



تحلیل تجربی و عددی ضربه سرعت بالا روی صفحات کامپوزیتی کولار/اپوکسی

امین خدادادی¹، غلامحسین لیاقت^{2*}، حامد احمدی³، علیرضا بهرامیان⁴، داود شاهقلیان قهفرخی¹، یاور عنانی⁵،

سیده سمانه آسمانی¹

- 1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 - 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 - 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 - 4- دانشیار، مهندسی پلیمر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
 - 5- دانشجوی فوق دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
- * تهران، 14115-141، Ghlia530@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله عملکرد بالستیکی چندلایه‌های کامپوزیتی دو و چهار لایه ساخته شده از پارچه کولار و رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها با استفاده از روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده و تحت آزمایش ضربه بالستیک قرار گرفت. حد بالستیک و انرژی جذب شده، به عنوان معیاری از عملکرد بالستیکی صفحات کامپوزیتی ارزیابی گردید. آزمایش‌ها با استفاده از پرتابه استوانه‌ای سرکروی و در محدوده سرعت 20-120 متر بر ثانیه انجام شد. نحوه خرابی و شکست نمونه‌های کامپوزیت مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینا، ضربه سرعت بالا روی صفحات کامپوزیتی شبیه‌سازی شده است. بدین منظور، مدل دقیقی از پرتابه و هدف تهیه شد. لایه‌های کامپوزیت بصورت مجزا مدل‌سازی و با اعمال قیود مناسب به هم متصل گردید. این مدل عددی، با دقت خوبی می‌تواند سرعت حد بالستیک هدف‌های کامپوزیتی را تعیین نماید. حداکثر خطا برای نمونه‌های 2 و 4 لایه به ترتیب 6 و 10 درصد می‌باشد. به منظور بررسی اثر شکل دماغه پرتابه بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت کولار/اپوکسی، شبیه‌سازی نفوذ با استفاده از دو پرتابه سرکروی و سرتخت در سرعت‌های مختلف انجام شد و حد بالستیک و انرژی جذب شده برای دو نوع پرتابه مقایسه گردید. حد بالستیک برای کامپوزیت دو و چهار لایه تحت ضربه پرتابه سرتخت، به ترتیب 32.5 و 43.7 می‌باشد که نسبت به پرتابه سرکروی 14 و 16 درصد افزایش دارد.

اطلاعات مقاله

دریافت: 97/04/19

پذیرش: 97/07/07

کلیدواژگان:

ضربه سرعت بالا
کامپوزیت کولار/اپوکسی
حد بالستیک
ال اس داینا
شکل دماغه پرتابه

Experimental and numerical analysis of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates

Amin Khodadadi¹, Gholamhossein Liaghat^{1*}, Hamed Ahmadi¹, Alireza Bahramian², Davoud Shahgholian-Ghahfarokhi¹, Yavar Anani¹ and S. Samane Asemani¹

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Department of Polymer Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-141, Tehran, Iran, Ghlia530@modares.ac.ir

Keywords

High velocity impact
Kevlar/Epoxy composite
Ballistic limit
Ls-Dyna
Projectile nose shape

Abstract

In this paper, the ballistic performance of two and four-layer composite plates made of Kevlar fabric and epoxy has been investigated. Composite samples were made by hand-laying method and ballistic tests were conducted. The ballistic limit and absorbed energy were evaluated as a criteria of the ballistic performance of composite plates. Experiments were carried out using a hemispherical projectile in a velocity range of 20-120 m/s. Damage and failure of composites was evaluated. Also, using the LS-DYNA software, high velocity impact simulation on composite plates was performed. So, a precise model of projectile and target was prepared. The composite layers are individually modeled and connected to each other by appropriate constraints. This numerical model can accurately determine the ballistic limit of composite targets. Maximum error was 6 and 10% for 2 and 4 layer composites respectively. In order to investigate the effect of the projectile shape on the ballistic performance of the Kevlar/Epoxy composite, simulation was carried out using a hemispherical and blunt projectile at different velocities and ballistic limit and absorbed energy for two types of projectiles were compared. The ballistic limit for 4 and four-layer composites under impact of blunt projectile is 32.5 and 43.7 m/s, which is 14 and 16% higher than the hemispherical projectile.

Please cite this article using:

Khodadadi, A., Liaghat, Gh., Ahmadi, H., Bahramian, A., Shahgholian-Ghahfarokhi, D., Anani, Y., Asemani, S.S., "Experimental and numerical analysis of high velocity impact on Kevlar/Epoxy composite plates", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 2, pp. 265-274, 2019.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

امروزه استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف، به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فردشان نسبت به مواد یکپارچه و افزایش رقابت در بازارهای جهانی برای ساخت قطعات سبک، در بسیاری از کاربردهای مهندسی با فناوری پیشرفته، توسعه پیدا کرده است. مزایای خاص کامپوزیت‌ها در مقایسه با فلزات، نظیر نسبت استحکام و سفتی به وزن زیاد، مقاومت خستگی، مقاومت خوردگی و خواص ضربه‌ای، آن‌ها را برای استفاده در بسیاری از اجزای سازه‌های خودروها، هواپیماها و کشتی‌ها مورد توجه فراوان قرار داده است [1]. در بسیاری موارد، اولویت انتخاب با مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف است. الیاف پلیمری با مقاومت بالا از جمله کولار و تاورن، از جمله مواد پیشرو در بارگذاری ضربه‌ای مطرح می‌باشند و تاکنون مطالعات فراوانی روی خواص ضربه‌ای این مواد انجام شده است [2-4].

بارگذاری ضربه‌ای را می‌توان به دو بخش سرعت پایین و سرعت بالا تقسیم‌بندی کرد. ضربه سرعت پایین زمانی اتفاق می‌افتد که دوره تناوب ضربه پرتابه بزرگتر از دوره تناوب کوچکترین مد ارتعاشی باشد. در این حالت، شرایط تکیه‌گاهی مهم هستند زیرا امواج تنش ایجاد شده در خارج از منطقه ضربه، زمان کافی برای رسیدن به انتهای هدف را دارند. در حالیکه در برخورد سرعت بالا دوره تناوب ضربه پرتابه به مقدار قابل توجهی کمتر از زمان دوره تناوب کوچکترین مد ارتعاشی می‌باشد. در نتیجه صفحه هدف توسط رفتار موضعی ماده در نزدیکی محل برخورد از خود پاسخ می‌دهد. معمولاً در این حالت پاسخ هدف وابسته به شرایط تکیه‌گاهی نیست.

در یک ضربه سرعت بالا ممکن است حالت‌های زیر اتفاق بیفتد:

1- پرتابه هدف را سوراخ کرده و با یک سرعت معین از آن خارج می‌شود. در این حالت انرژی اولیه پرتابه بیشتر از انرژی است که هدف می‌تواند جذب کند.

2- پرتابه به طور جزئی در هدف نفوذ می‌کند. در این حالت انرژی اولیه پرتابه کمتر از انرژی نفوذ هدف می‌باشد. پرتابه در این حالت متناسب با خواص ماده هدف می‌تواند در آن فرو رود یا اینکه از روی آن پس‌زده شود.

3- پرتابه به‌طور کامل هدف را سوراخ می‌کند و سرعت خروجی آن صفر می‌شود. در این حالت سرعت اولیه پرتابه، حد بالستیک نامیده می‌شود. در این حالت انرژی اولیه پرتابه به‌طور کامل توسط هدف جذب می‌شود.

تعداد مطالعات زیادی در زمینه ضربه و نفوذ بر روی کامپوزیت‌های ساخته شده از پارچه و ماتریس در دو دهه اخیر انجام شده است [5-11]. در این مطالعات به عملکرد بالستیکی کامپوزیت پرداخته شده و مکانیزم‌های تخریب کامپوزیت شامل لایه لایه‌شدگی، از هم‌گسیختگی الیاف و شکست ماتریس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین عوامل مؤثر بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت مطالعه شده است. این مطالعات به روش‌های تجربی، عددی و تحلیلی انجام شده است.

تقی‌پور و همکاران [12] یک مدل تحلیلی برای پدیده برخورد و نفوذ در اهداف کامپوزیتی ارائه کردند که با بررسی مکانیزم‌های جذب انرژی و مقایسه با انرژی کل گلوله در هنگام برخورد، انرژی باقی‌مانده پرتابه را پس از خروج از هدف پیش‌بینی می‌کند. با اضافه شدن مکانیزم‌های جذب انرژی جدید شامل انرژی جذب شده ناشی از تغییر مکان راس مخروط تحت نیروی گلوله، انرژی جذب شده در تغییر شکل الاستیک-پلاستیک الیاف اولیه و انرژی جذب شده ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گلوله و هدف کامپوزیتی، مدل جذب انرژی دقیقی ارائه شده و سهم هر یک از مکانیزم‌های جذب انرژی در سرعت‌های گوناگون تخمین زده شده است.

توسلی و همکاران [13] یک مدل تجربی-تحلیلی جذب انرژی پروفیل کامپوزیتی کلاهی شکل تحت نیروی ضربه با سرعت پایین در سه شرایط تکیه‌گاهی مختلف ارائه کردند. نتایج حاصل از مدل تحلیلی برای تمام موارد لایه چینی و شرایط تکیه‌گاهی بررسی گردید و میزان تطابق با نتایج تجربی در تمام حالات مشخص گردید. بیشترین انطباق در کل شرایط تکیه‌گاهی بررسی شده در لایه چینی [75/0/0-75] با میزان خطای 0.23 درصد در شرایط تکیه‌گاهی یک سرگردار-یک سر ساده و کم‌ترین انطباق در کل شرایط تکیه‌گاهی بررسی شده در لایه چینی [30/60/30-60] با میزان خطای 19.88 درصد، در شرایط تکیه‌گاهی یک سرگردار-یک سر ساده می‌باشد.

شانظری و همکاران [14] یک مدل بر اساس انتشار موج و معادلات تعادل انرژی برای تحلیل بالستیک پانل‌های پارچه هیبریدی ارائه نمودند. پانل‌های هیبریدی شامل پارچه‌های بافته شده در لایه جلویی تحت ضربه و پارچه تک‌جهته در لایه پشتی بود. نتایج نشان داد که زمانی که از پارچه بافته شده در جلو و پارچه تک‌جهته در لایه پشتی استفاده می‌شود، عملکرد بالستیکی بهتری خواهد داشت.

سیکارو و همکاران [15] یک مدل تحلیلی ارائه کردند تا ناحیه آسیب لایه‌های کامپوزیت را تحت ضربه پایین‌تر از حد بالستیک ارزیابی کنند. این مدل بر این اساس ارائه شده که جذب انرژی پرتابه با مکانیزم‌های مختلف در طول ضربه رخ می‌دهد. نمونه‌های ساخته شده از جنس شیشه، کولار و ترکیب شیشه و کولار بوده و جذب انرژی آنها مقایسه گردید. نشان داده شد که کامپوزیت شیشه/کولار با درصد حجمی 27.5% کولار، به میزان 20% جذب انرژی کامپوزیت شیشه/اپوکسی را افزایش می‌دهد.

کومار و همکاران [16]، عملکرد بالستیکی صفحات کامپوزیتی کولار/اپوکسی را با استفاده از نرم‌افزار المان محدود بررسی نمودند. محدوده سرعت پرتابه 100 تا 1000 متربرانه انتخاب و حد بالستیک، انرژی جذب شده و زمان تماس پرتابه با هدف تعیین گردید. همچنین اثر جرم و قطر پرتابه روی حد بالستیک مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد با افزایش جرم و قطر پرتابه، حد بالستیک افزایش می‌یابد.

برسیانی و همکارانش [17] با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ال اس داینما، ضربه بالستیک روی اهداف کامپوزیتی کولار/اپوکسی را به دو روش همگن ماکرو و روش ناهمگن میکرو مدل‌سازی نمودند. در روش ماکرو، هر لایه به عنوان یک ماده ارتوتروپ در نظر گرفته شده و خواص معادل به آن اختصاص داده شد. در روش میکرو، پارچه و ماتریس به صورت مجزا مدل‌سازی و در مدل المان محدود وارد می‌گردد و با اعمال قیدهای مناسب، شبیه‌سازی ضربه انجام می‌گیرد. آنها با استفاده از این دو دیدگاه، عملکرد بالستیکی کامپوزیت را ارزیابی و نتایج حاصل را مقایسه نمودند.

صفرآبادی و همکاران [18] با استفاده از تئوری ماترنمیلر، به پیش‌بینی آسیب پرداخته‌اند. در این تئوری، تنش برشی در ناحیه الاستیک به صورت غیرخطی در نظر گرفته شده است. جهت استفاده از این تئوری، یک سابروتین VUMAT در قالب نرم افزار آباکوس جهت مدل‌سازی اجزا محدود نوشته شده است. در نهایت، نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل حاضر با نتایج تجربی موجود، برای حالت‌های مختلف پانل‌های کامپوزیتی غیرهیبرید و هیبریدی مقایسه شده است. محدوده آسیب حاصل از شبیه‌سازی در جهت تار 11.9 میلیمتر و در جهت پود 9.92 میلیمتر بوده که به ترتیب دارای اختلاف 13 و 3 درصد با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد.

هدایتیان و همکاران [19,20]، رفتار سازه‌های مشبک استوانه‌ای کامپوزیتی، تحت ضربه سرعت بالا را به روش تجربی و عددی مورد بررسی

پرتابه 90 m/s در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه‌های ساخته شده، نشان دهنده برتری چندلایه الیافی فلزی می‌باشد به گونه‌ای که سرعت حد بالستیک، انرژی نفوذ و انرژی نفوذ مخصوص در این چندلایه‌ها بیشتر از آلومینیم می‌باشد.

در این تحقیق به بررسی ضربه سرعت بالا روی چندلایه‌های کامپوزیتی دو و چهار لایه کولار/اپوکسی به روش عددی و تجربی پرداخته شده است. آزمایش ضربه با استفاده از تفنگ گازی انجام شده و سرعت شلیک پرتابه در بازه 20 تا 120 m/s می‌باشد. حد بالستیک و انرژی جذب شده در این آزمایش‌ها حاصل شده است. همچنین یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینایا ایجاد شده و رفتار کامپوزیت تحت ضربه شبیه‌سازی شده است. همچنین تأثیر شکل دماغه پرتابه بر عملکرد بالستیکی پارچه بررسی شده است.

در این مقاله به تحلیل تجربی و عددی ضربه سرعت بالا روی کامپوزیت کولار/اپوکسی پرداخته شده است. در پژوهش انجام شده نمونه‌های کامپوزیتی با 2 و 4 لایه پارچه کولار ساخته شده و تحت ضربه پرتابه سرکروی با سرعت‌های متفاوت در بازه 20 تا 120 m/s قرار گرفتند. لذا اثر تعداد لایه بر حد بالستیک و جذب انرژی کامپوزیت بررسی شده است. علاوه بر تحلیل تجربی، یک مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ال اس داینایا ایجاد شد و نشان داده شد که نتایج تحلیل عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد و از آن برای بررسی حد بالستیک و انرژی جذب شده استفاده گردید. برای بررسی تأثیر دماغه پرتابه بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت کولار/اپوکسی، از مدل المان محدود استفاده گردید و شبیه‌سازی با دو نوع پرتابه سرتخت و سرکروی انجام شد. جذب انرژی و تخریب کامپوزیت تحت ضربه توسط پرتابه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد پرتابه سرتخت دارای حد بالستیک بالاتر است. همچنین نوع شکست تحت ضربه توسط مدل المان محدود تعیین شد و مود شکست ناشی از ضربه پرتابه سرتخت و سرکروی مورد بررسی قرار گرفت.

2- آزمایش‌های تجربی

2-1- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از پارچه کولار برای ساخت کامپوزیت استفاده شده است. رزین مورد استفاده از خانواده اپوکسی با نام تجاری ML-506 و با سخت کننده HA-11 ساخت شرکت مواد مهندسی مکرر انتخاب گردید. واکنش‌های شیمیایی و پخت این رزین در دمای محیط انجام می‌شود. نسبت سخت کننده به رزین، یک به دوازده در مقیاس وزنی می‌باشد.

2-2- ساخت نمونه‌ها

برای ساخت کامپوزیت با ماتریس اپوکسی، مناسب‌ترین راه برای تولید نمونه‌ها از میان روش‌های موجود، آغشته‌سازی مستقیم الیاف با رزین (لایه‌گذاری دستی) به نظر می‌رسد. با توجه به ابعاد فیکسچر مورد استفاده در تفنگ گازی، که در بخش بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت، ابعاد نمونه‌ها، مربع‌هایی با ضلع 14 cm انتخاب گردید.

لایه‌ها تک تک به رزین آغشته شده و مطابق شکل 1 روی هم قرار می‌گیرند. نمونه‌های تولید شده دو و چهار لایه می‌باشند. برای تولید نمونه‌ها، می‌بایست فشار مستقیم و ثابتی به نمونه‌ها اعمال گردد. هدف از اعمال فشار، ایجاد فشردگی و تراکم میان لایه‌ها و خارج نمودن رزین اضافی از محصول می‌باشد. مدت اعمال این فشار حدوداً 24 ساعت می‌باشد. به منظور اعمال

قرار دادند. در روش عددی برای مدلسازی پوسته و تقویت‌کننده‌ها از المان‌های جامد سه‌بعدی و جهت تعیین رفتار ماده، از مدل مادی ویبومت بر مبنای معیارهای آسیب پاک و هاشین(سه‌بعدی) استفاده شد. نمودارهای تغییرات سرعت و نیروی پرتابه، گستردگی سطح خرابی و مکانیزم‌های مختلف شکست به عنوان نتایج گزارش شدند. نتایج نشان دادند که حضور تقویت‌کننده‌ها مانع گسترش خرابی به سلول‌های مجاور می‌گردد.

رودریگز و همکاران [21]، شبیه‌سازی عددی انجام دادند که در آن عملکرد بالستیکی کامپوزیت ساخته شده با پارچه کولار تحت بار ضربه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. در این شبیه‌سازی از پرتابه‌ها تک‌دماغه و دو دماغه متوالی استفاده شده است و مودهای شکست و حد بالستیک برای این پرتابه‌ها مقایسه شده است. کمترین حد بالستیک مربوط به پرتابه با دو دماغه متوالی نوک تیز می‌باشد.

تقی‌زاده و همکاران [22] نفوذ شبه‌استاتیک ضربه‌زننده‌های استوانه‌ای با شکل دماغه‌های متفاوت را بر روی کامپوزیت‌های چند لایه ساخته شده از پارچه بافته شده از جنس شیشه و دایناما و صفحات آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. مکانیزم تخریب اهداف کامپوزیتی و عملکرد کامپوزیت توسط ضربه‌زننده‌ها مقایسه گردید. نتایج نشان داد که پانل کامپوزیتی که شامل ورقه‌های دایناما است، ظرفیت تحمل بار و جذب انرژی بالاتری دارند.

رمدان و همکاران [23] تحلیل ضربه را روی صفحات کامپوزیتی به روش تجربی مورد بررسی قرار دادند و اثر پرتابه با شکل‌های متفاوت و هدف با سه ضخامت مختلف را بررسی نمودند. همچنین تأثیر محل قرارگیری ورق آلومینیومی در کامپوزیت مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد زمانی که ورق آلومینیوم در لایه پشت کامپوزیت قرار می‌گیرد بیشترین جذب انرژی را داراست.

پل و همکاران [24] رفتار کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی/نانو خاک رس را تحت ضربه سرعت بالا بررسی نمود. او از 5 مقدار متفاوت نانو رس (0، 3، 5، 7 و 10 درصد جرمی) در تهیه کامپوزیت استفاده نمود. تست‌های بالستیک با استفاده از یک ضربه‌زننده استوانه‌ای سرتخت انجام شد و نتایج حاکی از عملکرد بهتر کامپوزیت با افزایش نانو رس بود.

ریس و همکاران [25] برای تقویت کامپوزیت تحت بار ضربه، از نانو خاک رس و پودر کرک استفاده کردند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده افزایش قابل ملاحظه خواص ضربه‌پذیری این کامپوزیت‌ها بود.

قاجار و همکاران [26] پاسخ صفحات کامپوزیتی را با شکل ضربه زننده متفاوت و دماغه‌های بالا مورد بررسی قرار دادند. جهت انجام آزمایش ضربه از دستگاه وزنه افتان، و برای بررسی اثر شکل ضربه زننده از چهار نوع ضربه زننده تخت، نیم کروی، مخروطی و سهموی استفاده شد. نشان داده شد که هرچه سر ضربه زننده پهن‌تر باشد زمان برخورد کمتر و بیشینه نیروی برخورد بیشتر خواهد بود و ناحیه آسیب ضربه زننده مخروطی از همه بیشتر است. همچنین جهت بررسی اثر دما بر روی پاسخ کامپوزیت، دماهای آزمایش بین دمای اتاق و 150 درجه سانتیگراد تغییر داده شد و پارامترهایی مانند بیشینه نیروی برخورد، جابجایی و انرژی جذب شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد با افزایش دما بیشینه نیروی برخورد کاهش و جابجایی افزایش می‌یابد ولی انرژی جذب شده با تغییر دما تغییر چندانی نمی‌کند.

چپرین و همکاران [27] به بررسی حد بالستیک در چندلایه الیافی-فلزی از لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت شیشه/اپوکسی پرداخته است. برای آزمایش نمونه‌ها از دستگاه تفنگ گازی استفاده شده و سرعت ورودی

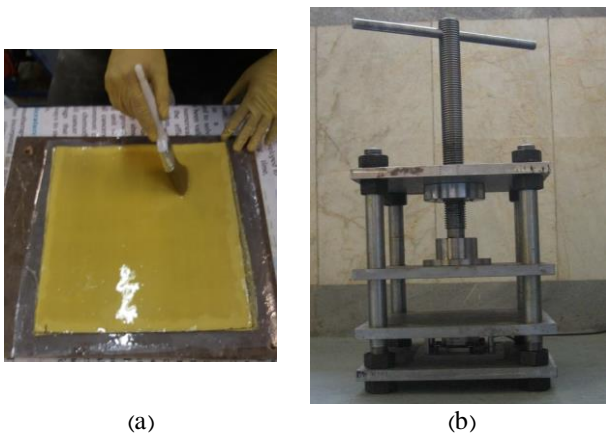


Fig. 1 Manufacturing Kevlar/Epoxy composite (a) Hand layup (b) Press tool

شکل 1 ساخت کامپوزیت کولار/اپوکسی (a) لایه گذاری دستی (b) دستگاه پرس

3- شبیه سازی عددی

در این تحقیق برای شبیه سازی ضربه سرعت بالا، از نرم افزار ال اس داینا استفاده شده است. با اعمال شرایط صحیح مسأله از جمله انتخاب مدل ماده، اعمال شرایط صحیح مسأله مانند شرایط مرزی، تماس بین لایه های کامپوزیت و همچنین تماس پرتابه و لایه ها، مش مناسب اجزا و المان های مناسب، امکان شبیه سازی صحیح در این نرم افزار فراهم می گردد.

مدل هندسی شامل دو قسمت پرتابه و هدف می باشد. پرتابه مطابق آزمایش های تجربی، به شکل استوانه سرکروی مدل می گردد. همچنین لایه های کامپوزیت بصورت مجزا مدل سازی گشته و با اعمال قید مناسب به همدیگر متصل می گردند.

با توجه به فرم حجمی مدل، لازم است که مدل ایجاد شده به وسیله المان های حجمی³ مش بندی شوند.

در این مطالعه به بررسی تخریب درون صفحه ای پرداخته شده است. بدلیل ضخامت کم صفحه کامپوزیت، از تنش های خارج از صفحه صرف نظر شده است. ذکر این نکته لازم است که علاوه بر تنش های کوچک خارج از صفحه، در بار ضربه ای ممکن است رخداد تورق اتفاق بیفتد که با توجه به اینکه در آزمایش های تجربی این پدیده مشاهده نشد از آن صرف نظر شده است.

3-1- شرایط مرزی

به منظور کاهش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه، یک چهارم مدل هندسی مدل سازی می شود و شرط های تقارن مطابق شکل 5 روی مدل اعمال می گردد. سرعت اولیه گلوله، به عنوان شرط اولیه منظور می گردد. تمامی المان های تشکیل دهنده گلوله انتخاب شده و سرعت اولیه به گره ها اعمال می گردد.

3-2- تعریف مواد

3-2-1- تعریف خواص مکانیکی پرتابه

پرتابه به فرم الاستیک بوده و مدل ماده MAT_ELASTIC برای آن در نظر گرفته می شود. چگالی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد به عنوان خواص مکانیکی به آن اعمال می گردد.

فشار مستقیم، از دستگاه پرس استفاده می گردد. برای اعمال بار فشاری ثابت، استفاده از پیچ انتقال قدرت مناسب به نظر می رسد. از سوی دیگر، برای یکنواخت بودن ضخامت نمونه ها، لازم است که چارچوب پرس، صلب و کلاف شده باشد. در نتیجه چهار ستون برای آن در نظر گرفته می شود. به منظور داشتن نمونه هایی با ضخامت یکنواخت، بهتر است که فک های پرس به اندازه کافی ضخیم و صلب بوده و بار اعمالی به آنها بصورت متمرکز باشد. توزیع بار به شکل فشار یکنواخت به نمونه ها به عهده فک ها می باشد. در شکل 1(b) پرس مورد استفاده در ساخت کامپوزیت مورد استفاده نشان داده شده است.

2-3- آزمون بالستیک

از دستگاه تفنگ گازی¹ برای انجام آزمایش های مکانیک ضربه، مانند برخورد و نفوذ، در گستره متنوعی از سرعت های برخورد می توان استفاده نمود. اعمال سرعت هایی در حدود ده تا چند صد متر بر ثانیه با انواع مختلف این دستگاه، امکان پذیر می باشد. بارگذاری نمونه ها و قطعات، به وسیله شلیک پرتابه انجام می گیرد. به وسیله این دستگاه، می توان گلوله را در بازه سرعتی متنوعی حرکت داد. سرعت حد عبور (حد بالستیک) هدف، سرعت باقی مانده پس از عبور و ظرفیت جذب انرژی بالستیک هدف، سه پارامتر مهم قابل تعیین توسط این دستگاه می باشند.

یک شیر برقی از نوع سنولوئیدی، محفظه ذخیره گاز را به انتهای لوله متصل می کند. محفظه ذخیره گاز، به کپسول تغذیه، یا مخزن یک کمپرسور پرفشار متصل شده است. با وصل نمودن کلید برقی شیر سنولوئیدی (با افزایش فشار پشت دیافراگم)، ناگهان گاز درون محفظه ذخیره آزاد شده و سرعت اولیه شلیک پرتابه را فراهم می آورد. سرعت اولیه داده شده به ضربه زننده، تابع فشار گاز پشت ضربه زننده، جنس گاز، جرم و شکل دماغه ضربه زننده، قطر و طول لوله و تیرانس هندسی میان ضربه زننده و لوله می باشد.

پس از پرتاب ضربه زننده، سرعت خروج آن از لوله (یا سرعت برخورد آن به هدف) به وسیله سرعت سنچ اندازه گیری می شود. دو نور لیزر متمرکز اساس کار سرعت سنچ می باشد. پرتابه با سرعت بالا پس از خروج از لوله، دو نور متمرکز را قطع کرده و دستگاه سرعت سنچ بر اساس فاصله این دو و مدت زمانی که پرتابه این دو نور متمرکز را قطع می کند، سرعت پرتابه را تخمین می زند. اگر ضربه زننده از نمونه خارج شود، سرعت خروجی آن نیز به وسیله دستگاه کرونگراف² اندازه گیری می شود. به منظور اطمینان از نتایج، هر آزمایش با سرعت شلیک پرتابه خاص، سه مرتبه تکرار و میانگین سه سرعت حاصل از آزمایش ها به عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته شد.

پرتابه مورد استفاده در این پژوهش، پرتابه صلب و سرکروی می باشد. با توجه به کالیبر لوله دستگاه تفنگ گازی مورد استفاده، میله ای از جنس فولاد به قطر ده میلی متر انتخاب گردید. در شکل 2، پرتابه مورد استفاده نشان داده شده و مشخصات آن در جدول 1 ارائه گردیده است.

آزمایش های بالستیک در این پژوهش، توسط دستگاه تفنگ گازی آزمایشگاه مکانیک ضربه دانشگاه تربیت مدرس انجام گرفته است. در شکل 3 دستگاه تفنگ گازی مورد استفاده نشان داده شده است. فیکسچر و جعبه محافظ نیز در شکل 4 نشان داده شده است.

¹ Gas gun

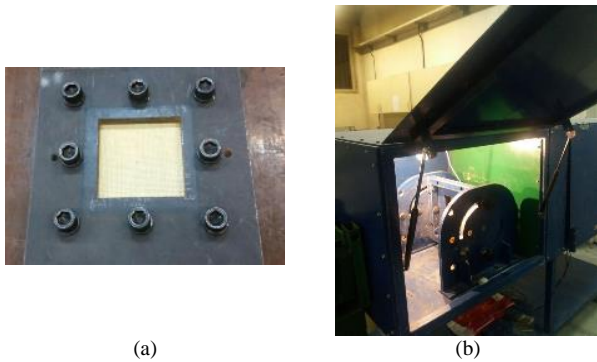
² Chronograph

³ Solid



Fig. 3 Gas gun used for ballistic tests

شکل 3 دستگاه تفنگ گازی استفاده شده برای آزمون بالستیک



(a) Sample position (b) Target chamber

Fig. 4 Sample position (a) fixture (b) Target chamber

شکل 4 محل قرارگیری نمونه (a) فیکسچر (b) جعبه محافظ

3-3- تعریف سطوح تماس

برای بیان مفهوم تماس بین قسمت‌های مختلف، از الگوریتم تماس¹ استفاده می‌شود. کلیه تماس‌ها در مدل تهیه شده، از نوع سطح به سطح می‌باشد. مقدار ضرائب اصطکاک لغزشی استاتیکی و دینامیکی در الگوریتم‌های تماس، 0.18 در نظر گرفته شده است [28]. تماس‌ها در سه دسته تعریف گردیده‌اند.

3-3-1- تماس میان گلوله و هریک از لایه‌های هدف

از آنجا که پیشانی گلوله پس از تماس با لایه‌های مختلف هدف، اقدام به برش و یا حذف آنها خواهد نمود، از الگوریتم تماس فرسایشی² برای بیان تماس گلوله و هریک از لایه‌های هدف استفاده می‌گردد.

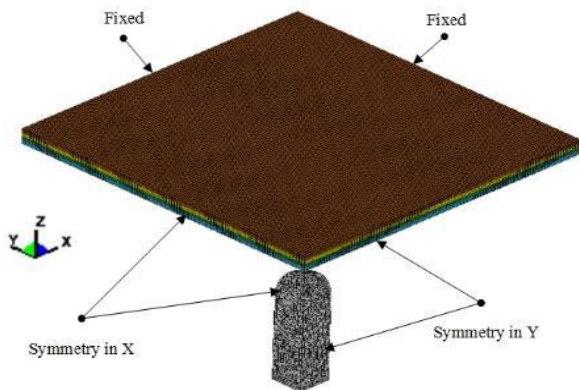


Fig. 5 Finite element model of high velocity impact of projectile on Kevlar/Epoxy composite

شکل 5 مدل المان محدود ضربه سرعت بالای پرتابه روی کامپوزیت کولار/اپوکسی



Fig. 2 Hemispherical projectile used in experiments

شکل 2 پرتابه سرکروی مورد استفاده در آزمایش‌ها

جدول 1 مشخصات پرتابه

Table 1 Projectile characteristics

مقادیر	مشخصات
16.75 mm	طول
10 mm	قطر
9.32 gr	وزن
55-56 RC	سختی

3-2-2- تعریف خواص مکانیکی کامپوزیت

برای تعریف خواص کامپوزیت از مدل ماده COMPOSITE_DAMAGE (MAT_22) استفاده می‌گردد که از مدل تخریب چانگ-چانگ استفاده می‌کند. معیار تخریب شکست الیاف با معادله زیر تعیین می‌شود [28].

$$F_{fiber}^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \ddot{t} \begin{cases} F_{fiber} < 1 & \text{no failure} \\ F_{fiber} \geq 1 & \text{failure} \end{cases} \quad \sigma_{11} \geq 0 \quad (1)$$

که X_t استحکام کشش طولی، σ_{11} تنش نرمال، و \ddot{t} نسبتی بر حسب تنش برشی و استحکام برشی است که از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\ddot{t} = \frac{\frac{\sigma_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3\alpha_1\sigma_{12}^4}{4}}{\frac{S_c^2}{2G_{12}} + \frac{3\alpha_1 S_c^4}{4}} \quad (2)$$

در معادله فوق G_{12} مدول برشی، S_c استحکام برشی طولی، σ_{12} تنش برشی و α_1 یک پارامتر تنش برشی غیرخطی است که با اندازه‌گیری تنش- کرنش برشی حاصل می‌گردد.

معیار تخریب ترک ماتریس بصورت رابطه‌ی (3) تعیین می‌گردد [28].

$$F_{matrix}^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \ddot{t} \begin{cases} F_{matrix} < 1 & \text{no failure} \\ F_{matrix} \geq 1 & \text{failure} \end{cases} \quad \sigma_{22} \geq 0 \quad (3)$$

که Y_t استحکام کشش عرضی، σ_{22} تنش نرمال می‌باشد.

همچنین تخریب فشاری ماتریس بر اساس معیار تخریب هاشین بصورت

زیر تعیین می‌گردد [28].

$$F_{comp}^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \ddot{t} \begin{cases} F_{comp} < 1 & \text{no failure} \\ F_{comp} \geq 1 & \text{failure} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_{22} \leq 0$$

که Y_c استحکام فشاری عرضی است.

معیار تخریب حداکثر کرنش اصلی که المان‌ها با رسیدن به کرنش 3.2% حذف می‌شوند، با مدل ماده MAT_ADD_EROSION به مدل چانگ-چانگ اضافه می‌گردد.

تست کشش بر روی نمونه‌ها انجام شد و مقدار مدول و استحکام کشش طولی بدست آمد. با توجه به نزدیکی مقادیر حاصله با نتایج حاصل از تست‌های پالتا [28]، از آن مقادیر در تحلیل عددی استفاده شده است.

¹ Contact

² ERODING_SURFACE_TO_SURFACE

جدول 2 خواص مکانیکی کامپوزیت کولار/اپوکسی [28]

Table 2 Mechanical properties of Kevlar/Epoxy composite [28]

مقادیر	خواص مکانیکی
1230	چگالی، ρ (kg/m^3)
18.5	مدول یانگ در جهت محور 1، E_{11} (GPa)
18.5	مدول یانگ در جهت محور 2، E_{22} (GPa)
6	مدول یانگ در جهت محور 3، E_{33} (GPa)
0.77	مدول برشی در صفحه 1-2، G_{12} (GPa)
2.5	مدول برشی در صفحه 2-3، G_{23} (GPa)
2.5	مدول برشی در صفحه 1-3، G_{13} (GPa)
0.25	ضریب پواسون در صفحه 1-2، ν_{12}
0.33	ضریب پواسون در صفحه 1-3، ν_{13}
0.33	ضریب پواسون در صفحه 2-3، ν_{23}
0.555	استحکام کششی در جهت محور 1، X_t (GPa)
0.555	استحکام کششی در جهت محور 2، Y_t (GPa)
0.588	استحکام برشی در صفحه 1-2، S_c (GPa)
1.086	استحکام فشاری در جهت محور 2، Y_c (GPa)
0.835	استحکام کششی نرمال، S_n (GPa)
1.06	استحکام برشی عرضی، S_{23} (GPa)
1.06	استحکام برشی عرضی، S_{13} (GPa)

3-2-3-2- تماس بین لایه‌های مجاور هدف

لایه‌های مختلف هدف، به یکدیگر اتصال یافته‌اند. بیان مفهوم و اتصال و تماس میان دو لایه مجاور، از الگوریتم تماس تای¹ استفاده می‌شود.

3-3-3-3- تماس میان لایه‌های غیر مجاور هدف

الگوریتم تماس اتوماتیک² برای جلوگیری از درهم فرو رفتن لایه‌های غیر مجاور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

4-3- همگرایی مش

با افزایش تدریجی تعداد المان‌ها، پاسخ‌های عددی دقیق‌تری به دست آمده و در نتایج به دست آمده، همگرایی دیده می‌شود. تعداد سه فرم مش‌بندی با تراکم المان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و پس از بررسی نتایج به دست آمده، فرم نهایی مش‌بندی طبق شکل 5 انتخاب گردید. تجزیه و تحلیل همگرایی بر اساس پارامترهای سرعت باقی‌مانده پرتابه و مدت زمان تحلیل که وابسته به تعداد المان‌هاست، می‌باشد. با توجه به جدول 3، در مش‌بندی هدف با تعداد المان 32400 و 40000، جواب‌ها به هم نزدیک بود، لذا از حالت سوم مش‌بندی جهت تحلیل استفاده شد.

4- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از تست‌های بالستیک بدست آمده از آزمایش تجربی و مدل المان محدود، ارائه شده و انرژی جذب شده و سرعت حد بالستیک نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

4-1- سرعت باقی‌مانده پرتابه

در این بخش نتایج حاصل از تست‌های بالستیک بدست آمده از آزمایش تفنگ گازی ارائه شده است. از آزمایش نفوذ، سرعت خروجی پرتابه بر اساس سرعت ورودی حاصل گردید. بازه سرعت پرتابه از 20 تا 120 m/s می‌باشد.

در شکل 6، نمودار سرعت خروجی پرتابه در برابر سرعت‌های شلیک متفاوت آن، برای نمونه‌های دو و چهار کامپوزیت لایه رسم شده است. با افزایش سرعت پرتابه، سرعت خروجی پرتابه از کامپوزیت دو و چهار لایه، به

همدیگر نزدیک می‌شود. و در حالت حدی برای سرعت‌های بسیار بالا می‌توان انتظار داشت سرعت خروجی برای آن‌ها اختلاف کمی پیدا می‌کند. نتایج حاصل از تست‌های بالستیک که توسط دستگاه تفنگ گازی انجام شد و نتایج مدل المان محدود، در جدول 4 ارائه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد.

4-2- حد بالستیک

سرعت حد بالستیک هدف، به عنوان مهمترین دست‌آورد آزمون بالستیک تلقی می‌شود. سرعت حد، حداقل سرعتی است که بتواند جسم را سوراخ کند یا حداکثر سرعتی که نمونه را سوراخ می‌کند اما از آن عبور نمی‌کند. دقت شاخص‌های نمایشگر فشار در مخزن دستگاه تفنگ گازی مورد استفاده 1 bar بود. بر همین اساس شلیک در فشارهای مختلف انجام شد تا در دو فشار متوالی با فاصله 1 bar، یک قطعه سوراخ شده و دیگری سوراخ نشود. در واقع اگر یک فشار پایین هدف را سوراخ نکند و شلیک بعد با فشار 1 bar بیشتر شلیک شود و باعث سوراخ شدن قطعه شود نشان‌دهنده این است که حد بالستیک در یک فشار مابین این دو فشار است. اما با توجه به دقت شاخص دستگاه امکان دقت بیشتر در تعیین حد بالستیک نبود. لذا میانگین دو سرعتی که این دو فشار متوالی به پرتابه می‌دهند، به عنوان سرعت حد بالستیک در نظر گرفته می‌شود.

نتایج حد بالستیک برای کامپوزیت دو و چهار لایه از روش تجربی و عددی در شکل 7 ارائه شده است. همانگونه که نشان داده شده است، نتایج حد بالستیک بدست آمده از روش عددی و تجربی همخوانی مناسبی دارد. حداکثر خطا برای نمونه‌های 2 و 4 لایه به ترتیب 6 و 10 درصد می‌باشد.

جدول 3 همگرایی مش

Table 3 Mesh convergence

تعداد المان هدف	سرعت ورودی پرتابه (m/s)	سرعت خروجی پرتابه در حالت عددی (m/s)	اختلاف (درصد)
19600	34	24	26
32400	34	21.5	13
40000	34	21	10

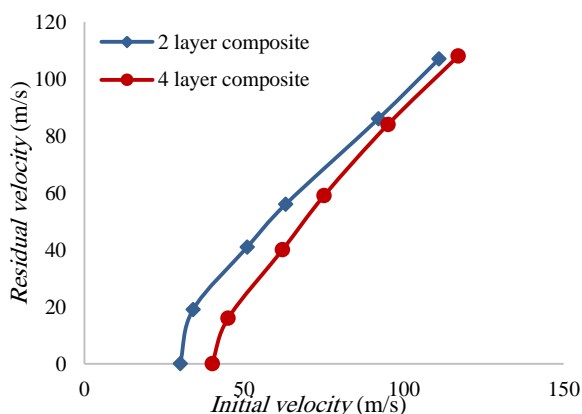


Fig. 6 Residual velocity versus initial velocity of hemispherical projectile obtained by experiments for 2 and 4 layer composites

شکل 6 نمودار سرعت خروجی پرتابه سرکروی در برابر سرعت اولیه آن بدست آمده از روش تجربی برای کامپوزیت دو و چهار لایه

¹ TIED_SURFACE_TO_SURFACE_

² AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE

نخ‌هایی هستند که مستقیم با پرتابه در تماس نیستند و با برهم‌کنش الیاف اولیه تغییر شکل می‌یابند.

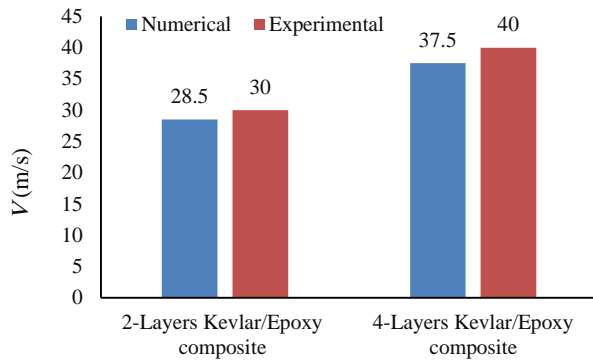


Fig. 7 Ballistic limit of 2 and 4-layers composite with hemispherical projectile

شکل 7 سرعت حد بالستیک کامپوزیت دو و چهار لایه تحت ضربه پرتابه سرکروی

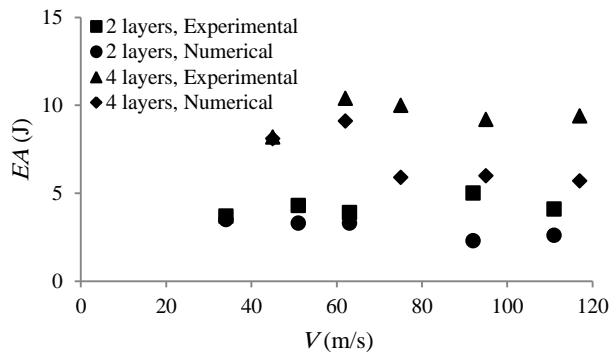


Fig. 8 Absorbed energy by 2 and 4-layer composite with hemispherical projectile

شکل 8 انرژی جذب شده توسط کامپوزیت دو و چهار لایه تحت ضربه پرتابه سرکروی



Fig. 9 Damage of the composite under impact velocity of 75 m/s

شکل 9 آسیب کامپوزیت تحت ضربه پرتابه سرکروی با سرعت 75 m/s



Fig. 10 Damage of the composite under impact velocity of 117 m/s

شکل 10 آسیب کامپوزیت تحت ضربه پرتابه سرکروی با سرعت 117 m/s

جدول 4 نتایج حاصل از تست‌های ضربه سرعت بالا با پرتابه سرکروی روی کامپوزیت کولار/اپوکسی

Table 4 High velocity impact results on Kevlar/Epoxy composite with hemispherical projectile

نمونه	شماره نمونه	سرعت اولیه پرتابه (m/s)	سرعت خروجی تجربی (m/s)	سرعت خروجی عددی (m/s)	درصد خطای عددی	مقدار انرژی جذب شده تجربی (J)
کامپوزیت 2 لایه	1	111	107	108.5	1.4	4.06
	2	92	86	89.3	4	4.98
	3	63	56	57	2	3.88
	4	51	41	43.6	6	4.29
کامپوزیت 4 لایه	5	34	19	20.1	5.7	3.7
	1	117	108	111.6	3	9.44
	2	95	84	88	4.8	9.17
	3	75	59	66	10	9.99
کامپوزیت 4 لایه	4	62	40	43.5	8.7	10.46
	5	45	16	17.2	7.5	8.24

یکی از دلایل تفاوت مقدار عددی و تجربی، خطای ساخت نمونه‌ها و تست‌های آزمایشگاهی است. همچنین در مدل‌سازی عددی ساده‌سازی‌هایی انجام می‌گیرد. از جمله اینکه لایه‌های پارچه یکدست بدون در نظر گرفتن تار و پود مدل‌سازی می‌گردند.

3-4- انرژی جذب شده توسط کامپوزیت

برای محاسبه انرژی مورد نیاز برای سوراخ کردن پارچه، باید انرژی گلوله قبل از برخورد را از مقدار انرژی ضربه بعد از برخورد کسر نمود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\text{انرژی گلوله قبل از برخورد} = \frac{1}{2} m(V_i^2) \quad (5)$$

$$\text{انرژی گلوله بعد از برخورد} = \frac{1}{2} m(V_f^2) \quad (6)$$

$$\text{انرژی مورد نیاز برای سوراخ کردن نمونه} = \frac{1}{2} m(V_i^2 - V_f^2) \quad (7)$$

در این روابط V_i سرعت اولیه پرتابه و V_f سرعت خروجی پرتابه می‌باشد. در شکل 8، نمودار انرژی جذب شده توسط کامپوزیت دو و چهار لایه نسبت به سرعت اولیه پرتابه بر اساس روابط 5 تا 7 ارائه شده است. میانگین انرژی جذب شده برای کامپوزیت دو لایه 4.18 J و برای کامپوزیت چهار لایه 9.46 J می‌باشد.

4-4- مکانیزم جذب انرژی و آسیب‌دیدگی کامپوزیت

شکل‌های 9 و 10 مکانیزم‌های مختلف آسیب‌دیدگی و ترک‌های عرضی و طولی کامپوزیت کولار/اپوکسی چهار لایه در دو سرعت 75 و 117 m/s نشان داده شده است. با توجه به شکل نمونه‌ها پس از برخورد، بیشترین مقدار آسیب‌دیدگی در اثر شکست ماتریس و شکست الیاف در محل ضربه ایجاد شده است. همچنین جدایش لایه‌ها در محل ضربه مشهود می‌باشد. با افزایش سرعت پرتابه، میزان تخریب کامپوزیت و شکست الیاف افزایش می‌یابد.

یکی از معایب کامپوزیت‌های کولار/اپوکسی عدم شرکت کل هدف در جذب انرژی پرتابه است. به این معنی که الیاف اولیه¹ با برخورد پرتابه در محل ضربه دچار شکست شده و حضور اپوکسی مانع کشش نخ به طور کامل می‌شود. نخ‌های اولیه به نخ‌هایی از پارچه گفته می‌شود که بطور مستقیم با پرتابه در تماس قرار می‌گیرند. دلیل عدم کشش نخ‌های اولیه، الیاف ثانویه² نیز نقشی در عملکرد بالستیکی کامپوزیت ایفا نمی‌کنند. نخ‌های ثانویه

¹ Primary yarns

² Secondary yarns

4-5- اثر شکل پرتابه بر عملکرد کامپوزیت کولار/اپوکسی

به منظور بررسی اثر شکل پرتابه بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت کولار/اپوکسی و نحوه تخریب کامپوزیت، شبیه‌سازی عددی ضربه با استفاده از یک پرتابه سرتخت انجام شده است. حد بالستیک و جذب انرژی کامپوزیت تحت ضربه پرتابه سرتخت با پرتابه سرکروی مقایسه شده است.

پرتابه سرتخت هم قطر با پرتابه سرکروی مدل‌سازی شده و طراحی آن به گونه‌ای بوده که جرم دو پرتابه یکسان باشد. شبیه‌سازی ضربه روی کامپوزیت دو و چهار لایه توسط دو پرتابه سرتخت و سرکروی در 4 سرعت 50، 70، 90 و 110 m/s انجام شده سرعت خروجی هر کدام از پرتابه‌ها در جدول 5 گزارش شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، هندسه پرتابه به طور ملموس بر مقاومت بالستیک کامپوزیت تاثیر می‌گذارد که این تاثیر برای نمونه‌های با تعداد لایه‌های بیشتر قابل توجه‌تر است. نتایج نشان می‌دهد با برخورد پرتابه به هدف، سرعت خروجی پرتابه سرتخت نسبت به پرتابه سرکروی کاهش بیشتری می‌یابد. لذا میزان جذب انرژی کامپوزیت از پرتابه سرتخت بیشتر خواهد بود. میزان جذب انرژی به دلیل سطح تماس بیشتر بین پرتابه سرتخت و هدف نسبت به سطح تماس پرتابه سرکروی بوده و کامپوزیت مؤثرتر در برابر پرتابه سرتخت عمل می‌کند.

حد بالستیک برای کامپوزیت دو و چهار لایه تحت ضربه پرتابه سرتخت، به ترتیب 32.5 و 43.7 می‌باشد که نسبت به پرتابه سرکروی 14 و 16 درصد افزایش دارد.

یکی از ویژگی‌های مدل‌سازی عددی مشاهده و استخراج اطلاعات مراحل مختلف تحلیل نظیر تاریخچه تنش، نیرو و سرعت می‌باشد. شکل 11 و 12 مراحل مختلف برخورد برای برخورد پرتابه سرتخت و سرکروی با کامپوزیت چهارلایه را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.

پس از برخورد پرتابه به هدف، کامپوزیت تغییرشکل می‌دهد و زمانی که سرعت پرتابه بالاتر از سرعت حد باشد، آن را سوراخ می‌کند. عبارتی المان‌های محل برخورد پرتابه حذف می‌گردند. المان‌های محل برخورد پرتابه حذف می‌گردند. المان‌های حذف شده، المان‌هایی هستند که در آنها تنش از حد نهایی مجاز فراتر رفته است. لذا در مدل عددی این المان‌ها به عنوان المان از کار افتاده شناسایی شده‌اند و دستور حذف آنها صادر گردیده است. همانگونه که در شکل‌های 11 و 12 نشان داده شد که عمده این المان‌ها در زیر محل برخورد پرتابه تحت تاثیر تنش‌های کششی و برشی می‌باشند. در شکل 13 نحوه تخریب کامپوزیت چهارلایه تحت ضربه پرتابه سرتخت و سرکروی نشان داده شده است. مود غالب در برخورد پرتابه سرتخت مود برشی است. کامپوزیت در محل لبه پرتابه دچار شکست شده و یک پلاگ تشکیل می‌شود که با حرکت پرتابه از هدف خارج می‌شود. از طرفی مود غالب تخریب کامپوزیت تحت ضربه پرتابه سرکروی، کشش الیاف و پارگی در محل ضربه پرتابه است.

با برخورد پرتابه سرتخت به کامپوزیت سطح تماس بین پرتابه و هدف ماکزیمم مقدار است. بنابراین نفوذ زمانی رخ خواهد داد که سطح هدف بطور کامل از بین برود. لذا کاهش سرعت پرتابه شیب تندی داشته و در زمان کوتاه‌تری نسبت به پرتابه سرکروی هدف را سوراخ کرده و به سرعت ثابت خروجی خواهد رسید. از طرفی در پرتابه سرکروی ابتدا نوک پرتابه با هدف تماس پیدا می‌کند و هدف تحت کشش قرار می‌گیرد. با رسیدن المان‌های هدف در محل برخورد به تنش تسلیم، از روند شبیه‌سازی حذف می‌شوند. با ادامه حرکت پرتابه المان‌ها سطح بیشتری از پرتابه با هدف در تماس قرار می‌گیرد و المان‌ها به تدریج به تنش تسلیم می‌رسند و حذف می‌شوند و

سرعت پرتابه با یک شیب آرام کاهش می‌یابد تا زمانی که پرتابه از هدف خارج می‌شود.

شکل 14 نمودار سرعت پرتابه سرتخت و سرکروی را برای سرعت اولیه 50 m/s نشان می‌دهد. پس از برخورد پرتابه سرتخت به هدف، سرعت آن با شیب زیادی کاهش می‌یابد تا در زمان 0.1 ms یک ترک در کامپوزیت در محل تماس با لبه پرتابه ایجاد می‌شود. این ترک افزایش می‌یابد و شیب کاهش سرعت پرتابه افت پیدا می‌کند تا در زمان 0.27 ms لایه‌ها تخریب و پرتابه از هدف خارج می‌شود. شیب افت سرعت پرتابه کروی، یک شیب یکنواخت‌تری بوده و پرتابه بعد از گذشت زمان 0.36 ms، باعث تخریب کامپوزیت شده و از آن خارج می‌گردد.

جدول 5 نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ضربه با پرتابه‌های متفاوت

انرژی جذب شده	سرعت خروجی پرتابه	سرعت خروجی پرتابه	سرعت اولیه پرتابه	شماره نمونه	نمونه
(J)	(m/s)	(m/s)	(m/s)		
3.13	106.9	108.2	110	1	کامپوزیت 2 لایه
3.2	86.1	87	90	2	
5.09	61.7	63.3	70	3	
4.08	40.3	42.7	50	4	
8.75	101.1	104.6	110	1	کامپوزیت 4 لایه
8.59	79.1	83.7	90	2	
7.96	56.5	59.4	70	3	
8.57	25.7	29.6	50	4	

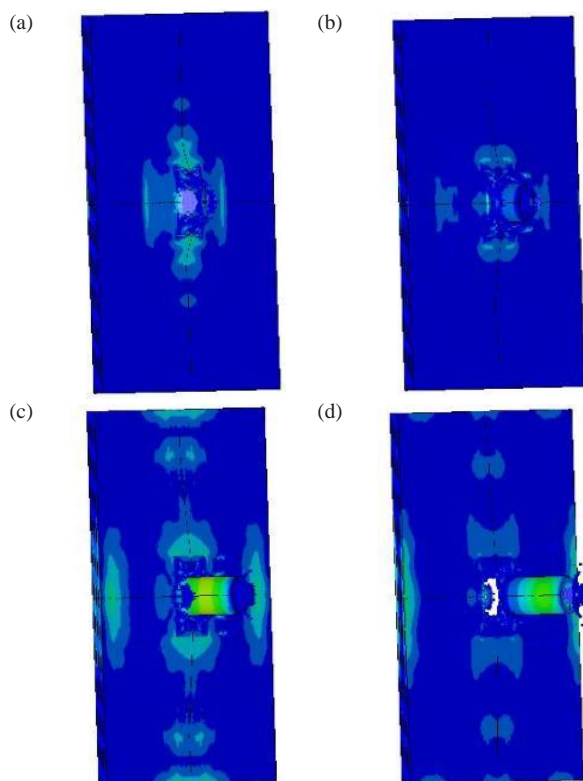


Fig. 11 Composite subjected to blunt projectile impact with velocity of 110 m/s at (a) 0.02 ms (b) 0.05 ms (c) 0.15 ms (d) 0.2 ms

شکل 11 نفوذ پرتابه سرتخت با سرعت 110 m/s در زمان‌های (a) 0.02 ms (b) 0.05 ms (c) 0.15 ms (d) 0.2 ms

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی و عددی نفوذ روی کامپوزیت‌های کولار/اپوکسی پرداخته شده است. آزمایش‌های تجربی با استفاده از دستگاه تفنگ گازی تحت ضربه پرتابه سرکروی روی نمونه‌های کامپوزیت دو و چهار لایه انجام گردید. حد بالستیک برای نمونه‌های دو و چهار لایه به ترتیب 40 و 30 m/s بدست آمد. همچنین میانگین انرژی جذب شده برای کامپوزیت دو لایه 4.18 J و برای کامپوزیت چهارلایه 9.46 J محاسبه گردید.

به منظور شبیه‌سازی ضربه روی کامپوزیت کولار/اپوکسی، یک مدل المان محدود ایجاد گردید و شبیه‌سازی ضربه پرتابه سرکروی مطابق آزمایش‌های تجربی انجام شد. نتایج حاصل تطابق قابل قبولی بین مدل المان محدود و نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد به طوری که حداکثر خطا برای کامپوزیت دو لایه 6 درصد و برای چهارلایه 10 درصد بود.

برای بررسی اثر شکل پرتابه بر عملکرد بالستیکی کامپوزیت کولار/اپوکسی، شبیه‌سازی نفوذ با استفاده از پرتابه سرکروی و سرتخت در چهار سرعت 50، 70، 90 و 110 m/s انجام شد و حد بالستیک و انرژی جذب شده برای دو نوع پرتابه مقایسه گردید. نتایج نشان داد هندسه پرتابه در عملکرد بالستیکی کامپوزیت تاثیر بسزایی دارد که این تاثیر برای نمونه‌های با تعداد لایه‌های بیشتر قابل توجه‌تر است. حد بالستیک برای کامپوزیت دو و چهار لایه تحت ضربه پرتابه سرتخت، به ترتیب 32.5 و 43.7 می‌باشد که نسبت به پرتابه سرکروی 14 و 16 درصد افزایش دارد.

6- مراجع

- [1] Gay D, Hoa SV, Tsai SW. "Composite materials: design and applications CRC press," 2002.
- [2] Khodadadi, A. Liaghat, Gh. Akbari, M and Tahmasebi, M., "Numerical and experimental analysis of penetration into Kevlar fabrics and investigation of the effective factors on the ballistic factors on the ballistic performance," In Persian, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 124-133, 2014.
- [3] Colakoglu, M. Soykasap, O. Özek, T., "Experimental and numerical investigations on the ballistic performance of polymer matrix composites used in armor design," Applied Composite Materials, Vol. 14, No. 1, pp. 47-58, 2007.
- [4] Khodadadi, A. Liaghat, G. Sabet, A. Hadavinia, H. Aboutorabi, A., "Experimental and numerical analysis of penetration into Kevlar fabric impregnated with shear thickening fluid," Journal of Thermoplastic Composite Materials.; Vol. 31, No. 3, pp. 392-407, 2018.
- [5] Katz, S. Grossman, E. Gouzman, I. Murat, M. Wiesel, E and Wagner, H., "Response of composite materials to hypervelocity impact," International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, No. 12, pp. 1606-11, 2008.
- [6] Yeganeh, EM. Liaghat, GH and Pol, MH., "Experimental investigation of quasi-static perforation on laminated glass epoxy composites by indenters with different geometries," Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 185-193, 2015.
- [7] Yang, S. Chalivendra, VB and Kim YK., "Fracture and impact characterization of novel auxetic Kevlar/Epoxy laminated composite," Composite Structures, Vol. 168, pp. 120-129, 2017.
- [8] Ahmadi, H. Liaghat, GH. Sabouri, H and Bidkhouri, E., "Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates," Journal of Composite Materials, Vol. 47, No. 13, pp.1605-15, 2013.
- [9] Arjangpay, A. Darvizeh, A. Yarmohammad, TM and Ansari, R., "Modeling damage evolution of composite laminates under low velocity offcenter impact," Journal of science and technology of composites, Vol. 3, No. 3, pp. 243-252, 2016.
- [10] Sikarwar, RS. Velmurugan, R and Gupta, N., "Influence of fiber orientation and thickness on the response of glass/epoxy composites subjected to impact loading," Composites Part B: Engineering, Vol. 60, pp. 627-636, 2014.

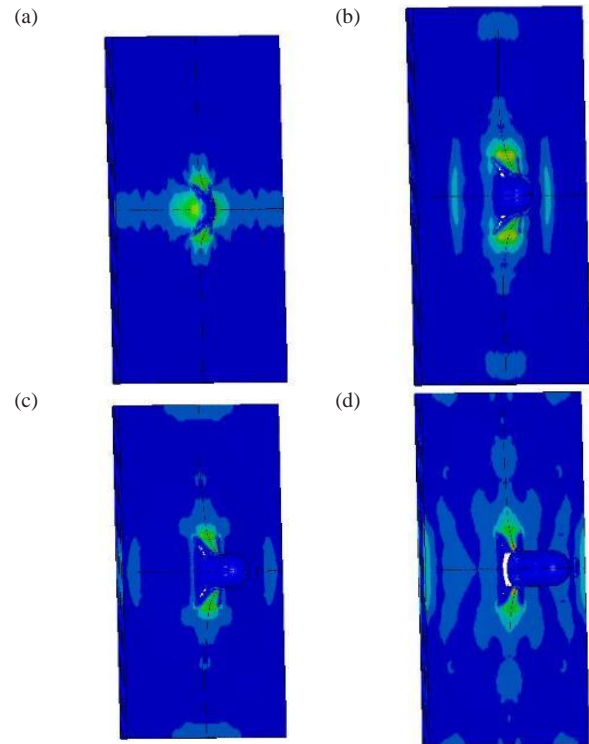


Fig. 12 Composite subjected to hemispherical projectile impact with velocity of 110 m/s at (a) 0.03 ms (b) 0.08 ms (c) 0.2 ms (d) 0.3 ms

شکل 12 نفوذ پرتابه سرکروی با سرعت 110 m/s در زمان‌های (a) 0.03 ms (b) 0.08 ms (c) 0.2 ms (d) 0.3 ms

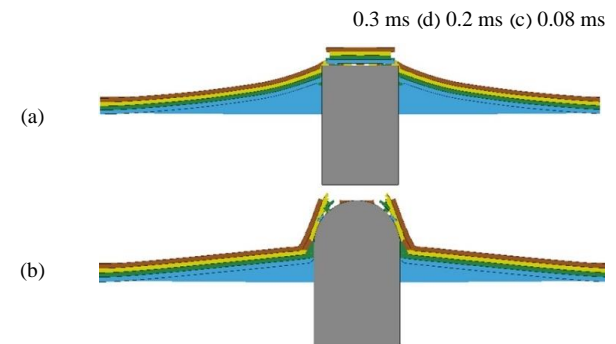


Fig. 13 Perforation of composite subjected to projectile impact with velocity of 90 m/s (a) blunt projectile (b) hemispherical projectile

شکل 13 نفوذ پرتابه با سرعت 90 m/s در هدف کامپوزیتی (a) پرتابه سرتخت (b) پرتابه سرکروی

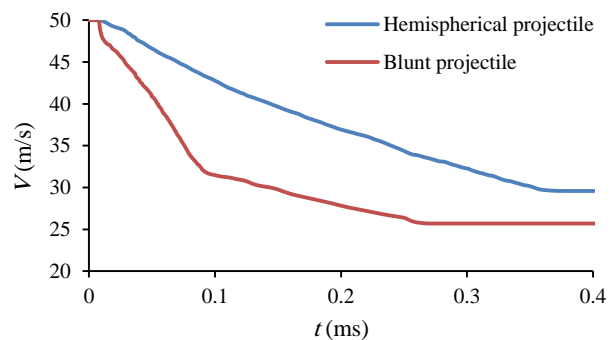


Fig. 14 The velocity versus time for hemispherical and blunt projectile obtained by numerical simulation

شکل 14 نمودار سرعت-زمان پرتابه سرتخت و سرکروی در برخورد با هدف کامپوزیت بدست آمده از روش عددی

- [11] Khodadadi, A. Liaghat, GH. Akbari, M., "Experimental Analysis of Penetration into Targets Made of Kevlar Laminate with STF," Aerospace Mechanics Journal, Vol. 9, No. 4, pp. 85-94, 2013.
- [12] Taghipoor, H. Malekzade Fard, K and Bigdeli, A., "Experimental, numerical and analytical study of energy absorption in high velocity penetration phenomena on composite targets," journal of science and technology of composites, 2018, (Accepted).
- [13] Tavassoli, N. Darvizeh, A. Darvizeh, M and Sabet, A. R., "Analytical and experimental investigation into the crushing behavior of hat shaped composite energy absorber," Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 14, pp. 211-216, 2015.
- [14] Shanazari, H. Liaghat, GH. Hadavinia, H and Aboutorabi, A., "Analytical investigation of high-velocity impact on hybrid unidirectional/woven composite panels," Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 30, No. 4, pp. 545-63, 2017.
- [15] Sikarwar, RS. Velmurugan, R and Gupta, N., "Effect of velocity and fibres on impact performance of composite laminates- Analytical and experimental approach," International journal of crashworthiness, Vol. 22, No. 6, pp. 589-601, 2017.
- [16] Kumar, S. Gupta, DS. Singh, I and Sharma, A., "Behavior of Kevlar/epoxy composite plates under ballistic impact," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 29, No. 13, pp. 2048-64, 2010.
- [17] Bresciani, L. Manes, A. Ruggiero, A. Iannitti, G and 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, Vol. 88, pp. 114-130, 2016.
- [18] Safarabadi, M. Ashkani, p. and Ganjiani, M., "Finite element simulation of high velocity impact on polymer composite plates," Journal of science and technology of composites, 2018, (Accepted).
- [19] Hedayatian, M. Liaghat, GH. Rahimi, G and Pol, H., "Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact," Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014.
- [20] Hedayatian, M. Liaghat, GH. Rahimi, G. Pol, MH. Hadavinia, H and Zamani, R., "Investigation of the high velocity impact behavior of grid cylindrical composite structures," Polymer Composites, Vol. 38, No. 11, pp. 2603-8, 2017.
- [21] Rodríguez Millán, M. Moreno, CE. Marco, M. Santiuste. Miguélez, H., "Numerical analysis of the ballistic behaviour of Kevlar® composite under impact of double-nosed stepped cylindrical projectiles," Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 35, No. 2, pp. 124-137, 2016.
- [22] Taghizadeh, SA. Liaghat, G. Niknejad, A and Pedram, E., "Experimental study on quasi-static penetration process of cylindrical indenters with different nose shapes into the hybrid composite panels," Composite Materials, 0021998318780490, 2018.
- [23] Ramadhan, A. Talib, AA. Rafie, AM. Zahari, R., "High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels," Materials & Design, Vol. 43, pp. 307-321, 2013.
- [24] Pol, MH and Liaghat, G., "Investigation of the high velocity impact behavior of nanocomposites," Polymer Composites, Vol. 37, No. 4, pp. 1173-9, 2016.
- [25] Reis, P. Ferreira, J. Santos, P. Richardson, M and Santos, J., "Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix," Composite Structures, Vol. 94, No. 12, pp. 3520-28, 2012.
- [26] Ghajar, R and Rassaf, A., "Effect of impactor shape and temperature on the behavior of E-glass/epoxy composite laminates," Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 1-8, 2015.
- [27] Chaparian, Y. Kabiri, A. Khaje Arzani, H and Gerami, G., "Experimental and numerical investigation of high velocity impact resistance in fiber metal laminates," Journal of science and technology of composites, 2018, (Accepted).
- [28] Palta, E. Gutowski, M and Fang, H., "A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts," International Journal of Solids and Structures, Vol. 136-137, pp. 279-294, 2018.