

مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی عملکرد کامپوزیت ترموپلاستیک پلی فنیلن سولفاید تقویت شده با الیاف کربن تحت ضربه سرعت بالای گلوله‌های با هندسه مختلف

سید مصطفی میرتابعی^{۱،*}^۱ دکتری مهندسی مکانیک، رئیس دایره ارتباط با مراکز پژوهشی و صنعتی، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران^۲ دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

چکیده

امروزه کامپوزیت‌های ترموپلاستیک به علت دارا بودن استحکام بالا و وزن کم محبوبیت زیادی در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. هدف پژوهش حاضر، بررسی عملکرد بالستیکی یک کامپوزیت چهار لایه ترموپلاستیک تحت ضربه سرعت بالا می‌باشد. این کامپوزیت، از پلیمر پلی فنیلن سولفاید به عنوان ماده زمینه و الیاف کربن به عنوان فاز تقویت کننده بهره می‌برد. در این پژوهش ابتدا این کامپوزیت با لایه چینی متقارن [۰/۹۰/۹۰/۰] با استفاده از روش پرس گرم ساخته شده و سپس خواص مکانیکی آن با استفاده از تست کشش بدست آمد. سپس، تست ضربه سرعت بالا بر روی قطعات نمونه انجام شده و با به کارگیری دوربین دوربین سرعت بالا، سرعت خروجی گلوله‌ها بدست آمده است. همچنین، شبیه‌سازی عددی این ضربه سرعت بالا در نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA انجام شد و نتایج آن با داده‌های تجربی مقایسه و صحت سنجی گردید. در این شبیه‌سازی از سه گلوله با هندسه مختلف شامل سرکروی، سرتخت و مخروطی استفاده شده است. در نهایت براساس خروجی‌های عددی و تجربی بدست آمده مشخص گردید که کامپوزیت ساخته شده توانسته به میزان قابل توجهی از انرژی گلوله‌های مورد اصابت را جذب کند. بیشترین میزان این انرژی جذب شده در سرعت اولیه ۱۲۰ متر بر ثانیه، مربوط به گلوله سرتخت به میزان ۶۵/۶۷ درصد و کمترین آن نیز مربوط به گلوله مخروطی به میزان ۳۶/۶۶ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: کامپوزیت ترموپلاستیک؛ پلی فنیلن سولفاید؛ ضربه سرعت بالا؛ نرم افزار LS-DYNA؛ جذب انرژی؛ الیاف کربن.

Experimental and numerical simulation study of the performance of the polyphenylene sulfide thermoplastic composite reinforced with carbon fibers under high-velocity impact of projectiles with different geometries

Seyed Mostafa Mirtabaei^{1*},¹ Ph.D. of Mech Eng., Head of the Department of Research and Industrial Centers, Imam Ali university, Tehran, Iran² Ph.D. of Mech Eng., Faculty of Mech. Eng., Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Abstract

Today, thermoplastic composites have gained significant popularity in various industries due to their high strength-to-weight ratio. The aim of the current research is to investigate the ballistic performance of a four-layer thermoplastic composite under high-velocity impact. This composite utilizes polyphenylene sulfide as the matrix material and carbon fibers as the reinforcing phase. In this study, the composite was first fabricated with a symmetric layering configuration [0/90/90/0] using a hot press method, and its mechanical properties were determined through tensile testing. Subsequently, high-velocity impact tests were conducted on sample specimens, and the exit velocities of the projectiles were measured using a high-speed camera. Additionally, numerical simulations of these high-velocity impacts were performed using the finite element software LS-DYNA, and the results were compared and validated against experimental data. In these simulations, three different projectile geometries, namely, flat-nosed, conical, and spherical, were employed. Ultimately, based on the numerical and experimental outcomes, it was determined that the fabricated composite was capable of absorbing a significant amount of energy from the impacting projectiles. The highest energy absorption was observed at an initial velocity of 120 meters per second, corresponding to the flat-nosed projectile with a 65.67% absorption rate, while the lowest was associated with the conical projectile, with a 36.66% absorption rate.

Keywords: Thermoplastic composite; Polyphenylene sulfide; high-velocity impact; LS-DYNA software; Energy absorption; Carbon fibers.

۱- مقدمه

در راستای حفاظت از جان و تجهیزات مختلف، کامپوزیت‌های پایه پلیمری همواره مورد توجه دانشمندان و محققان فعال در حوزه‌های نظامی بوده است و در سال‌های اخیر شاهد افزایش چشمگیر کاربرد این مواد پیشرفته در صنایع نظامی و ادوات جنگی بوده‌ایم. تاکنون تحقیقات و مطالعات زیادی در زمینه مشخصه‌یابی و بررسی خواص مکانیکی این مواد پرکاربرد انجام شده است. اما هرچه از مطالعات مربوط به خواص مکانیکی فاصله گرفته و بیشتر به پاسخ این مواد تحت ضربه بالستیک معطوف می‌شویم، دامنه مطالعات محدودتر می‌شود. با این حال ضربه بالستیک را می‌توان جزو مهمترین عناوین پژوهشی دانست که در صنایع نظامی کاربرد داشته‌اند. چراکه اغلب این موضوعات به بررسی نحوه نفوذ یک گلوله یا گلوله‌های مختلف در اهداف متفاوت می‌پردازد و عملکرد این اهداف در جذب انرژی و کند کردن سرعت گلوله‌ها را بررسی می‌کند.

در بین پلیمرهایی که به عنوان ماده زمینه برای کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شوند، پلی‌فنیلن سولفاید^۱ یک ترموپلاستیک مهندسی نیمه کریستالی با کارایی بسیار بالا است که دارای ویژگی‌های مختلفی از جمله استحکام مکانیکی فوق‌العاده، مقاومت حرارتی عالی، پایداری ابعادی، مقاوت ذاتی مناسب در برابر اشتعال و خواص عایق الکتریکی خوب می‌باشد که همین خواص عالی این ماده را به جایگزینی مناسب برای فلزات و پلیمرهای ترموست جهت استفاده در قطعات خودرو، لوازم خانگی، قطعات الکترونیکی و ادوات نظامی و جنگی تبدیل کرده است [۱، ۲]. به علاوه، مواد و متریکال‌های برپایه پلی‌فنیلن سولفاید که با الیاف کربن، الیاف شیشه و نانوذرات مختلف تقویت شده‌اند، اخیراً به عنوان موادی با کارایی بسیار بالا شناخته شده‌اند و در صنایع خودروسازی و هوافضا و یا به عنوان الکتروود و جداکننده در زمینه‌های دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. در یک یا دو سال اخیر توجه بسیاری از دانشمندان و محققان به این ماده پلیمری بسیار سفت و محکم جلب شده و مطالعات مختلفی اغلب بر روی بهبود خواص مکانیکی این ماده پلیمری از طریق ترکیب با سایر مواد انجام شده است [۴-۶]. اما همانطور که گفته شد، تمرکز اصلی این مطالعات بر روی خواص مکانیکی و تاثیر عوامل مختلف بر روی

این خواص بوده است و مطالعات بسیار محدودی در زمینه خواص ضربه‌ای و عملکرد بالستیکی این سازه‌ها وجود دارد که می‌تواند زمینه‌ساز انجام تحقیقات گسترده روی این مواد شود. همواره تحقیقات عددی و تحلیلی نیازمند صحت‌سنجی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی می‌باشند تا اعتبار و دقت آنها مشخص گردد. به علاوه هر مدل تحلیلی و عددی در نهایت باید ساخته شده و تحت آزمایش‌های متعددی قرار گیرد تا در نهایت بتواند در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا و در زمینه کامپوزیت‌های پلیمری، ردی و همکاران [۷] قابلیت جذب انرژی کامپوزیت اپوکسی و فنولیک تقویت شده با الیاف شیشه با ضخامت‌های مختلف را تحت ضربه سرعت بالای گلوله‌های فولادی بررسی کردند و با استفاده از فیلم‌برداری سرعت بالا نحوه و مکانیزم‌های تخریب این کامپوزیت را مورد بررسی قرار دادند. لیو و همکاران [۸] در یک پژوهش تجربی اثر رطوبت بر رفتار بالستیکی کامپوزیت پلیمری حاوی الیاف کربن را مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که قابلیت جذب انرژی و حدبالستیکی این سازه با افزایش میزان رطوبت به مقدار قابل توجهی کاهش داشته است. دکا و همکاران [۹] پاسخ کامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف بافته شده شیشه را تحت ضربه بالستیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش در بردارنده نمودارهای تنش-کرنش در آزمون کشش، جذب انرژی در ضربه بالستیک و تغییرات انرژی جنبشی با زمان برای نمونه‌های مختلف با درصد‌های متفاوت و انواع مختلفی از تقویت‌کننده الیاف شیشه بوده که در مورد هرکدام به طور مفصل بحث شده است. در سال ۲۰۱۴ همبیز^۲ و همکاران [۱۰] مطالعه‌ای بر روی کامپوزیت‌های چندلایه متشکل از اپوکسی به عنوان ماده زمینه و الیاف کربن به عنوان فاز تقویت‌کننده تحت ضربه سرعت بالای یک گلوله ژلاتینی انجام دادند. در نهایت نتایج آزمایش ضربه سرعت بالا نشان داد که تحت ضربه پرتابه نرم ژلاتینی، یک سطح تماس غیرمحل و گسترده بین پرتابه و هدف کامپوزیتی ایجاد شده است که منجر به ایجاد ترک‌های محدودی در سازه شده است. این نتایج تا محدوده سرعت و انرژی ضربه به ترتیب ۱۷۱ متر بر ثانیه و ۴۴۳ ژول معتبر بوده ولی از این محدوده‌ها به بعد مکانیزم‌های آسیب در سازه کاملاً

^۱ Polyphenylene sulfide^۲ Heimbs

از بودجه تعریف شده برای آن باشد. همچنین ممکن است تجهیزات لازم برای انجام آزمایش‌ها وجود نداشته باشد. این‌ها همگی دلایلی هستند که اهمیت استفاده از ابزارهای شبیه سازی را آشکار می‌سازند. در بین ابزارهای شبیه سازی، نرم افزار المان محدود LS-DYNA را می‌توان یکی از دقیق‌ترین و بهترین نرم‌افزارهای شبیه سازی انواع ضربه مخصوصا ضربه سرعت بالا دانست که اخیرا تحقیقات و پژوهش‌های بسیاری با استفاده از این نرم افزار بر روی رفتار ضربه‌ای انواع کامپوزیت‌های حاوی الیاف انجام شده است [۱۴-۱۶]. به عنوان نمونه، پژوهشی که توسط ریموندو^۴ و همکاران [۱۷] انجام شد را می‌توان جزو اولین پژوهش‌های عددی و شبیه سازی که در زمینه ضربه سرعت بالا در نرم افزار LS-DYNA انجام شد، دانست. در این پژوهش یک مدل ماده دقیق جهت پیش‌بینی رفتار استاتیکی، دینامیکی و مکانیزم‌های تخریب کامپوزیت‌های پلیمری حاوی الیاف تک جهته ارائه شده است که با استفاده از آن می‌توان رفتار این نوع سازه‌های کامپوزیتی را با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی همچون چینش‌های مختلف کامپوزیت، زاویه برخورد گلوله و انواع هندسه‌های مختلف گلوله تحت ضربه سرعت بالا شبیه‌سازی و بررسی کرد. انصاری و چاکرابارتی [۱۸] در یک پژوهش کاملاً عددی و شبیه سازی، رفتار کامپوزیت‌های حاوی الیاف را با استفاده از هیدرو کد اتوداین^۵ مورد بررسی قرار دادند که در آن اثرات شوک وارد شده ناشی از ضربه در نظر گرفته می‌شود. در مطالعه پارامتریک گسترده‌ای که در این پژوهش انجام شد موارد مختلفی از جمله عمق نفوذ گلوله در سازه‌های کامپوزیتی، تاثیر ضخامت سازه بر عملکرد بالستیکی آن، نسبت‌های ابعادی سازه، شعاع و مساحت ناحیه آسیب دیده و میزان نیروهای تماسی وارد شده تحلیل گردید. فانگ یین^۶ و همکاران [۱۹] ابتدا با استفاده از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA یک کامپوزیت ۳۶ لایه تقویت شده با الیاف کربن را مدل‌سازی کرده و سپس پاسخ آن تحت ضربه بالستیک را مورد بررسی قرار دادند. چینش لایه‌ها در این کامپوزیت به صورت $[\pm 45/0/90/45/45/45]_{2s}$ در این پژوهش عددی و تجربی که توسط موسوی و خرمی‌شاد [۲۰] انجام شده است، قابلیت جذب انرژی کامپوزیت چندلایه کربن/اپوکسی با اضافه کردن

تغییر یافته است. در سال ۲۰۱۸ لیو^۱ و همکاران [۸] توانستند اثر دما و رطوبت را بر عملکرد بالستیکی یک کامپوزیت چندلایه ساخته شده از ماده زمینه اپوکسی TDE-85 و الیاف کربن T700 بدست آورند. در این پژوهش نشان داده شد که حد بالستیک و جذب انرژی این سازه با افزایش مدت زمانی که سازه تحت شرایط رطوبتی قرار گرفته بود، به شدت کاهش یافته است. همچنین با افزایش این زمان، رفته رفته جدایش الیاف از ماده زمینه در حال رخ دادن بود که به مقدار زیادی مقاومت سازه در برابر ضربه بالستیک را کاهش می‌دهد. در سال ۲۰۱۹، ایگناتوا^۲ و همکاران [۱۱] در یکی از دانشگاه‌های روسیه پژوهش جالبی بر روی کامپوزیت‌های حاوی الیاف آرامید انجام دادند. هدف آن‌ها در این پژوهش نشان دادن تاثیر افزودن یک پلیمر به نام پلی‌وینیل استات^۳ بر عملکرد بالستیکی چندلایه الیاف آرامید بود. مطابق نتایج این پژوهش می‌توان تاثیر مثبت افزودن پلیمر پلی‌وینیل استات بر مقاومت بالستیکی الیاف آرامید را مشاهده کرد. داسیلوا و همکاران [۱۲] توانستند عملکرد بالستیکی یک کامپوزیت هیبریدی چندلایه جدید که از ماده زمینه اپوکسی، الیاف آرامید و الیاف شیشه تشکیل شده را به صورت تجربی بررسی کنند. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف شیشه توانسته قابلیت جذب انرژی کامپوزیت حاوی الیاف آرامید را بهبود بخشد. در جدیدترین پژوهشی که در زمینه عملکرد بالستیکی کامپوزیت‌های حاوی الیاف انجام شده است، دلاوری و صفوی [۱۳] به صورت شبیه سازی و تجربی رفتار یک کامپوزیت هیبریدی چندلایه که از اپوکسی، الیاف کربن، الیاف شیشه و الیاف کولار ساخته شده بود را تحت ضربه سرعت بالا مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج این پژوهش هنگامی که از لایه حاوی الیاف کولار در سطح جلویی که مستقیماً تحت ضربه گلوله قرار می‌گیرد استفاده شد، حد بالستیک و میزان انرژی جذب شده به مراتب بالاتر از حالت‌های دیگر بوده است.

در بسیاری از مواقع بررسی خواص و رفتار مکانیکی یک ماده یا یک سازه با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی آن امکان پذیر نیست. چراکه ممکن است میزان وقت کافی برای انجام این آزمایش‌ها وجود نداشته باشد و یا هزینه‌هایی که این آزمایش‌های متعدد به یک پروژه تحمیل می‌کنند بسیار بیشتر

⁴ Raimondo

⁵ Autodyn

⁶ Fong Yen

¹ Liu

² Ignatova

³ Polyvinyl acetate

لایه‌هایی از جنس الیاف شیشه و کولار به آن تحت ضربه سرعت بالا بررسی گردیده است. این محققان نشان دادند که با استفاده از یک چینش بهینه هیبریدی شامل الیاف کربن، الیاف شیشه و الیاف کولار، میزان جذب انرژی کامپوزیت در مقایسه با حالتی که فقط از الیاف کربن استفاده شده بود به مقدار ۱۳۵٪ افزایش داشته است در حالی که وزن سازه فقط ۹٪ بیشتر از حالت قبل شده بود.

بر اساس مرور انجام شده بر روی تحقیقات و پژوهش‌های پیشین، این نکته کاملاً آشکار می‌شود که در زمینه بررسی خواص ضربه‌ای کامپوزیت‌های پلیمری، بیشتر تمرکز بر روی پلیمرهای ترموست (گرماسخت) بوده است و کمتر به کامپوزیت‌های با پایه پلیمرهای ترموپلاستیک (گرمانرم) پرداخته شده است. پژوهش حاضر، عملکرد یک کامپوزیت چهار لایه تقویت شده با الیاف کربن و با ماده زمینه پلی‌فنیلن سولفاید که یک پلیمر ترموپلاستیک می‌باشد را تحت ضربه سرعت بالا بررسی می‌کند که یک موضوع نو و تازه در این زمینه می‌باشد و تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. استفاده از پلیمر ترموپلاستیک پلی‌فنیلن سولفاید در کنار الیاف کربن منجر به ایجاد یک کامپوزیت ترموپلاستیک شده است که به دلیل نداشتن فرایند پخت، بسیار سریع‌تر از کامپوزیت‌های ترموست تولید می‌شود و همچنین دارای قابلیت بازیافت و اصلاح پس از تولید می‌باشد که اهمیت و مزایای این کامپوزیت را نشان می‌دهد. بررسی خواص مکانیکی و ضربه‌ای این کامپوزیت چهارلایه با چینش متقارن [۰/۹۰/۹۰/۰] برای اولین بار بوده و تاکنون به آن پرداخته نشده است که موضوع این پژوهش قیاس گرفته است. مقاله حاضر، حاصل پژوهشی تجربی و شبیه‌سازی می‌باشد که در آن کامپوزیت ترموپلاستیک مذکور تولید و ساخته شده و ضمن بدست آوردن خواص مکانیکی آن، تحت تست ضربه سرعت بالا قرار گرفته است.

همچنین شبیه‌سازی این تست با استفاده از سه نوع گلوله مختلف در نرم افزار المان محدود LS-DYNA نیز انجام شده و نتایج آن با داده‌های تجربی صحت‌سنجی گردیده است. چنین شبیه‌سازی عددی بر روی کامپوزیت مذکور با استفاده از این نرم‌افزار با دقت بسیار بالای حاصل شده نیز تاکنون صورت نگرفته و پژوهش حاضر از این بابت نیز دارای نوآوری

می‌باشد. گلوله‌های در نظر گرفته شده در این پژوهش از نوع مخروطی، سرکروی و سرتخت می‌باشند که با چهار نوع سرعت اولیه‌ی متفاوت شامل ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ متر بر ثانیه به سمت هدف کامپوزیتی شلیک شده‌اند تا از نظر نوع پرتابه و در نظر گرفتن حالت‌های مختلف مربوط به سرعت‌های اولیه متفاوت، این پژوهش از جامعیت و کامل بودن خاصی برخوردار باشد. در نهایت، نتایج جدیدی در زمینه خواص مکانیکی، میزان جذب انرژی، عملکرد بالستیکی، تغییرات مربوط به نمودارهای سرعت-زمان و شتاب-زمان و غیره ارائه گردید و در مورد روندهای ایجاد شده در این نتایج بحث گردید.

۲- روند انجام آزمایش‌ها

۲-۱- معرفی مواد و نحوه ساخت قطعات نمونه

پلی‌فنیلن سولفاید که یک پلیمر ترموپلاستیک با استحکام فوق‌العاده و دمای ذوب بالا می‌باشد به عنوان ماده زمینه کامپوزیت مورد نظر استفاده شده است. این پلیمر به صورت وارداتی در ایران وجود دارد و شرکت‌های مختلفی اقدام به وارد کردن این محصول کرده‌اند. پلی‌فنیلن سولفاید به کار رفته در این پژوهش، ساخته شده توسط کارخانه یونینکو^۱ و محصول کشور چین می‌باشد. همچنین در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از الیاف کربن تک جهته T300 به عنوان تقویت کننده استفاده شده است. این الیاف ساخته شده توسط شرکت یوچانگ کره جنوبی می‌باشد. مطابق اطلاعاتی که شرکت سازنده از این محصول ارائه کرده است، خواص فیزیکی آن شامل چگالی ۱۷۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، قطر فیلامنت^۲ ۷ میکرومتر و ضریب انتقال حرارت ۰/۴۱- می‌باشد.

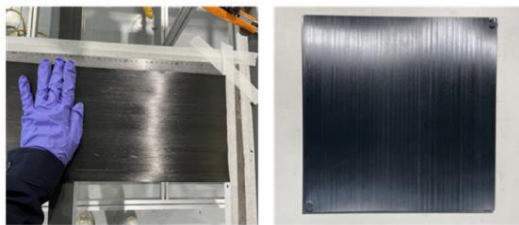
برای ساخت این کامپوزیت ترموپلاستیک، از تحت پرس گرم قرار دادن چهارلایه پیش آغشته حاوی پلی‌فنیلن سولفاید و الیاف کربن استفاده شده است. روش تولید این پیش آغشته

^۲ Filament

^۲ UNINKO



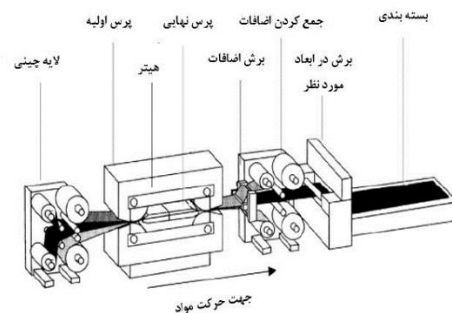
(ب) ترکیب نهایی پیش آغشته بعد از پرس بین دو غلتک
 شکل ۲- نحوه آغشته سازی الیاف کربن و ماده زمینه
 پلی فنیلن سولفاید



شکل ۳- تصاویر مربوط به (الف) ورق مربعی برش خورده
 با ابعاد مورد نظر و (ب) نحوه برش زدن ورق ایجاد شده

بعد از اینکه ابعاد مورد نظر از ورق پیش آغشته بریده شد، چهار لایه از این ورق‌های برش خورده با ابعاد ذکر شده و هرکدام به ضخامت ۰/۲۵ میلی‌متر با لایه چینی [۰/۹۰/۹۰/۰] بر روی یکدیگر قرار داده شده و در داخل پرس گرم نشان داده شده در شکل ۴ قرار داده می‌شوند. پس از قرار دادن قطعات نمونه در داخل پرس گرم، دما و فشار آن به ترتیب روی ۲۸۰ درجه سانتیگراد و ۱ تن تنظیم می‌شود. در این مرحله ماده زمینه پلی فنیلن سولفاید ذوب شده و باعث شده تا این چهار لایه ورق پیش آغشته با اتصال یکنواخت به یکدیگر بچسبند. در نهایت کامپوزیت چهار لایه ایجاد شده به ضخامت ۱ میلی-متر از پرس گرم خارج شده و در دمای محیط قرار داده می‌شود تا به آرامی سرد شده و آماده انجام تست‌های بعدی بر روی آن شود. تصویر قطعات نمونه نهایی ایجاد شده که برای تست ضربه سرعت بالا و تست کشش ساده از آن‌ها استفاده می‌شود، در شکل ۵ قابل مشاهده است.

ها به این صورت است که ابتدا پلی فنیلن سولفاید در محفظه-ای مذاب شده و سپس رشته‌های الیاف کربن که از قبل از هم باز شده اند به این ماده مذاب آغشته می‌شود و بین دو غلتک پرس می‌شوند تا الیاف کربن و پلی فنیلن سولفاید مذاب کاملاً با یکدیگر به صورت یکنواخت ترکیب شوند. سپس این ترکیب (ورق) ایجاد شده به آرامی سرد می‌شود تا به حالت نهایی و جامد خود برسد. در این حالت قسمت‌های زائد بریده شده و ورق ایجاد شده که حاوی ۶۰٪ الیاف کربن و ۴۰٪ ماده زمینه پلی فنیلن سولفاید می‌باشد، تولید می‌گردد. شماتیک کلی این فرآیند ساخت در شکل ۱ و همچنین نحوه آغشته‌سازی الیاف کربن و ماده زمینه پلی فنیلن سولفاید در شکل ۲ آورده شده است. پس از بدست آمدن ورق پیش آغشته، برش‌هایی از این ورق به ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ و ۲۵۰×۱۲۰ به ترتیب به منظور ساخت قطعات نمونه مربوط به تست ضربه سرعت بالا و تست کشش مطابق شکل ۳ جدا می‌شود.

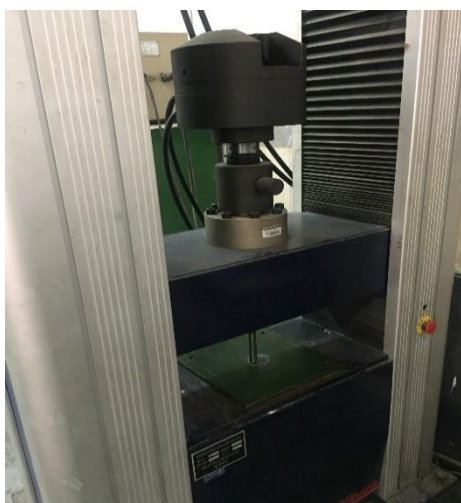


شکل ۱- شماتیک کلی فرآیند ساخت پیش آغشته
 متشکل از پلی فنیلن سولفاید و الیاف کربن



(الف) آغشته شدن الیاف کربن به پلی فنیلن سولفاید

کشش در شکل ۷ آورده شده است. بعد از برش قطعات نمونه، جهت جلوگیری از سر خوردن این قطعات از فک دستگاه و همچنین جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش، از تب های کامپوزیتی به طول ۵۶ میلی‌متر استفاده شده است. در نهایت، بر اساس استاندارد اشاره شده، سرعت حرکت فک دستگاه برابر ۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد و این تست برای دو سری از قطعات، یکبار در زاویه الیاف صفر درجه و یکبار هم در زاویه الیاف ۴۵ درجه انجام شد.



(الف)



(ب)

شکل ۶- تصاویر مربوط به (الف) نمای کلی دستگاه کشش یونیورسال و (ب) فک های دستگاه هنگام تست



شکل ۴- دستگاه پرس گرم استفاده شده



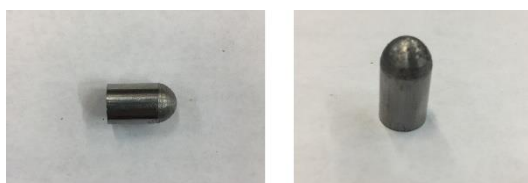
شکل ۵- کامپوزیت ترموپلاستیک چهار لایه ساخته شده بعد از پرس گرم

۲-۲- نحوه انجام تست کشش

جهت بدست آوردن خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده، تست کشش تک محوره با استفاده از دستگاه کشش یونیورسال^۱ (شکل ۶) و بر اساس استاندارد ASTM D3039 بر روی قطعات نمونه آماده شده برای این تست انجام شده است. بر اساس این استاندارد قطعات نمونه به طول ۲۵۰ و عرض ۲۵ میلی‌متر برش داده شده‌اند. برش این قطعات نمونه تست کشش به گونه ای بود که راستای لبه‌ی این قطعات با راستای الیاف کربن برای سری اول زاویه‌ی صفر درجه و برای سری دوم زاویه ۴۵ درجه بسازد. تصاویر مربوط به قطعات تست

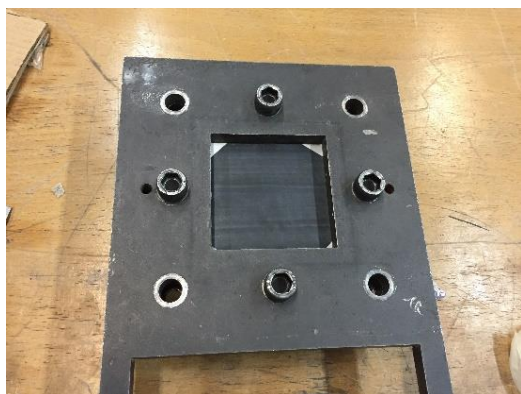
^۱ Universal tensile testing machine

این تست با چهار سرعت ورودی مختلف شامل ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ متر بر ثانیه انجام شده است. مطابق شکل ۹، گلوله استفاده شده در این تست از نوع سرکروی یا قطر ۱۰ و طول ۱۱/۶۷ میلی‌متر بوده که از جنس فولاد ۲۲۱۰ معروف به فولاد نقره با سختی ۵۳ راکول C می‌باشد. به منظور انجام این تست فشار مخزن دستگاه به ترتیب بر روی فشارهای ۱۱، ۱۶، ۲۰ و ۲۵ بار تنظیم گردید که به ترتیب منجر به شلیک گلوله با سرعت‌های مذکور شده است.

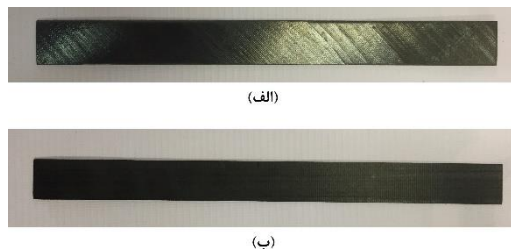


شکل ۹- گلوله سرکروی مورد استفاده در تست ضربه سرعت بالا

برای اینکه قطعه نمونه به طور کامل و در حالت کاملاً مقید و گیردار (Clamped-Clamped) در داخل محفظه قرار بگیرد، از یک فیکسچر سنگین و بسیار مستحکم استفاده گردید، به طوری که مطابق شکل ۱۰ (الف) قطعه نمونه ابتدا با چسب کاغذی به فیکسچر متصل شده تا از هرگونه سر خوردن و تغییر جایگاه پس از قرار گیری رویه فیکسچر جلوگیری شود و سپس مطابق همین شکل رویه فیکسچر بر روی قطعه نمونه قرار داده شد و با چهار پیچ محکم گردید. همچنین ابعاد گلوله و فیکسچر در شکل ۱۰ (ب) آورده شده است.



(الف) فیکسچر استفاده شده جهت نگهداری قطعه نمونه



شکل ۷- قطعات نمونه آماده شده برای تست کشش در زوایای الیاف (الف) ۴۵ درجه و (ب) صفر درجه

جهت اطمینان از قابل تکرار بودن و دقت نتایج، برای هر سری از قطعات نمونه ۳ بار تست کشش انجام گردید. همچنین لازم به ذکر است در هنگام انجام این تست، قطعات نمونه در فک های پایینی و بالایی دستگاه کاملاً مقید شده بودند و دمای آزمایشگاه ۲۲ درجه سانتیگراد بوده و تمامی قطعات نمونه تحت نرخ کرنش ثابت و یکسان تحت تست قرار گرفتند.

۲-۳- نحوه انجام تست ضربه سرعت بالا

در این پژوهش از دستگاه اسلحه گازی جهت انجام تست ضربه سرعت بالا استفاده گردید که مخزن آن حاوی هوای متراکم می‌باشد. تصویر مربوط به این دستگاه در شکل ۸ آورده شده است. برای این تست معمولاً کشورهای مختلف از استانداردهای DIN آلمان و غیره ارائه شده است. روش انجام این تست با استانداردهای مختلفی از جمله NIJ، FRA، MIL-SAMIT، DIN آلمان و غیره ارائه شده است. روش انجام این تست با دستگاه مذکور در این پژوهش نزدیک به استاندارد FRA^۱ کشور آمریکا می‌باشد و از قوانین و دستورات ذکر شده در این استاندارد پیروی شده است.

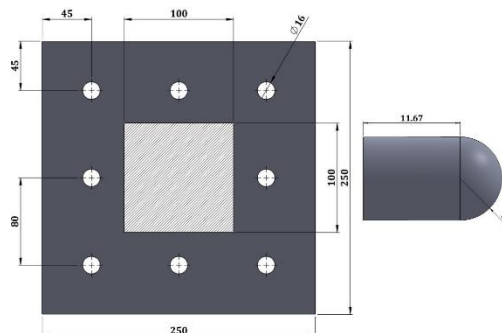


شکل ۸- دستگاه اسلحه گازی استفاده شده

^۱ Federal Railroad Administration (FRA) Ballistic Standards

۳- شبیه‌سازی عددی

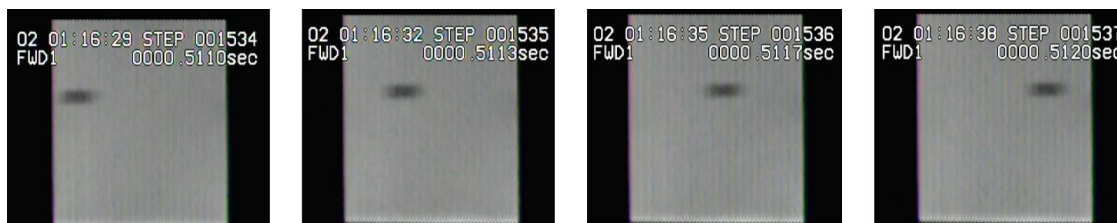
در این پژوهش از نرم افزار LS-DYNA جهت شبیه‌سازی ضربه سرعت بالا استفاده شده است. این نرم افزار برای پیش-بینی پاسخ سازه‌های گوناگون تحت بارگذاری‌های دینامیکی شامل بارهای ضربه‌ای، انفجاری و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. LS-DYNA از یک حل‌گر جهت انجام محاسبات و یک محیط پیش و پس‌پردازشگر برای مدل‌سازی هندسه، انجام مش‌بندی، مشاهده نتایج و تحلیل آن‌ها بهره می‌برد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گوناگونی در زمینه‌های هوانوردی، ساخت و ساز، دفاعی و پزشکی با استفاده از این نرم افزار انجام شده است که قدرت و موارد کاربرد آن را بیش از گذشته آشکار می‌کند [۲۱]. جهت ایجاد هدف (کامپوزیت مورد نظر) و گلوله در این نرم افزار، به ترتیب از المان‌های پوسته (Shell) و جامد (Solid) استفاده شده است. ابتدا در نرم‌افزار، صفحه کامپوزیتی هدف با ابعاد $120 \times 120 \times 1$ میلی‌متر و با استفاده از المان پوسته دو بعدی مدل شده و مش‌بندی آن به صورت یکنواخت و چهارگرمی با قابلیت اعمال بار داخل و خارج از صفحه انجام می‌شود و سپس با به کار بردن المان جامد سه بعدی با مش-بندی هشت گرمی، گلوله مورد نظر مدل می‌گردد. سپس، نوک پرتابه در فاصله ۱ میلی‌متری از صفحه قرار داده می‌شود. علت در نظر گرفتن فاصله ۱ میلی‌متری برای پرتابه از صفحه، کاهش دادن حجم محاسبات می‌باشد؛ چراکه در تست ضربه سرعت بالا فرض بر آن است که پرتابه بدون تاثیر پذیری از اصطکاک به صورت افقی به سمت هدف شلیک می‌شود، پس تا حد امکان در مدل‌سازی فاصله بین پرتابه تا هدف را کوتاه در نظر می‌گیریم تا از حجم محاسبات اضافی و بی‌تاثیر کاسته شده و زمان پردازش کوتاه تر شود. تصویر پرتابه و هدف در شکل ۱۲ آورده شده است.



(ب) ابعاد فیکسچر و گلوله به صورت شماتیکی

شکل ۱۰- تصاویر مربوط به (الف) فیکسچر استفاده شده و (ب) ابعاد فیکسچر و گلوله به صورت شماتیکی

پس از آنکه فشار گاز مخزن توسط یک شیر برقی (دیافراگم) آزاد شد، گلوله وارد لوله هدایت شونده دستگاه اسلحه‌گازی شده و درست قبل از برخورد به قطعه نمونه، سرعت ورودی آن توسط یک سنسور لیزری ثبت می‌گردد. در نهایت بعد از برخورد گلوله با هدف و عبور از آن، سرعت خروجی توسط یک دوربین سرعت بالا اندازه‌گیری می‌شود. روش کار این دوربین برای ثبت سرعت خروجی بر مبنای سایه نگاری می‌باشد. بدین صورت که یک منبع نور یکنواخت رو به روی دوربین و بر روی دستگاه اسلحه‌گازی نصب شده است و هنگامی که گلوله از قطعه نمونه خارج می‌شود، سایه آن توسط دوربین ضبط شده و با آنالیز نرم‌افزاری سرعت خروجی مشخص می‌شود. نمونه سایه نگاری انجام شده توسط این دوربین سرعت بالا جهت یافتن سرعت خروجی گلوله مطابق شکل ۱۱ می‌باشد. حال با داشتن سرعت ورودی و خروجی گلوله می‌توان عملکرد این کامپوزیت چهارلایه با ابعاد $120 \times 120 \times 1$ میلی‌متر و شرایط مرزی Clamped-clamped را تحت ضربه سرعت بالا با جزئیات مورد بررسی قرار داد.



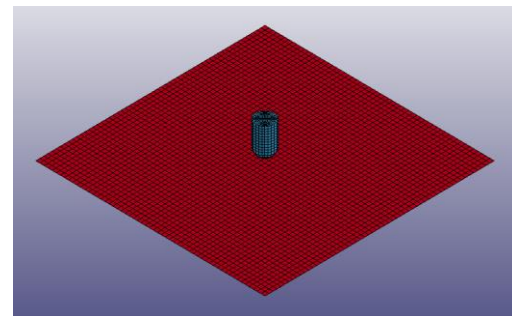
شکل ۱۱- استفاده از روش سایه نگاری جهت ثبت سرعت خروجی گلوله به وسیله دوربین سرعت بالا

با توجه به اینکه در تست ضربه سرعت بالا، صفحه یا هدف در داخل یک فیکسچر قرار گرفته و هر چهار لبه آن مقید می‌شود، در اینجا نیز شرایط مرزی کاملاً مقید برای هر چهار لبه صفحه مدل شده در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد ۵۷ المان در راستای x و y برای صفحه کامپوزیتی در نظر گرفته شده است که در مجموع باعث ایجاد ۳۲۴۹ المان برای این صفحه می‌شود. جهت اطمینان حاصل کردن از دقت جواب‌های بدست آمده با استفاده از این تعداد مش انجام شده، نحوه همگرایی سرعت خروجی پرتابه در مش‌های مختلف و همچنین استقلال جواب بدست آمده از مش‌بندی انجام شده در جدول ۱ برای سرعت ورودی ۱۲۰ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱- بررسی همگرایی جواب‌های بدست آمده و استقلال آن‌ها از مش‌بندی انجام شده

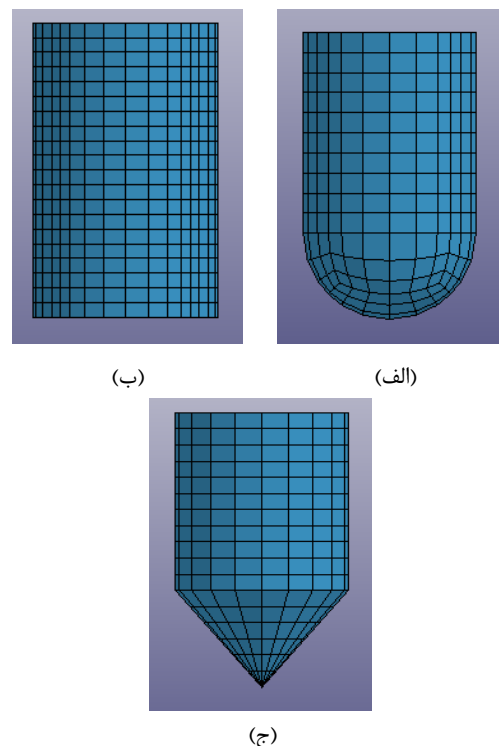
تعداد المان ها	تعداد کل المان های	سرعت خروجی پرتابه (متر بر ثانیه)	نوع دماغه گلوله
۵۰×۵۰	۲۵۰۰	۸۰/۳۳	کروی
۵۵×۵۵	۳۰۲۵	۸۲/۸۷	
۵۶×۵۶	۳۱۳۶	۸۳/۷۳	
۵۷×۵۷	۳۲۴۹	۸۴/۰۵	
۵۸×۵۸	۳۳۶۴	۸۴/۰۵	
۵۰×۵۰	۲۵۰۰	۶۷/۵۶	تخت
۵۵×۵۵	۳۰۲۵	۶۹/۰۳	
۵۶×۵۶	۳۱۳۶	۶۹/۹۲	
۵۷×۵۷	۳۲۴۹	۷۰/۲۸	
۵۸×۵۸	۳۳۶۴	۷۰/۲۸	
۵۰×۵۰	۲۵۰۰	۹۲/۳۹	مخروطی
۵۵×۵۵	۳۰۲۵	۹۴/۱۵	
۵۶×۵۶	۳۱۳۶	۹۵/۰۹	
۵۷×۵۷	۳۲۴۹	۹۵/۴۷	
۵۸×۵۸	۳۳۶۴	۹۵/۴۷	

مطابق این جدول می‌توان مشاهده کرد که سرعت خروجی گلوله در تعداد المان ۵۷ همگرا شده است و بعد از آن با ریزتر کردن اندازه مش‌ها تغییری در جواب بدست آمده ایجاد نشده است و با اینکار فقط به حجم محاسبات افزوده می‌شود. بنابراین تعداد ۵۷ المان در هر راستا و مجموع ۳۲۴۹ المان به عنوان



شکل ۱۲- تصویر صفحه کامپوزیتی و گلوله مدل شده همراه با مش‌بندی آن‌ها

در شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش، سه نوع گلوله با هندسه مختلف مدل‌سازی شده است که شامل گلوله سرکروی، گلوله سرتخت و گلوله مخروطی می‌باشد. این مدل‌ها همگی به گونه‌ای انجام شده است که دقیقاً از نظر ابعادی و وزنی مطابق آنچه در واقعیت و در شرایط آزمایشگاهی به کار می‌رود باشد. تصاویر این سه نوع گلوله مدل‌سازی شده در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.



شکل ۱۳- تصاویر گلوله‌های مدل‌سازی شده شامل (الف) گلوله سر کروی (ب) گلوله سرتخت و (ج) گلوله مخروطی

در این روابط، σ_{aa} ، σ_{bb} و σ_{ab} به ترتیب نشان‌دهنده تنش کششی، تنش فشاری و تنش برشی وارد شده به ماده در جهت الیاف می‌باشند. همچنین X_t و S_c نیز به ترتیب بیانگر استحکام کششی و برشی ماده در جهت الیاف هستند. در این روابط اگر $\beta = 1$ باشد معیار تخریب هشین و اگر برابر صفر باشد معیار تخریب ماکسیمم تنش بدست خواهد آمد. علاوه بر این، σ_{bb} ، Y_c و Y_t نیز به ترتیب مربوط به تنش وارد شده، استحکام کششی و استحکام فشاری ماده در راستای عمود بر الیاف می‌باشند. لازم به ذکر است که مدل ماده استفاده شده برای صفحه کامپوزیتی (MAT_54) توانایی پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های ارتوتروپیک هنگام کاهش مقاومت فشاری کامپوزیت در زمان تخریب ماده زمینه و همچنین در زمان رسیدن به مود شکست الیاف را دارا می‌باشد. این پیش‌بینی بر اساس دو معیار تخریب چانگ-چانگ و سای-وو^۳ انجام می‌شود که معیار سای-وو در مورد تخریب الیاف کاملاً مشابه با معیار چانگ-چانگ عمل کرده ولی در مورد تخریب ماده زمینه از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$e_{md}^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 + \frac{(Y_c - Y_t)\sigma_{bb}}{Y_t Y_c} \quad (5)$$

$$\rightarrow \begin{cases} e_{md}^2 \geq 0 \rightarrow \text{Failed} \\ e_{md}^2 < 0 \rightarrow \text{Elastic} \end{cases}$$

در نهایت با در نظر داشتن این موضوع که المان‌های مکعبی شکل از فرمول انتگرال‌گیری کاهش یافته بهره می‌برند، این احتمال وجود دارد که هنگام تغییر شکل موده‌های بدون انرژی یا با انرژی صفر^۴ ایجاد شود. در صورت ایجاد شدن این موده‌ها، المان‌ها تغییر شکل‌های نامناسب و غلط را تجربه کرده که همین امر می‌تواند سبب مختل شدن ادامه محاسبات شود و یا منجر به جواب نهایی کاملاً غلطی شود. لذا برای پیشگیری از این اتفاق، حتماً از اورگلس^۵ استفاده می‌کنیم که انجام این کار اطمینان حاصل می‌شود که موده‌های انرژی صفر اتفاق نیفتاده و جواب‌های دقیقی بدست خواهد آمد.

مش‌بندی مناسب و بهینه جهت انجام شبیه‌سازی ضربه سرعت بالا در این پژوهش انتخاب شده است.

در این شبیه‌سازی از مدل ماده جسم صلب^۱ (MAT_20) برای گلوله و از مدل ارتقا یافته خرابی کامپوزیت^۲ (MAT_54) به عنوان مدل ماده صفحه کامپوزیتی استفاده شده است. در این مدل ماده، مود تخریب در اثر نفوذ گلوله بر اساس معیار چانگ-چانگ محاسبه می‌شود [۲۲]. این معیار تخریب از چهار مکانیزم خرابی شامل کشش ماده زمینه، کشش الیاف، فشار ماده زمینه و فشار الیاف استفاده می‌کند که از روابط زیر بدست می‌آید. ابتدا برای تخریب الیاف تحت کشش و فشار به ترتیب داریم:

$$\sigma_{aa} > 0 \rightarrow e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$\rightarrow \begin{cases} e_f^2 \geq 0 \rightarrow \text{Failed} \\ e_f^2 < 0 \rightarrow \text{Elastic} \end{cases}$$

$$\sigma_{aa} < 0 \rightarrow e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{aa}}{X_c}\right)^2 - 1 \quad (2)$$

$$\rightarrow \begin{cases} e_c^2 \geq 0 \rightarrow \text{Failed} \\ e_c^2 < 0 \rightarrow \text{Elastic} \end{cases}$$

همچنین برای تخریب ماده زمینه تحت کشش و فشار نیز به ترتیب داریم:

$$\sigma_{bb} > 0 \rightarrow e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{bb}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \quad (3)$$

$$\rightarrow \begin{cases} e_m^2 \geq 0 \rightarrow \text{Failed} \\ e_m^2 < 0 \rightarrow \text{Elastic} \end{cases}$$

$$\sigma_{bb} < 0 \rightarrow e_a^2 = \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{bb}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{bb}}{2S_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{ab}}{S_c}\right)^2 - 1 \rightarrow \begin{cases} e_a^2 \geq 0 \rightarrow \text{Failed} \\ e_a^2 < 0 \rightarrow \text{Elastic} \end{cases} \quad (4)$$

³ Tsi-Wu

⁴ Zero energy deformation mode

⁵ Hourglass

¹ Rigid

² Enhanced composite damage



شکل ۱۴- مقایسه نحوه و میزان تخریب ایجاد شده در صفحه کامپوزیتی بر اساس (الف) شبیه سازی عددی و (ب) تست تجربی

مطابق این شکل دیده می‌شود که نحوه و میزان تخریب ایجاد شده در این صفحه کامپوزیتی در شبیه سازی عددی با تقریب بسیار خوبی مطابق آنچه در واقعیت و در تست تجربی ضربه سرعت بالا رخ داده است می‌باشد که تایید دیگری بر دقت و اعتبار مدل سازی انجام شده می‌باشد. از نظر ابعاد ناحیه تخریب شده نیز می‌توان دید که طول و عرض ناحیه تخریب شده در نمونه تجربی به ترتیب برابر ۲۴ و ۹ میلی‌متر بوده و در نمونه شبیه سازی شده برابر ۳۱ و ۱۱ میلی‌متر است. در حالت شبیه‌سازی عددی در مقایسه با نمونه‌های تست تجربی، درصد خطای حاصل شده در طول برابر ۲۹٪ و در عرض برابر ۲۲٪ می‌باشد. علت این موضوع در این است که در نمونه واقعی فقط ناحیه‌ای که به صورت کامل تخریب شده و سوراخ ایجاد شده است اندازه‌گیری شده است در حالیکه طول ناحیه آسیب دیده بیشتر از این مقدار است. بنابراین براساس داده‌های جدول ۱ و شکل ۱۴ و با مقایسه‌های انجام شده بین نتایج شبیه سازی عددی و تست تجربی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل سازی انجام شده از دقت کافی جهت پیش‌بینی پاسخ‌های صفحه کامپوزیتی موردنظر تحت ضربه سرعت بالا برخوردار می‌باشد.

۴-۲- نتایج مربوط به تست کشش

در این بخش نتایج حاصل از انجام تست کشش بر روی قطعات نمونه کامپوزیتی در دو راستای صفر و ۴۵ درجه بررسی خواهد شد. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نمودارهای تنش-کرنش بدست آمده از انجام این تست آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود هر کدام از این تست‌ها سه بار تکرار شده است تا از دقت و تکرارپذیری نتایج اطمینان حاصل شود.

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج بدست آمده از این پژوهش ارائه خواهد شد و مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج شبیه سازی عددی

ابتدا قبل از ارائه نتایج، دقت و اعتبار این نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی بررسی می‌شود. برای این منظور، ابتدا در جدول ۲ سرعت خروجی بدست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مقایسه گردیده و میزان اختلاف داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مشخص گردیده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه سازی عددی و آزمایش ضربه سرعت بالا برای پرتابه سرکروی

سرعت اولیه پرتابه (متر بر ثانیه)	سرعت خروجی پرتابه (متر بر ثانیه)		
	آزمایش تجربی	شبیه سازی عددی	درصد خطا (%)
۸۰	۳۲/۴	۳۵/۷۹	۱۰/۴
۱۰۰	۵۸/۸	۶۱/۶۷	۴/۸
۱۲۰	۷۹/۶	۸۴/۰۵	۵/۵
۱۴۰	۹۸	۱۰۴/۰۱	۶/۱

از آنجایی که تست تجربی ضربه سرعت بالا فقط برای گلوله سرکروی انجام شده است، در این جدول نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی مربوط به ضربه سرعت بالا با استفاده از گلوله سرکروی برای چهار سرعت اولیه مختلف که در تست تجربی نیز از این سرعت‌های اولیه استفاده گردیده، ارائه شده است. بر اساس این جدول می‌توان مشاهده کرد که نتایج شبیه‌سازی عددی به خوبی با نتایج و داده‌های تجربی مطابقت دارد و درصد خطای ایجاد شده چشمگیر و قابل توجه نبوده و در نتیجه صحت و دقت نتایج مربوط به سرعت خروجی گلوله در این شبیه سازی تایید می‌گردد.

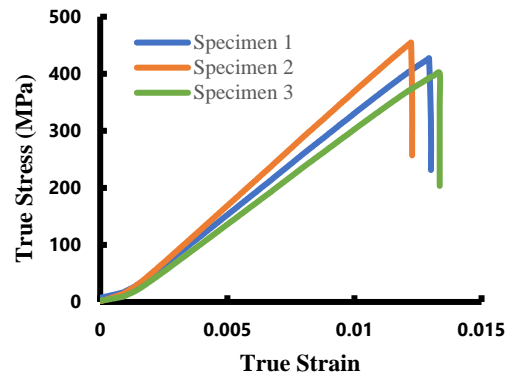
همچنین در شکل ۱۴ نحوه و میزان تخریب صورت گرفته در صفحه کامپوزیتی در اثر نفوذ گلوله سرکروی با سرعت ۱۲۰ متر بر ثانیه که از شبیه‌سازی عددی بدست آمده با تخریب واقعی صورت گرفته در تست تجربی مقایسه شده است.

به اینکه لایه چینی انجام شده برای این کامپوزیت به صورت صفر و ۹۰ درجه متقارن می‌باشد، پس خواص مکانیکی این کامپوزیت در جهات ۱ و ۲ مشابه و یکسان بوده و به همین جهت داشتن خواص در یکی از این جهات برای انجام شبیه‌سازی کفایت می‌کند.

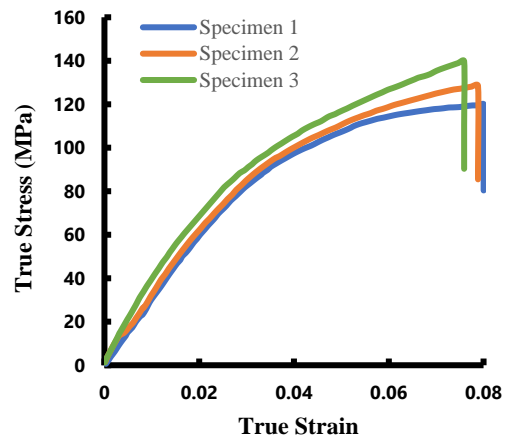
جدول ۳- خواص مکانیکی کامپوزیت پلی‌فنیلن سولفاید تقویت شده با الیاف کربن

تست کشش		خواص مکانیکی
در زاویه ۴۵ درجه	در زاویه صفر درجه	
۱۳۰	۴۰۰	استحکام (MPa)
۴/۴	۳۱/۸۸	مدول الاستیک (GPa)
۰/۱۷	۰/۱۷	ضریب پواسون
۶/۸	۲/۷	چگرمگی (MJ/m ³)
۰/۰۷۸	۰/۰۱۳	کرنش شکست
۱/۱۷	۱/۱۷	مدول برشی (GPa)

۳-۴ نتایج عددی و تجربی مربوط به ضربه سرعت بالا در این بخش نتایج حاصل شده از انجام تست ضربه سرعت بالا بر روی قطعات نمونه آورده شده و مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در گام اول، نمودار سرعت-زمان گلوله برای چهار سرعت ورودی مختلف و با در نظر گرفتن سه نوع گلوله مختلف در شکل ۱۷ ترسیم شده است. در این شکل، در اولین لحظه‌ای که سرعت گلوله شروع به ثابت شدن کرده است بدین معناست که گلوله به طور کامل صفحه کامپوزیتی را سوراخ کرده و از آن به طور کامل عبور کرده است که به این سرعت پس از عبور کامل از هدف، سرعت خروجی گلوله می‌گویند. حال براساس این شکل دیده می‌شود که هرچه سرعت ورودی گلوله افزایش یافته است، سرعت خروجی آن هم بیشتر بوده است و این منجر به کاهش زمان نفوذ کامل گلوله شده است. همچنین می‌توان دریافت که کمترین سرعت خروجی در تمامی سرعت‌های ورودی به ترتیب مربوط به گلوله سرتخت، سرکروی و مخروطی بوده است که این پایین بودن سرعت خروجی نشان دهنده میزان جذب انرژی بالا می‌باشد. دلیل اینکه گلوله سرتخت کمترین سرعت خروجی را داشته است به بیشتر بودن سطح تماس آن به هدف کامپوزیتی برمی‌گردد که باعث می‌شود تا سطح بیشتری تخریب شده و این تخریب بیشتر اثر خود را در افزایش میزان انرژی جذب شده می‌گذارد و جذب انرژی را افزایش می‌دهد [۲۳].



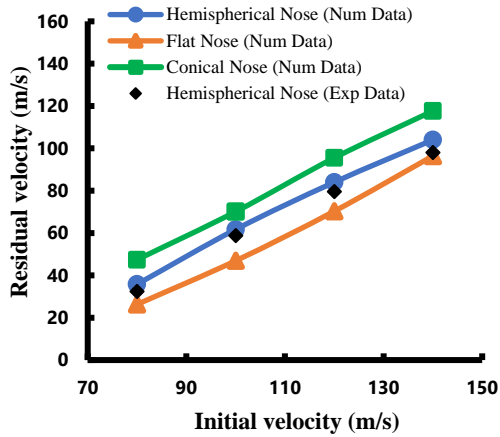
شکل ۱۵- نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش در زاویه‌ی صفر درجه



شکل ۱۶- نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش در زاویه‌ی ۴۵ درجه

براساس شکل‌های بالا می‌توان به وضوح مشاهده کرد که کامپوزیت ترموپلاستیک ساخته شده رفتار تردی از خود نشان داده است. اما استحکام کششی بدست آمده عدد قابل توجهی را نشان می‌دهد که بیان کننده سفتی بسیار بالای این کامپوزیت می‌باشد. همین سفتی بالا هنگامی که گلوله به این قطعات نمونه برخورد کند، در هنگامی که الیاف و ماده زمینه تحت کشش قرار می‌گیرند به خوبی می‌توان در برابر نفوذ گلوله مقاومت کرده و از انرژی آن بکاهد. خواص مکانیکی استخراج شده از این تست و این دو نمودار در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است خواص برشی داخل صفحه این کامپوزیت براساس استاندارد ASTM D7078 بدست آمده است. با توجه

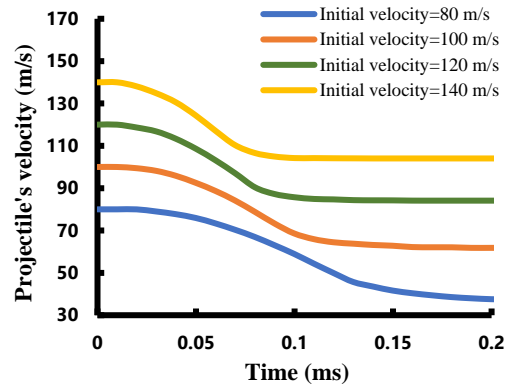
در شکل ۱۸، نمودار سرعت خروجی گلوله بر حسب سرعت ورودی آن سه نوع گلوله مختلف نمایش داده شده است. همچنین داده‌های تجربی مربوط به گلوله سرکروی نیز در این نمودار مشخص شده است.



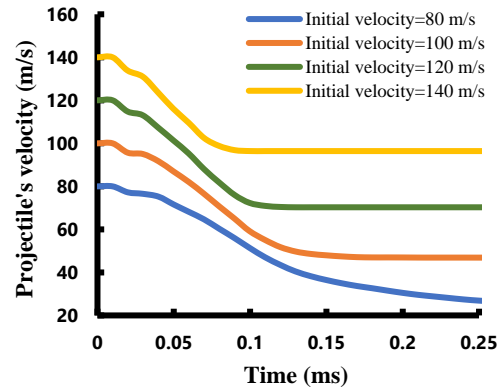
شکل ۱۸- نمودار سرعت خروجی گلوله‌های مختلف بر حسب سرعت ورودی آن‌ها

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، سرعت خروجی انواع گلوله‌های مختلف رابطه تقریباً خطی با سرعت ورودی این گلوله‌ها داشته است. یعنی هرچه سرعت ورودی افزایش یافته به تبع آن سرعت خروجی گلوله‌ها نیز افزایش یافته است. این بدان معناست که هرچه سرعت اولیه گلوله‌ها افزایش یابد، صفحه کامپوزیتی مقاومت کمتری از خود نشان داده و اختلاف بین سرعت ورودی و خروجی پرتابه‌ها نیز کاهش می‌یابد [۲۴]. همچنین مطابق این شکل می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین میزان سرعت خروجی مربوط به گلوله مخروطی بوده است که با سرعت ۱۴۰ متر بر ثانیه به سمت هدف کامپوزیتی شلیک شده است. در طرف مقابل، کمترین سرعت خروجی و متناظر آن بیشترین میزان انرژی جذب شده مربوط به سرعت ورودی ۸۰ متر بر ثانیه و گلوله سر تخت بوده است. علاوه بر این، در این شکل می‌توان دید که داده‌های تجربی از تطابق مناسبی با داده‌های شبیه‌سازی عددی برخوردار است.

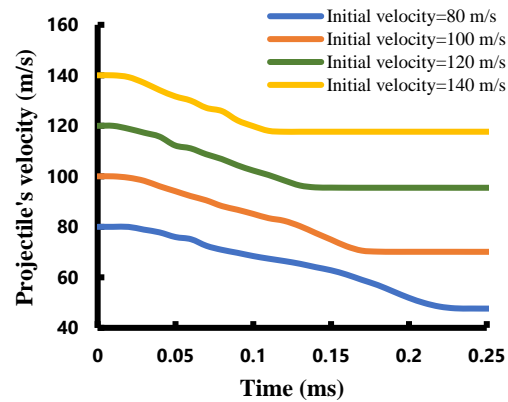
در شکل ۱۹، درصد بازدهی میزان انرژی جذب شده از گلوله‌های مختلف در سرعت‌های ورودی متفاوت بررسی شده است.



(الف) گلوله سرکروی

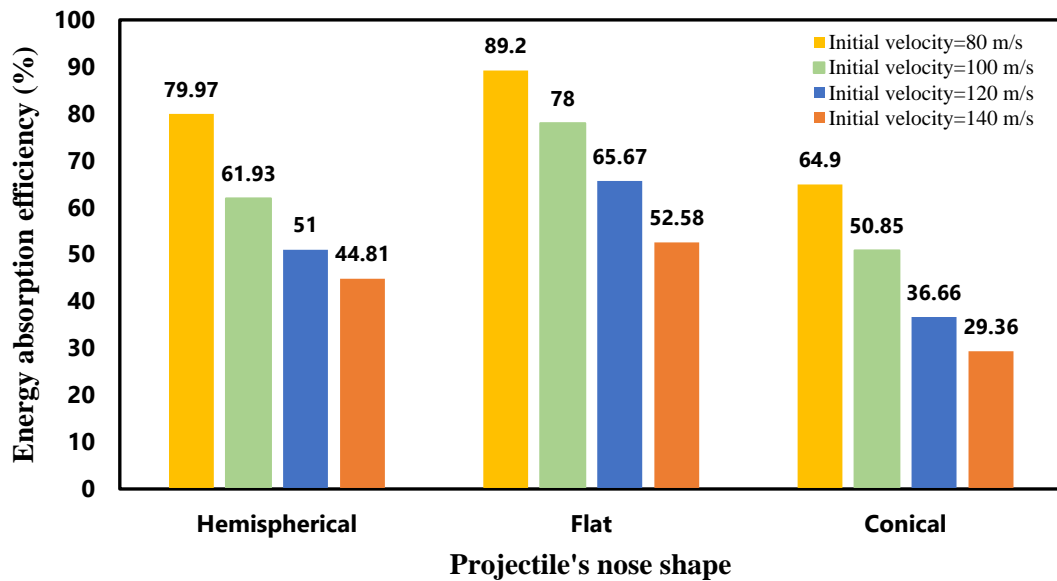


(ب) گلوله سر تخت



(ج) گلوله مخروطی

شکل ۱۷- نمودار سرعت-زمان گلوله با در نظر گرفتن چهار سرعت ورودی مختلف برای انواع (الف) سرکروی، (ب) سر تخت و (ج) مخروطی



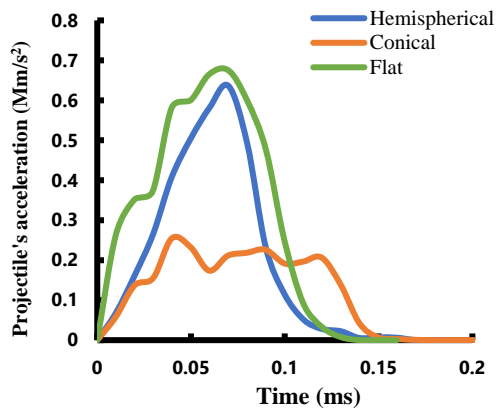
شکل ۱۹- درصد بازدهی جذب انرژی صفحه کامپوزیتی از سه نوع گلوله با در نظر گرفتن چهار سرعت ورودی مختلف

گلوله مخروطی کمترین میزان بازدهی انرژی را داشته است. همانطور که در مورد گلوله سرتخت توضیح داده شد، گلوله سر کروی نیز دارای سطح تماس بیشتری با هدف در مقایسه با گلوله مخروطی می‌باشد که باعث شده نیز سطح آسیب بیشتر و در نتیجه جذب انرژی هم بالاتر باشد. همچنین همانطور که در شکل های ۱۷ و ۱۸ نیز مشاهده شد، گلوله مخروطی دارای بالاترین میزان سرعت خروجی در بین سایر گلوله ها بوده است که با مقایسه با شکل ۱۹ درمی‌یابیم که هرچه سرعت خروجی گلوله بیشتر باشد، آسیب وارد شده به هدف کمتر بوده، گلوله راحت تر در هدف نفوذ کرده و در نتیجه میزان انرژی جذب شده از گلوله پایین خواهد بود. پس نتیجه گرفته می‌شود که جسم یا نفری که در پشت این صفحه کامپوزیتی بوده و در معرض گلوله مخروطی باشد، بیشترین آسیب را در مقایسه با سایر گلوله‌ها خواهد دید. چراکه صفحه هدف در مقابل این گلوله عملکرد خوبی نداشته و نتوانسته به میزان مطلوبی انرژی آن را جذب کند. در نتیجه گلوله مخروطی با حداکثر انرژی از هدف رد شده و به جسم و افراد پشت آن اصابت می‌کند. اما این موضوع در مورد گلوله سر تخت برعکس بوده و می‌توان گفت که صفحه کامپوزیتی جذب انرژی قابل توجهی از این گلوله داشته به طوری که در سرعت ورودی ۸۰ متر بر ثانیه حدود ۹۰٪ از انرژی گلوله توسط این صفحه کامپوزیتی جذب

نحوه محاسبه بازدهی انرژی در شکل بالا برای این صفحه کامپوزیتی براساس رابطه زیر بوده است [۲۵]:

$$EAE = \frac{V_i^2 - V_r^2}{V_i^2} \quad (۶)$$

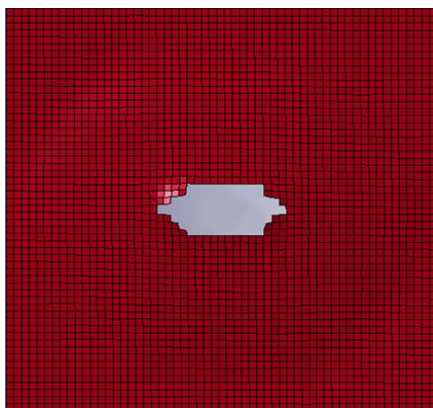
که در این رابطه EAE مخفف بازدهی جذب انرژی (Energy Absorption Efficiency) است. همچنین V_i و V_r به ترتیب نشان دهنده سرعت ورودی و خروجی گلوله‌ها می‌باشد. براساس این شکل می‌توان نتیجه گرفت که این صفحه کامپوزیتی در همه سرعت‌های اولیه (ورودی) بیشترین میزان انرژی را از گلوله سرتخت جذب کرده و در مقابل این گلوله بهترین عملکرد را داشته است. علت این موضوع این است که گلوله سرتخت هنگام برخورد با صفحه کامپوزیتی دارای سطح تماس بیشتری با هدف می‌باشد و همین امر سبب می‌شود تا ناحیه آسیب دیده و تخریب شده در هدف بیشتر شده و در نتیجه آن گلوله انرژی بیشتری را صرف تخریب این ناحیه گسترده کند. در نهایت انرژی گلوله برای نفوذ در هدف کمتر شده و باعث می‌شود که اگر هم گلوله بتواند به طور کامل در هدف نفوذ کرده و از آن رد شود، این عبور با افت سرعت و از دست دادن انرژی زیادی همراه باشد. بعد از گلوله سرتخت، بالاترین بازدهی انرژی مربوط به گلوله سرکروی بوده و سپس



شکل ۲۰- نمودار شتاب-زمان گلوله های شلیک شده به صفحه کامپوزیتی با سه نوع هندسه مختلف

براساس شکل فوق، می توان نتیجه گرفت که هرچه میزان سطح تماس گلوله در هنگام برخورد با هدف بیشتر بوده و در نتیجه هرچه هدف جذب انرژی بالاتری از هدف داشته است، به همان میزان تغییرات شتاب گلوله ها نیز بیشتر بوده است و به همین دلیل است که گلوله مخروطی کمترین و گلوله سر تخت بیشترین میزان تغییر شتاب را داشته اند.

جهت بررسی میزان آسیب وارد شده به این صفحه کامپوزیتی و نحوه تخریب آن بعد از برخورد پرتابه های با هندسه مختلف، شکل ۲۱ تهیه شده است.



الف) گلوله سر تخت

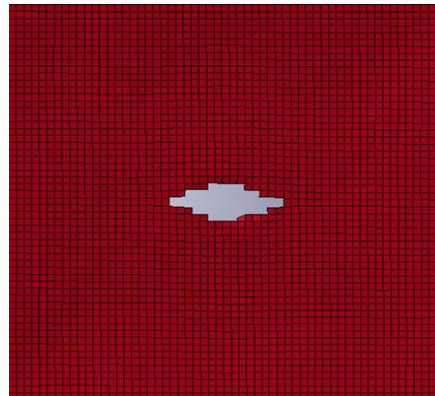
شده است که به تبع هنگامی که گلوله از این هدف عبور می کند آسیب جدی برای جسم و افراد قرار گرفته در پشت آن نخواهد داشت. علت دیگری که باعث شده تا این عملکرد مطلوب در برابر گلوله سر تخت حاصل شود این است که سطح تماس بیشتر این گلوله با هدف سبب می شود تا الیاف کربن به کار رفته در صفحه کامپوزیتی و همچنین ماده زمینه پلی فنیلن سولفاید که هردو دارای استحکام کششی بالایی می باشند، تحت کشش قرار بگیرند. طبیعی است که در این حالت این صفحه کامپوزیتی به دلیل داشتن استحکام کششی بالا مقاومت خوبی در برابر کشیدگی از خود نشان داده و مانع نفوذ راحت گلوله می شود. نکته دیگری که از شکل ۱۹ بدست می آید، این است که هرچه سرعت ورودی همگی گلوله ها کاهش یافته، در مقابل بازدهی جذب انرژی بالا رفته است. این موضوع هم با نگاه به سرعت خروجی گلوله ها قابل توجه است و هم با بررسی عملکرد بالستیکی صفحه کامپوزیتی. در مورد اول، براساس شکل ۱۸، دیده شد که هرچه سرعت ورودی کاهش می یابد سرعت خروجی گلوله ها نیز کاهش یافته است و در نتیجه هرچه سرعت خروجی پایین تر باشد، جذب انرژی از آن گلوله بالاتر است. اما در مورد عملکرد بالستیکی صفحه کامپوزیتی می توان گفت که هرچه سرعت ورودی گلوله ها کاهش می یابد، این سرعت به حد بالستیکی صفحه کامپوزیتی نزدیک تر شده که در آن سرعت گلوله هدف را به طور کامل سوراخ می کند اما از آن عبور نمی کند (یعنی بازدهی جذب انرژی ۱۰۰٪). پس طبیعی است هرچه به حد بالستیکی صفحه کامپوزیتی نزدیک می شویم، میزان جذب انرژی نیز افزایش یابد.

نمودار شتاب-زمان سه نوع گلوله مختلف (سرکروی، سر تخت و مخروطی) با سرعت اولیه ۱۲۰ متر بر ثانیه در شکل ۲۰ ارائه شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود گلوله های سر تخت، سرکروی و مخروطی به ترتیب بیشترین میزان تغییر شتاب را داشته اند. شتاب گلوله قبل از اینکه به هدف برخورد کند و همچنین بعد از نفوذ کامل در هدف و عبور از آن، به علت داشتن سرعت ثابت صفر می باشد. بنابراین تمام تغییرات شتاب از لحظه تماس گلوله با هدف تا زمانی که گلوله هدف را سوراخ کرده و از آن عبور می کند می باشد.

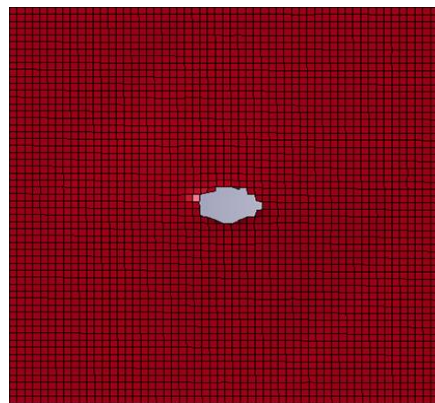
انرژی بیشتری از پرتابه جذب شده است. دلیل این موضوع این است که تخریب بیشتر نشان می‌دهد که انرژی پرتابه با پخش شدن تنش، سبب تخریب هدف شده و هرچه سطح تخریب بیشتر باشد نشان دهنده این است که پرتابه انرژی بیشتری صرف این تخریب کرده و در نتیجه انرژی بیشتری از آن مستهلک گردیده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، میزان جذب انرژی و نحوه عملکرد کامپوزیت چهار لایه ترموپلاستیک حاوی ماده زمینه پلی فنیلن سولفاید و الیاف کربن تحت ضربه سرعت بالای سه نوع گلوله مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت این کامپوزیت ترموپلاستیک، از تحت پرس گرم قرار دادن چهار لایه پیش آغشته حاوی پلی فنیلن سولفاید و الیاف کربن استفاده شده است. در نهایت، ورق ایجاد شده حاوی ۶۰٪ الیاف کربن و ۴۰٪ ماده زمینه پلی فنیلن سولفاید می‌باشد. کامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش دارای لایه چینی متقارن [۰/۹۰] و ضخامت کل ۱ میلی‌متر بوده است که رفتار آن تحت ضربه گلوله‌های سرکروی، سرتخت و مخروطی قرار با چهار سرعت ورودی مختلف شامل ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ متر بر ثانیه مورد ارزیابی قرار گرفت. قسمت تجربی و آزمایشگاهی این پژوهش شامل ساخت قطعات نمونه، انجام تست کشش در دو زاویه صفر و ۴۵ درجه و انجام تست ضربه سرعت بالا بوده است. همچنین بخش شبیه‌سازی عددی این پژوهش در نرم افزار المان محدود LS-DYNA انجام شده که نتایج آن با داده‌های تجربی مقایسه شده و صحت و اعتبار آن تایید گردیده است. در بخش خواص مکانیکی که از تست کشش بدست آمد، نشان داده شد که کامپوزیت ساخته شده دارای استحکام بسیار بالایی بوده و توانایی تحمل بارهای کششی قابل توجهی در مقایسه با وزن بسیار سبک خود را دارد. همچنین با استفاده از نتایج بدست آمده از تست و شبیه‌سازی ضربه سرعت بالا، مشاهده گردید که کامپوزیت مورد مطالعه بهترین عملکرد را در مواجهه با گلوله سر تخت داشته است و توانسته بیشترین میزان انرژی را از این گلوله جذب کند به طوری که بازدهی جذب انرژی آن برای سرعت اولیه ۸۰ متر بر ثانیه حدود ۹۰٪ بوده است. بعد از این نوع گلوله، گلوله‌های سرکروی و مخروطی به ترتیب



(ب) گلوله سرکروی



(ج) گلوله مخروطی

شکل ۲۱- نحوه تخریب و میزان آسیب وارد شده به صفحه کامپوزیتی بعد از شلیک سه نوع پرتابه مختلف

در شکل فوق، ناحیه تخریب شده از صفحه کامپوزیتی مورد مطالعه تحت شلیک سه نوع پرتابه مختلف با سرعت ۱۲۰ متر بر ثانیه ارائه شده است. مطابق این شکل، می‌توان دید که صفحه کامپوزیتی بیشترین میزان تخریب را تحت شلیک پرتابه سر تخت تجربه کرده و پس از آن پرتابه سرکروی قرار دارد و در نهایت پرتابه مخروطی کمترین آسیب را در مقایسه با سایر پرتابه‌ها وارد کرده است. با توجه به نتایج ارائه شده در قسمت‌های قبلی که نشان داده شد که صفحه کامپوزیتی بیشترین میزان جذب انرژی را به ترتیب از پرتابه سر تخت، سرکروی و مخروطی داشته است، این شکل نیز ضمن تایید این موضوع، نشان می‌دهد که این میزان جذب انرژی رابطه مستقیم با تخریب ایجاد شده در هدف دارد؛ به این صورت که هرچه میزان تخریب ایجاد شده در هدف بیشتر باشد، به این معنی است که

- sulfide composites via grafting multi-walled carbon nanotubes. *RSC advances*. 9(56): p. 32634-32643.
- [6] Wu, Y., et al. (2019) Improved mechanical properties of graphene oxide/short carbon fiber-polyphenylene sulfide composites. *Polymer Composites*. 40(10): p. 3866-3876.
- [7] Reddy, P.R.S., et al., Effect of viscoelastic behaviour of glass laminates on their energy absorption subjected to high velocity impact. *Materials & Design*, 2016. 98: p. 272-279.
- [8] Liu, L., et al. (2018) An experimental investigation on high velocity impact behavior of hygrothermal aged CFRP composites. *Composite Structures*, 204: p. 645-657.
- [9] Deka, L., S. Bartus, and U. Vaidya (2008) Damage evolution and energy absorption of E-glass/polypropylene laminates subjected to ballistic impact. *J. mate. sci.*, 43: p. 4399-4410.
- [10] Heimbs, S., et al. (2014) High velocity impact on preloaded composite plates. *Composite Structures*, 111: p. 158-168.
- [11] Ignatova, A., O. Kudryavtsev, and M. Zhikharev (2020) Influence of glass surface polymer coating on ballistic impact response of multi-layered fabric composites: Experimental and numerical study. *International J. Impact Eng.*, 144: p. 103654.
- [12] da Silva, A.A.X., et al. (2021) High-velocity impact behavior of aramid/S2-glass interply hybrid laminates. *Applied Composite Materials*, 28(6): p. 1899-1917.
- [13] Delavari, K. and A. Safavi, The effect of stacking sequence on high-velocity impact resistance of hybrid woven reinforced composites: experimental study and numerical simulation. *Fibers and Polymers*, 2022: p. 1-12.
- [14] Cantwell, W.J. and J. Morton (1991) The impact resistance of composite materials—a review. *composites*, 1991. 22(5): p. 347-362.
- [15] Singh, N.K. and K. Singh (2015) Review on impact analysis of FRP composites validated by LS-DYNA. *Polymer Composites*, 36(10): p. 1786-1798.
- [16] Barauskas, R. and A. Abraitienė (2007) Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA. *Int. J. impact eng.*, 34(7): p. 1286-1305.
- [17] Camanho, P.P., et al (2008) A numerical material model for predicting the high velocity impact
- بیشترین انرژی را برای نفوذ و عبور از این کامپوزیت صرف کرده‌اند. همچنین نشان داده شد که هرچه سرعت ورودی پرتابه کاهش یافته است، سرعت خروجی آن نیز کاهش یافته و در نتیجه آن میزان جذب انرژی از گلوله بالاتر رفته و بازدهی جذب انرژی کامپوزیت مورد مطالعه بیشتر شده است. به طور کلی بیشترین میزان انرژی جذب شده از گلوله سرتخت با سرعت اولیه ۸۰ متر بر ثانیه و کمترین میزان آن از گلوله مخروطی با سرعت ۱۴۰ متر بر ثانیه بوده است. با ارائه شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش که از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است، می‌توان رفتار کامپوزیت‌های ترموپلاستیک حاوی پلی فنیلن سولفاید و الیاف کربن تحت ضربه سرعت بالا را راحت‌تر پیش‌بینی کرد که این مورد می‌تواند بسیار به طراحی هدفمند این قطعات کامپوزیتی کمک کند. در نهایت نتایج این پژوهش نشان داد که کامپوزیت ترموپلاستیک ساخته شده مورد مطالعه با داشتن خواص بی‌نظیری از جمله ظرفیت بالا در جذب انرژی از گلوله‌های مختلف، نسبت استحکام به سفتی بالا، خواص مکانیکی عالی و قابلیت بازیافت می‌تواند گزینه بسیار مناسبی برای سازه‌های ضدگلوله و تمامی کاربردهایی که نیاز به سازه‌های سفت و محکم و در عین حال با وزن پایین نیاز هست بوده و نیاز صنعتی و نظامی به چنین سازه‌هایی را برآورده کند.

مراجع

- [1] Li, H., et al. (2014) Synthesis and characterization of novel poly (phenylene sulfide) containing a chromophore in the main chain. *Polymer international*. 63(9): p. 1707-1714.
- [2] Zhao, L., et al. (2019) High-performance polyphenylene sulfide composites with ultra-high content of glass fiber fabrics. *Composites Part B: Engineering*. 174: p. 106790.
- [3] Deng, J., et al. (2022) Thermal aging effects on the mechanical behavior of glass-fiber-reinforced polyphenylene sulfide composites. *Polymers*. 14(7): p. 1275.
- [4] Jiang, T., et al. (2017) Rheological and mechanical properties of polyphenylene sulfide reinforced with round and rectangle cross-section glass fibers. *High Performance Polymers*, 29(7): p. 849-856.
- [5] Li, J., et al. (2019) Improving interfacial and mechanical properties of glass fabric/polyphenylene

- [22] Chang, F.-K. and K.-Y. Chang (1987) Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure. *J. Compo. Mate.*, 21(9): p. 809-833.
- [23] Khodadadi, A., et al. (2019) Numerical and experimental study of impact on hyperelastic rubber panels. *IRI. Poly. J.*, 28: p. 113-122.
- [24] Asemani, S.S., et al. (2021) The experimental and numerical analysis of the ballistic performance of elastomer matrix Kevlar composites. *Polymer Testing*, 2021. 102: p. 107311.
- [25] Haro, E.E., A.G. Odeshi, and J.A. Szpunar (2016) The energy absorption behavior of hybrid composite laminates containing nano-fillers under ballistic impact. *Int. J. Imp. Eng.*, 96: p. 11-22.
- behaviour of polymer composites. in *Mechanical Response of Composites*. Springer.
- [18] Ansari, M.M. and A. Chakrabarti (2016) Impact behavior of FRP composite plate under low to hyper velocity impact. *Composites Part B: Engineering*, 95: p. 462-474.
- [19] Yen, C.-F., et al. (2020) Modeling and simulation of carbon composite ballistic and blast behavior. *J. Compo. Mate*, 54(4): p. 485-499.
- [20] Mousavi, M.V. and H. Khoramishad (2020) Investigation of energy absorption in hybridized fiber-reinforced polymer composites under high-velocity impact loading. *Int. J. Imp. Eng*, 146: p. 103692.
- [21] Lee, R., (2019) *LS-DYNA for Engineers: A Practical Tutorial Book* :BW Publications.