وارد شد. پرتابه‌ها با استفاده از فرآیند تراشکاری سمبه برش HWS ساخته شدند. این نوع سنبه برش ساخت کشور ایتالیا بوده و دارای سختی ۶۰-۶۲ راکول می‌باشد. فولاد ابزار استفاده‌شده جزو سنبه‌های بسیار مقاوم با درصد کروم بالای ۱۲ درصد است. مشخصات ابعادی پرتابه و سابوت در جدول **۲** آورده شده است. پرتابه و سابوت مطابق شکل **۶** ساخته شد و تست با سرعت ۵۷ تا ۲۳۷ متر بر ثانیه روی کامپوزیت اینگرای چهار لایه اجرا گردید. نتایج تست ضربه در جدول **۳** آورده شده است. بر اساس جدول **۳**، پرتابه در سرعت‌پایین از سابوت خارج نشده (شکل **۷**) و در سرعت‌های بالاتر (شکل **۸**) پرتابه دچار شکست می‌شود. جهت جلوگیری از شکست پرتابه جنس پرتابه مرحله اول تغییر کرد و فولاد 100Cr6 به‌عنوان پرتابه مورداستفاده قرار گرفت. در جدول **۴** ویژگی مکانیکی این نوع فولاد و در جدول **۵** مشخصات ابعادی پرتابه و سابوت آورده شده است. فولاد 100Cr6 همان فولاد بلبرینگ که در استاندارد DIN به اسم فولاد ۱.۳۵۰۵ معرفی می‌گردد و جزو فولادهای آلیاژی یاتاقان می‌باشد.

شکل (۲): دستگاه تفنگ گازی برای تست ضربه.



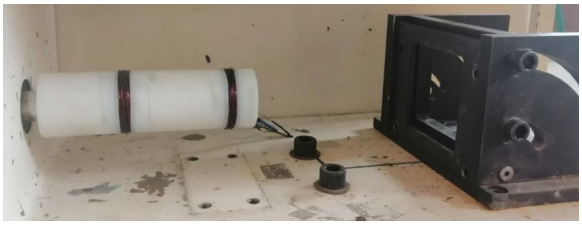
(الف)



(ب)

(ج)

شکل (۳): نگه‌دارنده میانی و نگه‌دارنده اصلی دستگاه: الف) نمای روبرو؛ ب) نگه‌دارنده میانی؛ ج) نمای پشت.

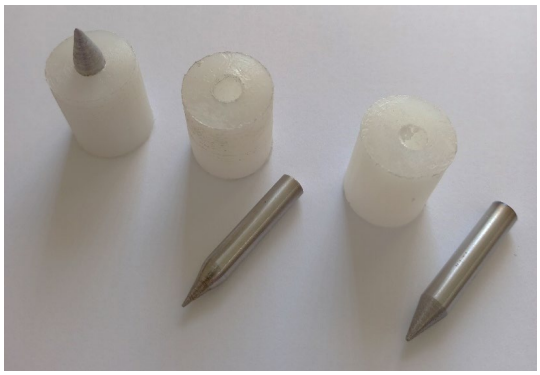


شکل (۴): موقعیت قرارگیری نگه‌دارنده و سنسور محاسبه سرعت ورودی در انتها لوله تفنگ گازی.

(الف)

(ب)

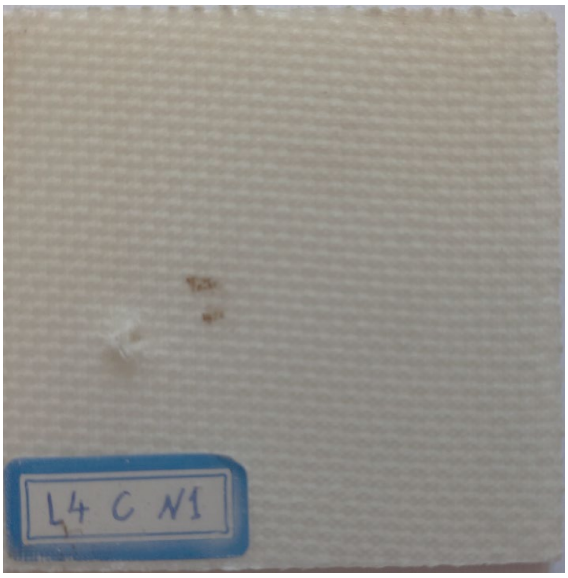
شکل (۵): نتایج تست ضربه با سرعت ۶۷ متر بر ثانیه کامپوزیت دولایه و پرتابه مخروطی به قطر ۱۰ میلی‌متر. الف) لحظه ورود گلوله به شاخص ، ب) ۰/۰۱۲ ثانیه پس از لحظه ورود به شاخص.



شکل(۶): پرتابه به قطر ۵ میلی‌متر و سابوت مورداستفاده.

جدول (۲): مشخصات ابعادی پرتابه HWS به قطر ۵ میلی‌متر.

طول پرتابه (cm)	جرم پرتابه (gr)	طول سابوت (cm)	جرم سابوت (gr)
۳	۳/۷۵	۲	۴/۵۵



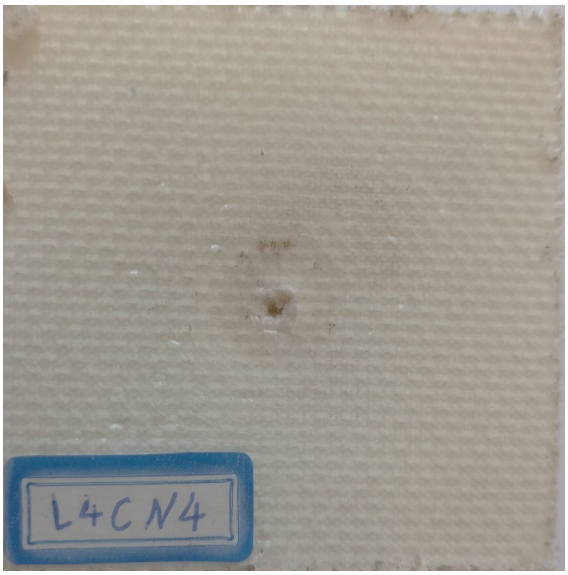
(الف)

(ب)

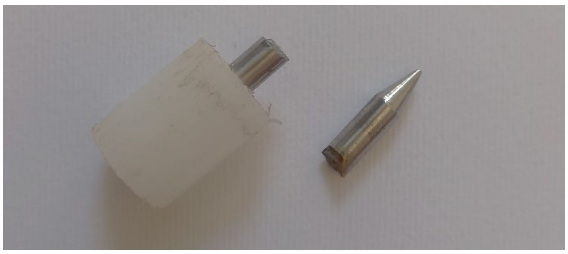
شکل (۷): نتایج تست ضربه با سرعت ۵۷ متر بر ثانیه کامپوزیت چهار لایه و پرتابه مخروطی به قطر ۵ میلی‌متر: الف) هدف؛ ب) پرتابه و سابوت.

جدول (۳): تست ضربه با سرعت‌بالا/ پرتابه: مخروطی HWS به قطر ۵ میلی‌متر/ هدف: اینگرا چهار لایه/ سابوت: ۲ سانتی‌متر.

شماره آزمایش	سرعت ورودی $(\frac{m}{s})$	وضعیت
L4CN1	۵۷	عدم نفوذ بر کامپوزیت/جدا نشدن پرتابه از سابوت
L4CN2	۱۰۳	عدم عبور / شکست پرتابه
L4CN3	۱۹۵	عدم عبور / شکست پرتابه
L4CN4	۲۳۷	عدم عبور / شکست پرتابه



(الف)



(ب)

شکل (۸): نتایج تست ضربه با سرعت ۲۳۷ متر بر ثانیه کامپوزیت چهار لایه و پرتابه مخروطی به قطر ۵ میلی‌متر: الف) هدف؛ ب) پرتابه و سابوت.

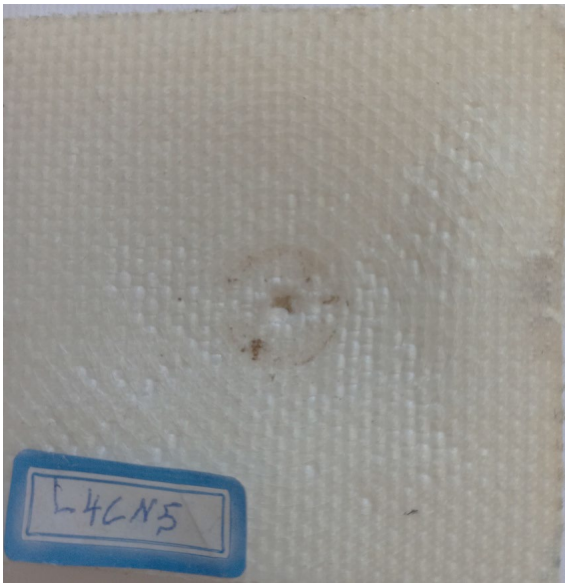
جدول (۴): ویژگی‌های مکانیکی فولاد بلبرینگ.

مقاومت کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	سختی بریتل (HB)
۶۹۰-۶۰۰	۱۹۰	۲۱۰-۱۸۰

جدول (۵): مشخصات ابعادی پرتابه فولاد بلبرینگ به قطر ۵ میلی‌متر.

طول پرتابه (cm)	جرم پرتابه (gr)	طول سابوت (cm)	جرم سابوت (gr)
۳	۴/۴۵	۲	۴/۵۵

این فولاد دارای عناصری مانند کربن و کروم با مقدار بیشتر و همچنین عناصر دیگری مانند سیلیسیوم و منگنز با مقدار کمتر می‌باشد که باعث ویژه و مقاوم بودن این فولاد شده است. در شکل **۹** نتیجه استفاده از این نوع پرتابه نشان داده‌شده است. نتایج حاصله پس از برخورد پرتابه با هدف مطابق جدول **۶** تفاوت چندانی با پرتابه از جنس HWS نداشت و مجدداً پرتابه دچار شکست می‌شد.



(الف)

(ب)

شکل (۹): نتایج تست ضربه با سرعت ۲۲۳ متر بر ثانیه کامپوزیت چهار لایه و پرتابه به قطر ۵ میلی‌متر: الف) هدف؛ ب) پرتابه و سابوت.

جدول (۶): تست ضربه با سرعت‌بالا/ پرتابه: فولاد 100Cr6 به قطر ۵ میلی‌متر/ هدف: اینگرا چهار لایه/ سابوت: ۲ سانتی‌متر

شماره آزمایش	سرعت ورودی $(\frac{m}{s})$	وضعیت
L4CN5	۲۲۳	عدم عبور پرتابه / شکست پرتابه
L4CN6	۲۴۰	عدم عبور پرتابه / شکست پرتابه

سپس تلاش شد با کوچک کردن طول سابوت به‌اندازهٔ ۱/۵ سانتی‌متر مطابق شکل **۱۰**، تأثیرات آن کاهش یابد درنتیجه جرم سابوت به ۳/۴۱ گرم کاهش یافت. در جدول **۷** نتایج استفاده از سابوت با طول کم‌تر آورده شده است، در این حالت نیز با افزایش سرعت، مجدداً پرتابه پس از برخورد با هدف دچار شکست شد. برای کامپوزیت چهار لایه تست ضربه با سرعت‌بالا در محدوده سرعت ۳۱ تا ۱۵۲ متر بر ثانیه انجام گرفت، در تمام تست‌ها پرتابه بدون تغییرشکل و صلب باقی‌مانده است. نتایج مربوطه در جدول **۹** آورده شده است.

جدول (۷): تست ضربه با سرعت‌بالا/ پرتابه: مخروطی HWS به قطر ۵ میلی‌متر/ هدف: اینگرا چهار لایه/ طول سابوت: ۱/۵ سانتی‌متر.

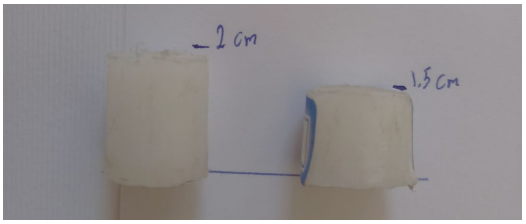
شماره آزمایش	سرعت ورودی $(\frac{m}{s})$	وضعیت
L4CN7	۸۴	ماندن پرتابه در هدف
L4CN8	۱۰۷	عدم عبور پرتابه / شکست پرتابه

جدول (۸): مشخصات ابعادی پرتابه فولاد بلبرینگ به قطر ۱۰ میلی‌متر

طول پرتابه (cm)	جرم پرتابه (gr)	طول سابوت (cm)	جرم سابوت (gr)
۳	۱۵/۱	۲	۲/۲۰

جدول (۹): تست ضربه با سرعت‌بالا/ پرتابه مخروطی: فولاد 100Cr6 به قطر ۱۰ میلی‌متر/ هدف: اینگرا چهار لایه.

شماره آزمایش	سرعت ورودی $(\frac{m}{s})$	سرعت خروجی $(\frac{m}{s})$	انرژی جذب‌شده (J)
N1D10L4	۳۱	۰	۷/۲۶
N2D10L4	۶۱	۰	۲۸/۰۹
N3D10L4	۶۵	۰	۳۱/۹۰
N4D10L4	۸۲	۰	۵۰/۷۷
N5D10L4	۹۸	۵۶	۴۸/۸۳
N6D10L4	۱۲۳	۱۰۰	۳۸/۷۲
N7D10L4	۱۵۲	۱۲۵	۵۶/۴۷



شکل (۱۰): مقایسه طول سابوت.

۳-۲- پرتابه به قطر ۱۰ میلی‌متر

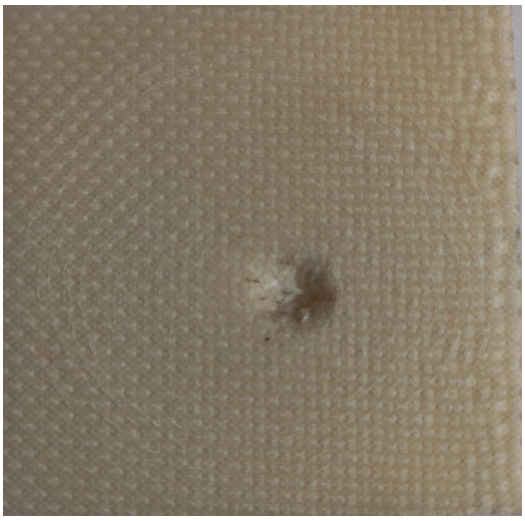
تست ضربه با پرتابه مخروطی از جنس فولاد 100Cr6 با زاویه ۶۰ درجه وارد شد. پرتابه‌ها با استفاده از فرآیند تراشکاری رولربیرینگ استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر ساخته شد. در شکل **۱۱** پرتابه به قطر ۱۰ میلی‌متر و سابوت مورداستفاده نشان داده‌شده است.

شکل (۱۱): پرتابه به قطر ۱۰ میلی‌متر و سابوت مورداستفاده.

در شکل **۱۲** نمونه سطح و پشت هدف برای تست N5D10L4 آورده شده است. سپس برای کامپوزیت دو لایه تست ضربه در محدود سرعت ۳۲ تا ۱۵۷ متر بر ثانیه انجام‌شده که نتایج در جدول ۱۰ بیان‌شده است. سپس برای کامپوزیت دو لایه تست ضربه در محدود سرعت ۳۲ تا ۱۵۷ متر بر ثانیه انجام‌شده که نتایج در جدول **۱۰** بیان‌شده است. در شکل **۱۳** نمونه سطح و پشت هدف برای تست N5D10L2 آورده شده است.

۴- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به بررسی کامپوزیت ساخته‌شده به روش اینفیوژن خلأ پرداخته و سپس نتایج حاصل از تست تجربی ضربه با سرعت‌بالا بر کامپوزیت اینگرا-اپوکسی بیان‌شده و سرعت حد بالستیک، انرژی جذب‌شده، تأثیر قطر پرتابه و سابوت و میزان خسارت موردبررسی قرار می‌گیرد.



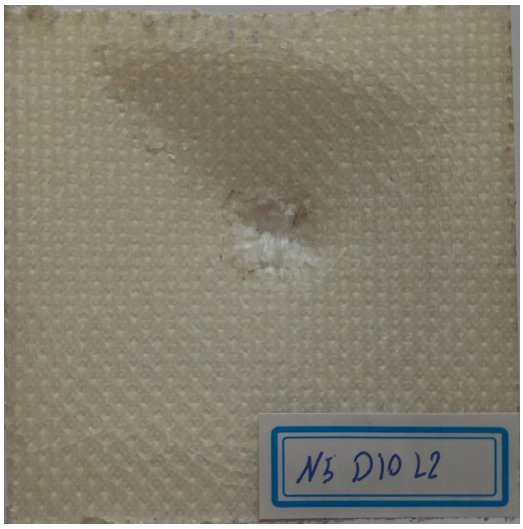
(الف)

(ب)

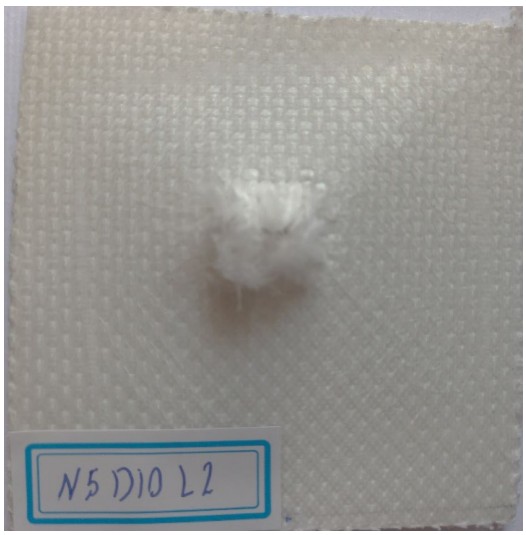
شکل(۱۲): تست ضربه با سرعت ۹۸ متر بر ثانیه، کامپوزیت چهارلایه و پرتابه مخروطی. الف) سطح برخورد ب) پشت هدف.

جدول (۱۰): تست ضربه با سرعت‌بالا/ پرتابه مخروطی: فولاد 100Cr6 به قطر ۱۰ میلی‌متر/ هدف: اینگرا دو لایه.

شماره آزمایش	سرعت ورودی $(\frac{m}{s})$	سرعت خروجی $(\frac{m}{s})$	انرژی جذب‌شده (J)
N1D10L2	۳۲	۰	۷/۷۳
N2D10L2	۴۰	۰	۱۲/۰۸
N3D10L2	۶۷	۳۳	۲۵/۶۷
N4D10L2	۷۴	۵۰	۲۲/۴۶
N5D10L2	۱۵۷	۱۲۵	۳۳/۸۶



(الف)



(ب)

شکل (۱۳): تست ضربه با سرعت ۱۵۷ متر بر ثانیه، کامپوزیت دولایه و پرتابه مخروطی: الف) سطح برخورد ب) پشت هدف.

۴-۱- میزان حفره

حفره یا فضای خالی در کامپوزیت نامطلوب بوده و موجب تضعیف خواص مکانیکی از جمله استحکام کامپوزیت و کاهش طول عمر آن می‌گردد، همچنین ایجاد حفره عمدتاً به دلیل گیر افتادن هوا در فرآیند ساخت کامپوزیت اجتناب‌ناپذیر است. این حفره‌ها، محل شروع ترک بوده و موجب نفوذ رطوبت در کامپوزیت می‌شوند. برای اندازه‌گیری میزان حفره در کامپوزیت‌ها از (رابطه ۱) استفاده می‌شود.

اگر v_v کم‌تر از ٪۱ باشد کامپوزیت قابل‌قبول بوده و میزان حفره بالای ٪۵ به معنای فرآیند ساخت نامناسب و کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت خواهد بود [۲۰]:

$$v_v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (۱)$$

که ρ_{ce} چگالی تجربی اندازه‌گیری شده (باوجود حفره) و ρ_{ct} چگالی تئوری کامپوزیت ساخته‌شده است که با رابطه ذیل محاسبه می‌شود:

$$\rho_{ct} = \sum_{i=1}^{n} \rho_i v_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{w_i}{\rho_i}\right)} \quad i = m, f \quad (۲)$$

که n تعداد اجزای سازنده کامپوزیت (رزین و پارچه) و w_i کسر جرمی اجزا و ρ_i چگالی اجزای سازنده کامپوزیت است. در جدول **۱۱** خواص فیزیکی کامپوزیت نهایی ساخته‌شده به روش اینفیوژن خلأ محاسبه‌شده است. همچنین در جدول **۱۲** خواص مکانیکی پارچه/الیاف اینگرا بیان‌شده است. همچنین خواص مکانیکی رزین استفاده‌شده در جدول **۱۳** آورده شده است.

جدول (۱۱): ابعاد، جرم و چگالی تجربی نمونه کامپوزیتی چهار لایه اینگرا- اپوکسی.

طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)	جرم نمونه (gr)	چگالی $(\frac{gr}{cm^3})$
۷۰/۷۵	۷۰/۷۵	۳/۹۵	۱۹/۳۱	۰/۹۷۷

جدول (۱۲): خواص مکانیکی الیاف اینگرا.

چگالی سطحی $(\frac{gr}{m^2})$	چگالی $(\frac{gr}{cm^3})$	استحکام کششی $(\frac{gr}{denier})$
۳۸۰	۰/۸۴	۹

جدول (۱۳): خواص مکانیکی رزین.

چگالی $(\frac{gr}{cm^3})$	استحکام کششی $(\frac{kgf}{cm^2})$
۱/۱	۲۷۸۹۰

جهت محاسبه کسر جرمی پارچه اینگرا در کامپوزیت نهایی ساخته‌شده از (رابطه ۳) استفاده‌شده است:

$$\begin{aligned} A_{Fabric} &= A_{layer} \times n \\ W_{Fabric} &= A_{Fabric} \times \rho_{Area\ Density} \end{aligned} \quad (۳)$$

$$w_f = \frac{W_{Fabric}}{W_{Composite}}$$

و جهت محاسبه کسر حجمی رزین از (رابطه ۴) استفاده می‌شود

$$w_m = 1 - w_f \quad (۴)$$

که با جایگذاری در (معادله۲) چگالی تئوری برابر ۰/۹۸۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب محاسبه‌شده و میزان حفره بر اساس (رابطه ۱) برابر ٪۰/۳۹ است که نشان‌دهنده ساخت بسیار مناسب کامپوزیت با روش مذکور می‌باشد.

۴-۲- حد بالستیک

برخورد بالستیک به‌طورکلی یک ضربه کم جرم با سرعت‌بالا است که توسط یک منبع رانش ایجاد می‌شود. در میان تعاریف مختلف ممکن، حد بالستیک یک پرتابه-هدف را می‌توان به‌عنوان حداکثر سرعت پرتابه معرفی کرد که در آن یک سوراخ کامل در هدف با سرعت خروج صفر ایجاد شود [۲۱]. برای به دست آوردن سرعت حد بالستیک به شیوه تجربی، پرتابه با استفاده از سرعت‌های مختلف به هدف شلیک‌شده و حدود سرعت بالستیک با (رابطه ۵) تخمین زده می‌شود، سپس در محدود سرعت‌های مذکور تست ضربه مجدداً صورت گرفته تا پرتابه پس از نفوذ کامل در هدف در آن باقی بماند. برای هدف چهار لایه و پرتابه مخروطی قطر ۱۰ میلی‌متر بر اساس تست N4D10L4 سرعت حد بالستیک ۸۲ متر بر ثانیه می‌باشد. در این تست مطابق شکل **۱۴** پرتابه هدف را کامل سوراخ نموده و قسمت انتهایی آن در هنگام خروج با سرعت صفر در هدف می‌ماند. برای تعیین سرعت حد بالستیک کامپوزیت دولایه، تست‌های ضربه بر اساس تغییرات فشار تفنگ گازی به میزان نیم بار که حداکثر دقت فشار ایجادی در مخزن برای شلیک پرتابه می‌باشد، انجام‌شده است. بر این اساس می‌توان میانگین سرعت تست N2D10L2 و N3D10L2 را به‌عنوان سرعت حد بالستیک تعریف نمود که برابر ۵۴ متر بر ثانیه می‌باشد.

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

V_i سرعت ورودی پرتابه و V_r سرعت خروجی پرتابه از هدف می‌باشد.

نمودار سرعت خروجی بر اساس سرعت ورودی برای نمونه‌های دو و چهار لایه در شکل **۱۵** نشان داده‌شده است. در برخورد پرتابه با سرعت‌های بالا، مقاومت کامپوزیت کاهش‌یافته و سرعت خروجی برای کامپوزیت‌های دو و چهار لایه به یکدیگر نزدیک می‌شود. همچنین افزایش تعداد لایه موجب افزایش سرعت حد بالستیک می‌گردد اما این میزان رشد به‌صورت خطی نیست.

(الف)

(ب)

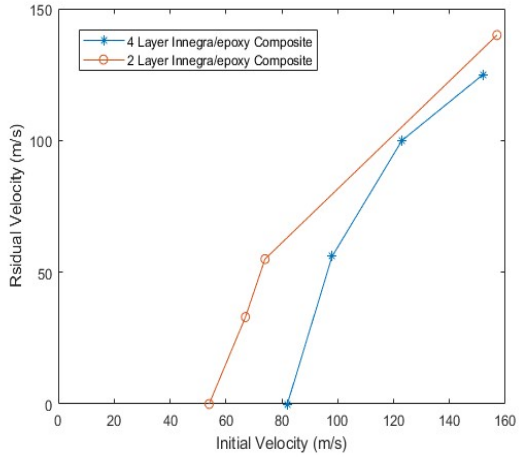
شکل (۱۴): تست ضربه با سرعت ۸۲ متر بر ثانیه، کامپوزیت چهار لایه و پرتابه مخروطی: الف) سطح هدف مستقر در نگه‌دارنده؛ ب) پشت هدف مستقر در نگه‌دارنده.

۴-۳- انرژی جذب‌شده توسط کامپوزیت

پس از برخورد پرتابه به هدف، انرژی توسط مکانیسم‌های مختلفی مانند تشکیل مخروط در پشت هدف، شکست الیاف اولیه (الیافی که مستقیماً زیر پرتابه قرار دارند)، تغییرشکل الیاف ثانویه (تمام الیاف غیر از الیاف اولیه)، لایه‌لایه شدن، ترک‌خوردگی ماتریس، پلاگ برشی و اصطکاک بین پرتابه و هدف جذب می‌شود و در سرعت حد بالستیک، هدف کل انرژی پرتابه را جذب می‌کند. برای محاسبه انرژی جذب‌شده جهت نفوذ کامل پرتابه در هدف، می‌توان از سرعت‌های ورودی و خروجی پرتابه استفاده نمود، بنابراین خواهیم داشت:

$$\text{انرژی جذب‌شده توسط نمونه} = \frac{1}{2}m(V_i{}^2 - V_r{}^2) \qquad (۶)$$

میانگین انرژی جذب‌شده جهت عبور پرتابه از هدف مطابق جدول **۹** و **۱۰**، برای کامپوزیت چهار لایه ۴۸/۷۰ ژول و میانگین انرژی جهت نفوذ کامل در کامپوزیت دو لایه مقدار ۲۷/۳۳ ژول می‌باشد. درنتیجه با افزایش دو لایه پارچه اینگرا میزان جذب انرژی ۷۸ درصد افزایش‌یافته است. همچنین برخلاف کامپوزیت‌های مبتنی بر کربن که ماهیت شکننده دارند، برای کامپوزیت اینگرا-اپوکسی به دلیل تغییر شکل‌پذیر بودن پارچه پلاگ برشی عامل شکست نمی‌باشد، همچنین در لایه‌لایه شدن در نتایج تست‌های ضربه بسیار جزئی بوده و مشاهده نمی‌شود.



شکل (۱۵): نمودار حد بالستیک برحسب سرعت ورودی و خروجی پرتابه برای کامپوزیت اینگرا-اپوکسی ۲ و ۴ لایه.

۴-۴- تأثیر سابوت

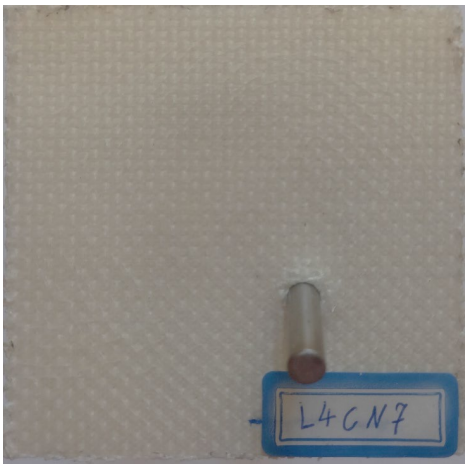
سابوت قطعه‌ای از جنس پلیمر است که سطح خارجی آن با لوله تفنگ گازی و سطح داخلی آن با پرتابه در تماس است.

کاربرد سابوت جلوگیری از نشت فشار گاز در هنگام شلیک و حفظ تعادل محوری پرتابه در لوله تفنگ گازی می‌باشد (شکل **۱۶**).

شکل (۱۶): مقایسه پرتابه و سابوت با دو قطر ۵ و ۱۰ میلی‌متر.

در هنگام استفاده از پرتابه به قطر ۵ میلی‌متر، جرم سابوت از جرم پرتابه بیشتر است، درنتیجه دو مشکل اساسی در فرآیند ضربه با سرعت‌بالا ایجاد شد. مشکل اول، انحراف پرتابه به علت وزن کم و وجود سابوت که باعث تغییر مرکز جرم پرتابه و انحراف آن در برخورد باهدف می‌شد و مشکل دوم، شکست پرتابه پس از برخورد با کامپوزیت بود. در ابتدا جنس پرتابه تغییر کرد اما تفاوتی در نتایج ایجاد نشد.

با بررسی نمونه‌ها از جنس‌های مختلف پرتابه، علت این شکست قطر پایین پرتابه و عدم جدا شدن از سابوت پیش از برخورد تشخیص داده شد، درواقع قسمت نوک پرتابه کامپوزیت را سوراخ کرده ولی سابوت پس از برخورد و آسیب رساندن به نمونه موجب شکست پرتابه می‌شد. تلاش شد با کم کردن طول سابوت تأثیر آن کاهش یابد اما مجدداً پرتابه دچار شکست شد، کوچک کردن بیشتر طول سابوت ممکن بود موجب انحراف گلوله در لوله دستگاه تفنگ گازی و در نتیجه ایجاد خسارت بر دستگاه شود. تنها در تست L4CN7 (شکل **۱۷**) احتمالاً سابوت جداشده که درنتیجه پرتابه دچار شکست نشده است. در این تست سرعت ورود پرتابه ۸۴ متر بر ثانیه بوده و فقط قسمت نوک‌تیز موجب نفوذ پرتابه در هدف شده و پرتابه در کامپوزیت باقی‌مانده است اما همچنان انحراف گلوله از مرکز سطح کاملاً قابل‌مشاهده می‌باشد. نتایج حاصله از تست با پرتابه به قطر ۵ میلی‌متر به علت انحراف و شکست پرتابه‌ها و تأثیر زیاد سابوت بر نتیجه هر تست قابل استناد نیست، بنابراین قطر پرتابه به ۱۰ میلی‌متر افزایش یافت تا تأثیر سابوت به حداقل برسد. در این حالت جرم سابوت کمتر از ۰/۱۵ جرم پرتابه می‌باشد.



شکل (۱۷): تست ضربه با سرعت ۸۴ متر بر ثانیه، کامپوزیت دولایه و پرتابه مخروطی به قطر ۵ میلی‌متر.

۴-۵- مود شکست در ضربه با سرعت‌بالا

مودهای شکست به پارامترهایی مختلفی مانند خواص ماده، سرعت ضربه، شکل دماغه پرتابه، هندسه هدف، شرایط نگه‌دارنده، جرم نسبی پرتابه و هدف بستگی دارد. رایج‌ترین حالت‌های شکست که توسط نمونه هدف در آزمایش ضربه با سرعت‌بالا مشاهده می‌شود در شکل **۱۸ (الف)** نشان داده‌شده است [۲۲].

مود گلبرگ‌زنی زمانی اتفاق می‌افتد که استحکام کششی در قسمت پشت هدف بیشتر شود و شکاف اولیه به شکل ستاره در اطراف نوک پرتابه ایجاد شود. تشکیل گلبرگ‌ها زمانی روی می‌دهد که بخش‌هایی از هدف با حرکت پرتابه به عقب رانده شوند. در کامپوزیت اینگرا/اپوکسی نیز مود غالب به علت خواص الاستیک بالا پارچه بافته‌شده و کامپوزیت نهایی، مود گلبرگ‌زنی می‌باشد.

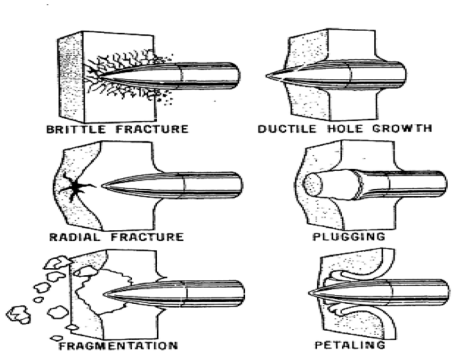
۴-۶- ارزیابی روش تجربی

جهت تأیید روش تجربی از معادله ریچ – اپیسون [۲۳] برای برازش منحنی نتایج تجربی و به دست آوردن سرعت حد بالستیک کامپوزیت اینگرا تحت نفوذ پرتابه صلب نوک‌تیز استفاده می‌شود.

این منحنی بین نقاط داده بر اساس تعمیم یک مدل تحلیلی که در ابتدا توسط ریچ و اپیسون (رابطه ۷) پیشنهادشده بود تعیین می‌شود [۲۴].

$$V_r = a(v_i{}^p - v_{bl}{}^p)^{\frac{1}{p}} \quad (۷)$$

که در آن a و p می‌توانند به‌عنوان ثابت‌های تجربی در نظر گرفته شوند. ثابت‌های مدل تحلیلی ریچ-اپیسون تنها در شرایطی که تغییرشکل پلاستیک پرتابه در هنگام ضربه ناچیز باشد به‌صورت $a = \frac{m_p}{mp+m_{pl}}$، $p = 2$، تعریف می‌شوند. که m_p جرم پرتابه و m_{pl} جرم پلاگ شده می‌باشد [۲۵ و ۲۶].



(الف)

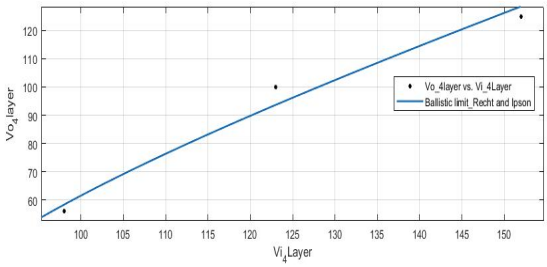
(ب)

شکل (۱۸): مودهای شکست: الف) انواع مختلف مودهای شکست در ضربه با سرعت‌بالا [۲۲]؛ ب) پشت هدف کامپوزیت ۴ لایه اینگرا-اپوکسی.

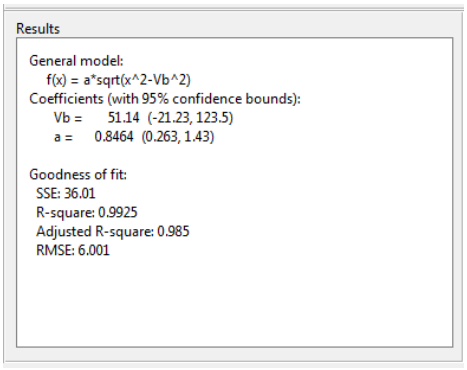
با توجه به جنس بسیار سخت پرتابه و صلب بودن پس از برخورد $p = 2$ در نظر گرفته‌شده و با استفاده از برازش منحنی در نرم‌افزار متلب (شکل ۱۹) ثابت a و v_{bl} سرعت حد بالستیک برای کامپوزیت چهار لایه محاسبه‌شده است. در جدول **۱۴** نتایج برازش منحنی با تابع ریچ-اپیسون برای کامپوزیت دو و چهار لایه و مقایسه آن با نتایج تجربی آورده شده است. نتایج به‌دست‌آمده برای سرعت حد بالستیک با نتایج تجربی مطابقت مناسبی دارد.

جدول (۱۴) مقایسه ضرایب ریچ-اپیسون و نتایج تجربی.

تعداد لایه	$v_{bl/Exp}$	v_{bl}	a	R^2
دو	۵۴	۵۱/۱۴	۰/۸۴۶	۰/۹۹
چهار	۸۲	۷۸/۱۳	۰/۹۸۶	۰/۹۷



(الف)

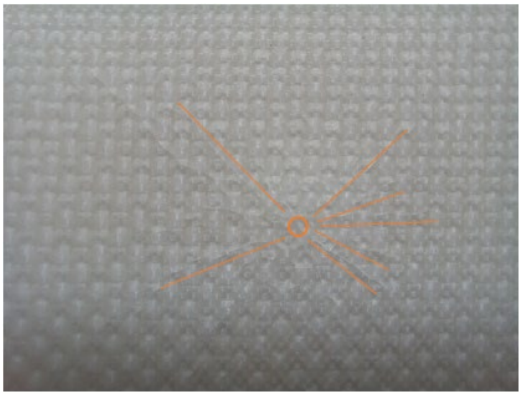


(ب)

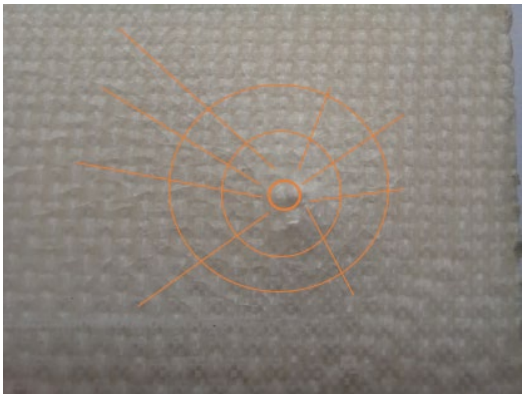
شکل (۱۹): تابع برازش شده در متلب برای کامپوزیت چهار لایه الف) شکل تابع، ب) ثوابت برازش محنی با تابع ریچ-اپیسون.

۴-۷- میزان آسیب

در برخورد با سرعت‌های کمتر از حد بالستیک با افزایش سرعت برخورد میزان آسیب پشت صفحه کامپوزیتی مطابق شکل **۲۰** افزایش می‌یابد. مشخصاً در سرعت‌های بالاتر انتشار موج عرضی پس از برخورد، موجب تشکیل دایره‌های هم‌مرکز با مرکزیت نقطه برخورد پرتابه مطابق (شکل ۲۰-ب) در هدف شده است. با تشکیل ناحیه مخروطی در پشت هدف، شعاع سطح مخروط تشکیل‌شده را می‌توان بر اساس انتشار موج عرضی محاسبه کرد. با افزایش سرعت برخورد از میزان حد بالستیک تا حدود ۱۶۰ متر بر ثانیه مطابق شکل **۲۱** میزان آسیب کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل (۲۰): مقایسه میزان آسیب پشت نمونه چهار لایه الف) پرتابه با سرعت ۳۱ متر بر ثانیه، ب) پرتابه با سرعت ۶۵ متر بر ثانیه.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه رفتار بالستیکی کامپوزیت اینگرا- اپوکسی ساخته‌شده به روش اینفیوژن خلأ موردمطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های تجربی با پرتابه مخروطی با قطرهای ۵ و ۱۰ میلی‌متر، با استفاده از دستگاه تفنگ گازی برای نمونه‌های دو و چهار لایه انجام پذیرفت.که نتایج به شرح ذیل است:

۱) جهت بررسی کیفیت ساخت کامپوزیت، میزان حفره کامپوزیت اینگرا-اپوکسی محاسبه شد که عدد کمتر از یک نشان‌دهنده کیفیت مناسب محصول ساخته‌شده می‌باشد.

۲) برای پرتابه به قطر ۵ میلی‌متر، قطر و جرم پایین پرتابه و جرم بالای سابوت موجب انحراف و شکست پرتابه می‌شد. درنتیجه تلاش شد تا تأثیر سابوت بر نتایج تست نفوذ تا حد امکان کاهش یابد اما باوجود کاهش طول سابوت این امر محقق نگردید.

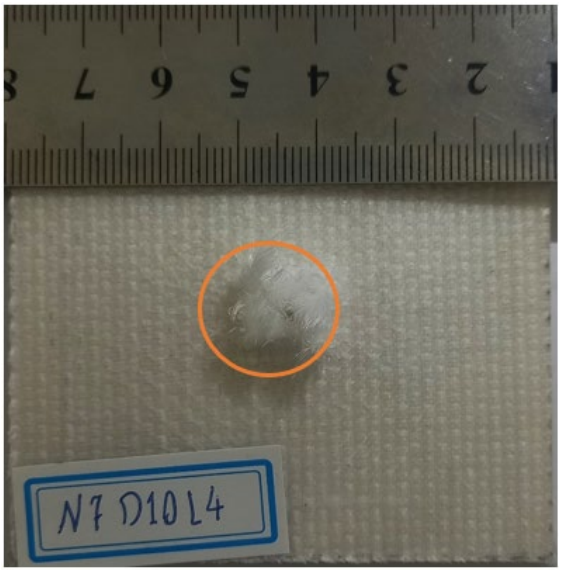
۳) بنابراین قطر پرتابه به ۱۰ میلی‌متر افزایش یافت. سرعت حد بالستیک و میزان جذب انرژی برای کامپوزیت اینگرا-اپوکسی دولایه با پرتابه مخروطی به ترتیب برابر ۵۴ متر بر ثانیه و ۲۷/۳۳ ژول محاسبه شد که با افزایش تعداد لایه کامپوزیت به چهار، سرعت حد بالستیک با ۵۲ درصد افزایش، به ۸۲ متر بر ثانیه و میزان جذب انرژی با ۱۹/۳۱ ژول افزایش (حدود ۷۸ درصد) به ۴۸/۷۰ ژول رسید.

۴) جهت ارزیابی روش تجربی از معادله ریچ-اپیسون استفاده شد که بر اساس برازش منحنی در نرم‌افزار متلب سرعت حد بالستیک برای کامپوزیت چهار لایه ۷۸/۱۳ متر بر ثانیه و برای کامپوزیت دو لایه ۵۱/۱۴ متر بر ثانیه محاسبه شد که با تقریب مناسبی با سرعت حد بالستیک تجربی مطابقت دارد.

۵) در خصوص مکانیسم‌های آسیب، پلاگ برشی و لایه‌لایه شدن کمترین میزان تأثیر را در نفوذ پرتابه دارند. میزان آسیب با افزایش سرعت در سرعت‌های کمتر از حد بالستیک افزایش یافته و در سرعت‌های بیشتر از حد بالستیک، میزان آسیب با افزایش سرعت کاهش می‌یابد و همچنین

مود غالب در شکست ضربه با سرعت‌بالا برای کامپوزیت اینگرا-اپوکسی مود گلبرگ‌زنی است.

(الف)



(ب)

شکل (۲۱): مقایسه میزان آسیب پشت نمونه چهار لایه الف) پرتابه با سرعت ۹۸ متر بر ثانیه ب)پرتابه با سرعت ۱۵۲ متر بر ثانیه.

۸- مراجع

[1] Tabiei A, Ivanov I. Computational micro-mechanical model of flexible woven fabric for finite element impact simulation. International journal for numerical methods in engineering. 2002;53(6):1259-76.

[2] Zhang G, Batra R, Zheng J. Effect of frame size, frame type, and clamping pressure on the ballistic performance of soft body armor. Composites Part B: Engineering. 2008;39(3):476-89.

[3] Khodadadi A, Liaghat G, Bahramian AR, Ahmadi H, Anani Y, Asemani S, et al. High velocity impact behavior of Kevlar/rubber and Kevlar/epoxy composites: a comparative study. Composite Structures. 2019;216:159-67.

[4] Hasanzadeh M, Mottaghitalab V, Babaei H, Rezaei M. The influence of carbon nanotubes on quasi-static puncture resistance and yarn pull-out behavior of shear-thickening fluids (STFs) impregnated woven fabrics. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016;88:263-71.

[5] Liu T, Zhang X-t, He N-b, Jia G-h. Numerical material model for composite laminates in high-velocity impact simulation. Latin American Journal of Solids and Structures. 2017;14:1912-31.

[6] khodadadi a, liaghat g, akbari ma, tahmasebi abdar m. Numerical and experimental analysis of penetration into Kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic performance. Modares Mechanical Engineering. 2014;13(12):124-33.

[7] Khodadadi A, Liaghat G, Ahmadi H, Bahramian AR, Shahgholian D, Anani Y, et al. Experimental and numerical analysis of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates. Journal of Science and Technology of Composites. 2019;6(2):265-74.

[8] Bresciani LM, Manes A, Ruggiero A, Iannitti G, Giglio M. Experimental tests and numerical modelling of ballistic impacts against Kevlar 29 plain-woven fabrics with an epoxy matrix: Macro-homogeneous and Meso-heterogeneous approaches. Composites Part B: Engineering. 2016;88:114-30.

[9] Zarei H, Shahnazar P, Meskini M, Sarkhosh R. Ballistic Performance Analysis of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(5):356-5.

[10] Wang H, Weerasinghe D, Hazell PJ, Mohotti D, Morozov EV, Escobedo-Diaz JP. Ballistic impact response of flexible and rigid UHMWPE textile composites: Experiments and simulations. Defence Technology. 2023;22:37-53.

[11] asemani ss, Liaghat G, Ahmadi H, Anani Y, khodadadi A. Experimental and Numerical

Analysis of High Velocity Impact on 2-Layer kevlar/Elastomer Composite. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(12):2733-45.

[12] Asemani SS, Liaghat G, Ahmadi H, Anani Y, Khodadadi A, Charandabi SC. The experimental and numerical analysis of the ballistic performance of elastomer matrix Kevlar composites. Polymer Testing. 2021;102:107311.

[13] Hasanzadeh M, Mottaghitalab V, Rezaei M, Babaei H. Numerical and experimental investigations into the response of STF-treated fabric composites undergoing ballistic impact. Thin-Walled Structures. 2017;119:700-6.

[14] Bhudolia SK, Gohel G, Subramanyam ESB, Leong KF, Gerard P. Enhanced impact energy absorption and failure characteristics of novel fully thermoplastic and hybrid composite bicycle helmet shells. Materials & Design. 2021;209:110003.

[15] Rahmani K, Alitavoli M, Darvizeh A. Experimental Study on the effect of adding multi-walled carbon nanotubes on the ballistic limit of fibers metal laminates, Journal of Aerospace Mechanics. 2023;19 (4):27-39.

[16] Ebrahimi F, Habibi S. Nonlinear low-velocity impact response of CFRP enhanced with CNT in hygrothermal environments. Journal of Aerospace Mechanics. 2017;14:65-80.

[17] Mousavizadeh SA, Hosseini M, Hatami H, Kamalvand M. Studies on the effect of reinforcers types on flat and curved steel sheets' performance under drop impact. Journal of Aerospace Mechanics. 2020 Dec 21;16(4):39-59.

[18] Mousavizadeh SA, Hosseini M, Hatami H. Experimental and Numerical Investigation on the plain and reinforced Steel Sheets under free fall impact. Iranian Journal of Mechanical Engineering. 2021; 23 (1): 64-84.

[19] Mousavizadeh SA, Hosseini M, Hatami H. Experimental Studies on Energy Absorption of Curved Steel Sheets under Impact Loading and the Effect of Pendentive on the Deformation of Samples. Journal of Modeling in Engineering. 2021;18(63):27-40.

[20] Ismail AS, Jawaid M, Naveen J. Void content, tensile, vibration and acoustic properties of kenaf/bamboo fiber reinforced epoxy hybrid composites. Materials. 2019;12(13):2094.

[21] Zukas JA, Nicholas T, Swift HF, Greszczuk LB, Curran DR, Malvern L. Impact dynamics. Journal of Applied Mechanics. 1983;50(3):702.

[22] Safri S, Sultan M, Yidris N, Mustapha F. Low velocity and high velocity impact test on composite materials-a review. Int j eng sci. 2014;3(9):50-60.

[23] Recht R, Ipson TW. Ballistic perforation dynamics. 1963.

[24] Li B, Kidane A, Ravichandran G, Ortiz M. Verification and validation of the Optimal Transportation Meshfree (OTM) simulation of terminal ballistics. International Journal of Impact Engineering. 2012;42:25-36.

[25] Wei G, Zhang W, editors. Perforation of thin aluminum alloy plates by blunt projectiles: An experimental and numerical investigation. Journal of Physics: Conference Series; 2014: IOP Publishing.

[26] Senthil K, Iqbal MA, Arindam B, Mittal R, Gupta N. Ballistic resistance of 2024 aluminium plates against hemispherical, sphere and blunt nose projectiles. Thin-Walled Structures. 2018;126:94-105.

Journal of Aerospace Mechanics/ 2024/ Vol.20/ No.1/ 125-141

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.1.8.0

Experimental Investigation of High Velocity Projectile Penetration into Innegra Fabric Composite

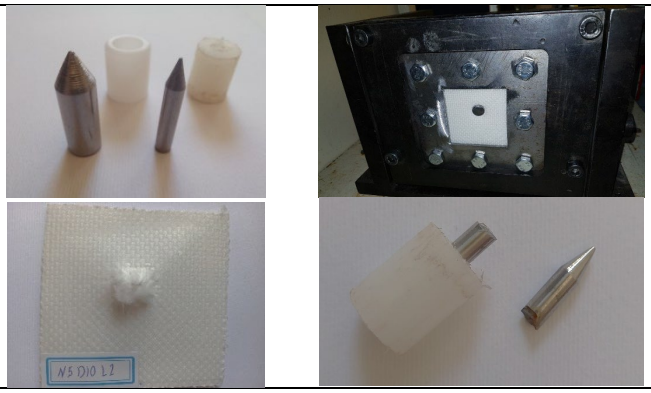
Saeed Shabani Nodehi[1], Sayyed Roohollah Kazemi[2*], Mojtaba Ziya-Shamami[3]

[1] Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
[2] Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
[3] Assistant Professor, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- The ballistic limit velocity for two and four layers Innegra/epoxy composite with a 10 mm diameter conical projectile is 54 m/s and 82 m/s respectively.
- The energy absorption impacted by the 15.1 gr conical projectile for two and four layers Innegra/epoxy composite is 27.33 j and 48.70 j, respectively.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 28 October 2023
Received in revised form: 19 November 2023
Accepted: 19 December 2023
Available online: 9 March 2024
*Correspondence: kazemi@guilan.ac.ir
How to cite this article:
S.S. Nodehi, S.R. Kazemi. M. Ziya-Shamami. Experimental investigation of high velocity projectile penetration into innegra fabric composite. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(1):125-141.

Keywords:
Projectile penetration
Ballistic Limit
Innegra/Epoxy Woven Composite
Vacuum Infusion
Energy Absorption

ABSTRACT

High velocity impact resistance is a key requirement for advanced performance structures. This study focuses on experimental investigation of composite behavior made of Innegra fabric under high velocity impact. The targets are made by vacuum infusion method using Innegra fabric, which is a woven fabric composed of high modulus polypropylene fibers as reinforcement and epoxy as matrix. These samples are subjected to high velocity impact test performed by gas gun. In the present article, the ballistic performance of two- and four-layer composites impacted by conical projectiles with different diameters of 5 and 10 mm are investigated and the effect of the projectile diameter and sabot is studied. The experimental tests have been performed in the velocity range from 30 m/s to 160 m/s for two- and four-layers composites. Ballistic limit, energy absorption and damage pattern have been investigated. The results show the appropriate ballistic performance of Innegra/epoxy composite compared to other composites such as Kevlar/epoxy. The ballistic limit velocity base on experimental tests for two-layer Innegra/epoxy composite with a conical projectile is 54 m/s and for four-layer composite with 52% increase, is 82 m/s and the energy absorption for two-layer composite is 27.33 J and for four-layer composite with 78% increase is 48.70J.

* Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Imam Hossein University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.