



تحلیل عددی اثر انرژی ضربه بر گسترش آسیب تورق در کامپوزیت‌های گلیر

امیررضا امیری‌نژاد¹، محمود مهرداد شکریه^{2*}، سیاوش کاظمی‌راد³

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* ایران، تهران، صندوق پستی 16846-13114، shokrieh@iust.ac.ir، skazemirad@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

چکیده

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان

کامپوزیت فلز-الیاف،

ضربه سرعت پایین،

تورق،

مدل‌سازی اجزای محدود

آسیب ناشی از ضربه‌های سرعت پایین می‌تواند به طور قابل توجهی خواص مکانیکی سازه‌های کامپوزیت فلز-الیاف را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش، یک مدل عددی مبتنی بر مفاهیم الاستیسیته برای شبیه‌سازی پاسخ کامپوزیت‌های فلز-الیاف تحت بارگذاری ضربه‌ای با سرعت پایین توسعه داده شد. کامپوزیت گلیر با آرایش لایه‌ای $[Al/0/90/0/90]_s$ تحت سطوح مختلف انرژی ضربه مدل‌سازی و میزان پلاستیسیته در لایه‌های فلزی به همراه آغاز و گسترش آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی ارزیابی شد. برای مدل‌سازی رفتار الاستوپلاستیک آلیاژ آلومینیوم، از معیار جانسون-کوک و برای پیش‌بینی شروع آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی از نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ی سه‌بعدی معیار هشین استفاده شد. همچنین، گسترش آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی از طریق کاهش ناگهانی سفتی المان‌ها شبیه‌سازی گردید. برخلاف روش‌های مبتنی بر مکانیک شکست که نیازمند تعریف اولیه مسیر ترک هستند، در این مدل از تغییرات ماتریس سفتی برای شبیه‌سازی آسیب تورق بدون استفاده از المان‌های چسبیده استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش انرژی ضربه از 8 به 18.5 ژول، مساحت آسیب تورق در دورترین لایه‌ی کامپوزیتی از ضربه‌زننده از 1081 به 2476 میلی‌متر مربع افزایش یافت. مدل عددی توسعه‌یافته توانست روند ایجاد و گسترش آسیب در نمونه کامپوزیت گلیر را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند.

Numerical analysis of the effect of impact energy on delamination propagation in glare composites

Amirreza Amirinejad¹, Mahmood M. Shokrieh^{1*}, Siavash Kazemirad^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, shokrieh@iust.ac.ir, skazemirad@iust.ac.ir

Keywords

Fiber-metal laminate (FML),
Low-velocity impact,
Delamination,
Finite element modeling

Abstract

Low-velocity impact damage can significantly affect the mechanical properties of fiber-metal composite structures. In this study, an elasticity-based numerical model is developed to simulate the response of fiber-metal composites under low-velocity impact loading. A GLARE laminate with a $[Al/0/90/0/90]_s$ stacking sequence is modeled under different impact energy levels, and plastic deformation in the metallic layers, along with the initiation and propagation of delamination damage in the composite layers, is evaluated. The elastoplastic behavior of the aluminum alloy is modeled using the Johnson-Cook criterion, and the initiation of delamination damage in the composite layers is predicted using a modified three-dimensional Hashin criteria. In addition, the propagation of delamination damage in the composite layers is simulated by instantaneously degrading element stiffness. Unlike fracture-mechanics-based approaches that require predefined crack paths, this model employs stiffness-matrix degradation to simulate delamination damage without using cohesive elements. The results showed that, with increasing the impact energy from 8 J to 18.5 J, the delaminated area in the composite ply farthest from the impactor increased from 1081 to 2476 mm². The developed numerical model predicts the initiation and propagation of damage in the GLARE composite specimen with satisfactory accuracy.

1- مقدمه

بوده و مقرون به صرفه هستند [2]. با این حال، مقاومت پایین کامپوزیت‌های زمینه پلیمری مقابل ضربه باعث شده که سازه‌های ترکیبی مورد بررسی قرار گیرند. استفاده از ورقه‌های فلزی به همراه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، ساختارهای پیچیده‌ای با کارایی بالا را به وجود آورده است. لایه‌های متناوب ورقه‌های کامپوزیتی و ورقه‌های آلیاژ فلزی در کامپوزیت‌های فلز-الیاف کنار یکدیگر قرار گرفته و خواص خستگی و حتی استحکام کامپوزیت‌ها را بهبود

کامپوزیت‌ها به دلیل مزایایی که در استحکام بالا و امکان طراحی دارند، به طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی و سایر زمینه‌ها استفاده می‌شوند [1]. به دلیل خواص مکانیکی برتر، محبوبیت کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا و خودروسازی در مقایسه با آلیاژ فلزی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. این موضوع به دلیل آن است که این مواد از استحکام بالا و وزن سبک برخوردار

در پژوهش‌های اخیر بطور گسترده‌ای از المان‌های چسبنده برای شبیه‌سازی تورق بین‌لایه‌ای استفاده شده است [21-17]. با این حال، روش‌های مبتنی بر مکانیک شکست معمولاً مکان‌های ترک را از پیش تعریف شده فرض کرده و کاربرد آنها را برای نمایش دقیق آسیب‌های ریز پیچیده و تصادفی توزیع شده ناشی از ضربات با سرعت پایین محدود می‌کنند. با توجه به محدودیت‌های ذاتی مکانیک شکست، رویکردهای مدل‌سازی جایگزین که مکانیزم‌های آسیب واقع‌بینانه را بهتر به تصویر می‌کشند، به شدت مورد نیاز هستند.

در این پژوهش، یک مدل عددی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و حلگر صریح⁷ توسعه داده شده است که در آن، رفتار الاستوپلاستیک لایه‌های آلایژ آلومینیومی با استفاده از مدل جانسون-کوک و آغاز آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی با بهره‌گیری از معیار سه‌بعدی اصلاح‌شده هشین شبیه‌سازی شده است. همچنین، رشد آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی با کاهش آبی سفتی در ناحیه آسیب‌دیده، بدون مدل‌سازی رشد تدریجی ترک، صورت پذیرفته است. هدف از این پژوهش، تحلیل دقیق رفتار ضربه‌ای کامپوزیت گلیتر تحت شرایط ضربه با انرژی‌های مختلف و ارائه چارچوبی عددی برای ارزیابی آسیب تورق این ساختارها می‌باشد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در طراحی ایمن‌تر، بهینه‌سازی ساختار و توسعه مدل‌های پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌های فلز-الیاف تحت بارگذاری‌های سرعت پایین مورد استفاده قرار گیرد. در پایان، به منظور اعتبارسنجی مدل عددی توسعه‌یافته، نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی عددی با نتایج حاصل از مطالعات تجربی گذشته مقایسه شدند.

2- مواد و روش‌ها

در این مطالعه کامپوزیت گلیتر با لایه‌چینی [Al/0/90/0/90]_s تحت ضربه سرعت پایین تحت انرژی‌های ضربه 8، 11.5، 15 و 18.5 ژول قرار گرفت و توسعه آسیب در چندلایه فلز-الیاف بررسی شد. تغییر شکل پلاستیک آلایژ فلزی و تورق در چندلایه کامپوزیتی از آسیب‌های مهمی هستند که در این مدل‌سازی به آن پرداخته شده و نحوه توسعه این آسیب‌ها مورد بحث قرار گرفته است. جنس آلایژ فلز کامپوزیت گلیتر ورق آلایژ آلومینیوم 6061-T6 با ضخامت 0.4 میلی‌متر بوده و چندلایه کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی با ضخامت هر لایه برابر با 0.175 میلی‌متر در نظر گرفته شد.

2-1- آلایژ آلومینیوم 6061-T6

با توجه به نتایج آزمایشگاهی، پس از ضربه سرعت پایین در کامپوزیت فلز-الیاف، آلایژ فلزی می‌تواند به تنش تسلیم رسیده و وارد ناحیه پلاستیک شود [22]. مدل جانسون-کوک می‌تواند رفتار تنش-کرنش مواد فلزی تحت بارگذاری‌ها با نرخ کرنش پایین تا متوسط را به خوبی معادل‌سازی کند [23-24]. تنش معادل توسط معادله زیر نمایش داده می‌شود:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

که در آن σ_y تنش مؤثر، ε کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش پلاستیک مؤثر، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک مرجع ($1s^{-1}$)، n ضریب سخت‌شوندگی کار، A ، B ، C و m ثوابت مواد و T^{*m} دمای همسان هستند.

می‌بخشند. همچنین چقرمگی این نوع مواد افزایش و قیمت ماده نهایی کاهش می‌یابد [3]. در میان این مواد، کامپوزیت‌های لایه‌ای مبتنی بر آلایژ آلومینیوم و الیاف شیشه که با عنوان گلیتر¹ شناخته می‌شوند به دلیل خواص برجسته‌ای نظیر مقاومت بالا در برابر خستگی و ضربه، به طور گسترده در ساخت بدنه هواپیماها مانند ایرباس A380 و اجزای خودروها استفاده می‌شوند [4,5].

با وجود مزایای قابل توجه، چندلایه‌های گلیتر آسیب‌پذیری‌هایی را نشان می‌دهند به‌ویژه هنگامی که در معرض ضربات با سرعت پایین مانند افتادن ابزار در حین عملیات تعمیر و نگهداری یا برخورد با اشیاء خارجی قرار می‌گیرند. این ضربات به‌ظاهر جزئی اغلب باعث آسیب‌های قابل توجهی از جمله تورق و تغییر شکل پلاستیک در لایه‌های فلزی می‌شوند. چنین مکانیزم‌های آسیبی در مجموع یکپارچگی سازه را به خطر انداخته و نگرانی‌های ایمنی شدیدی را ایجاد می‌کند [6, 7]. علاوه بر این، ماهیت پنهان آسیب تورق، تشخیص و ارزیابی آن را پیچیده کرده و نیاز به روش‌های دقیق و قابل اعتماد پیش‌بینی این آسیب را برجسته می‌کند. روش‌های تجربی موجود با وجود دقت بالا به دلیل هزینه‌های زیاد، پیچیدگی اجرای آزمایش‌ها و محدودیت در تکرارپذیری، در شناسایی آسیب تورق با چالش‌هایی مواجه هستند [8].

شبیه‌سازی عددی رفتار ضربه‌ای این مواد، به عنوان ابزاری کارآمد برای تحلیل و پیش‌بینی دقیق آسیب توسعه‌یافته است. مدل‌سازی دقیق، نیازمند درک عمیق از مکانیزم‌های شکست در مواد کامپوزیتی و فلزی و همچنین به‌کارگیری معیارهای مناسب برای پیش‌بینی و رشد آسیب می‌باشد [9,10]. برای نمونه، زارعی² و همکاران [11] با بهره‌گیری از شبیه‌سازی اجزای محدود برای تحلیل رفتار ضربه‌ای سازه‌های کامپوزیتی، دقت و کارآمدی رویکرد عددی را در مطالعه مکانیزم‌های شکست نشان دادند. همچنین سئو³ و همکاران در تحقیقی دو مدل آسیب دوبعدی و سه‌بعدی کامپوزیت فلز-الیاف تحت ضربه را مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که مدل سه‌بعدی نسبت به مدل دوبعدی آسیب را زودتر پیش‌بینی می‌کند [12]. استفاده درست از معیارهای شروع و پیش‌روندگی آسیب می‌تواند در نمایش آسیب درون لایه‌ای تأثیر زیادی داشته باشد. مایو⁴ و همکاران در تحقیق خود به مدل‌سازی و پیش‌بینی آسیب تورق ناشی از ضربه سرعت پایین در کامپوزیت‌های فلز-الیاف پرداختند. آنها با مدل اجزا محدود خود موفق شدند آسیب تورق را مدل‌سازی کنند. مایو و همکاران با استفاده از مدل آسیب پیش‌رونده موفق شدند پاسخ ضربه به کامپوزیت‌های فلز-الیاف را مورد بررسی قرار دهند [13].

بیشتر تحقیقات قبلی در درجه اول از اصول مکانیک شکست، به‌ویژه نظریه ناحیه چسبنده، برای مدل‌سازی شروع و انتشار آسیب تورق در کامپوزیت‌های فلز-الیاف استفاده کرده‌اند [6,14]. اژدری⁵ و همکاران، رفتار ضربه‌ای کامپوزیت گلیتر را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار داده و برای مدل‌سازی تورق بین‌لایه‌ای از المان‌ها و سطوح چسبنده استفاده کرده‌اند، به‌گونه‌ای که محل‌های بالقوه جدایش به‌صورت بین‌لایه‌ای و از پیش تعیین شد [15]. همچنین در پژوهشی دیگر، سلطانی⁶ و همکاران رفتار ضربه‌ای کامپوزیت گلیتر را با استفاده از ترکیب مدل جانسون-کوک در لایه‌های آلومینیومی، معیارهای هشین-پاک در لایه‌های کامپوزیتی و مدل ناحیه چسبنده برای شبیه‌سازی تورق را بررسی کردند. این رویکرد به طور ذاتی نیازمند تعریف اولیه سطوح بین‌لایه‌ای و مسیرهای گسترش ترک به کمک المان‌های چسبنده است [16].

⁵ Azhdari⁶ Soltani⁷ ABAQUS/Explicit¹ GLARE² Zarei³ Seo⁴ Maio

زمانی که عبارت‌های بالا ارضا شوند، یا به عبارت دیگر زمانی که قسمت چپ معادله به مقدار 1 و یا بیشتر از آن برسد، در آن نقطه آسیب تورق شروع خواهد شد.

4-2 مدل توسعه آسیب در لایه‌های کامپوزیتی

ارضای معادلات آغاز آسیب به معنی شروع آسیب بوده و بارگذاری بیشتر باعث افزایش و توسعه آسیب می‌گردد. یکی از دیدگاه‌های توسعه آسیب، کاهش ماتریس سفتی پس از ایجاد آغاز آسیب است. مقدار سفتی کاهش‌یافته لایه‌های کامپوزیتی باتوجه به آسیب تورق در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3 مقدار سفتی کاهش یافته لایه‌های کامپوزیتی با توجه به آسیب تورق
Table 3 Reduced stiffness values of composite layers due to delamination damage

ایجاد آسیب تورق ناشی از کشش و فشار	
پارامترهای مادی	مقدار کاهش یافته
E_{33}	0.1 GPa
G_{23}	0.1 GPa
G_{13}	0.1 GPa
ν_{23}	0.027
ν_{13}	0.03

در این پژوهش از المان‌های چسبنده بین لایه‌ها استفاده نشد و فرآیند تورق به صورت ضمنی در چارچوب المان‌های حجیم سه‌بعدی مدلسازی شده است. پس از فعال‌شدن معیار شروع تورق، با کاهش آنی پارامترهای سفتی، انتقال تنش بین لایه‌ای به طور مؤثر از بین می‌رود. در نتیجه، لایه‌های مجاور قادر به تحمل برش خارج از صفحه نبوده و تورق به صورت طبیعی و وابسته به میدان تنش گسترش می‌یابد. این فرایند در زیر روال VUMAT و بدون نیاز به مسیر ترک از پیش تعریف‌شده انجام می‌شود. در این رویکرد، پس از فعال‌شدن معیار آغاز آسیب، مدول الاستیک، مدول‌های برشی و ضرایب پواسون مطابق جدول 3 کاهش داده می‌شوند تا کاهش شدید ظرفیت انتقال تنش در المان‌های آسیب‌دیده شبیه‌سازی گردد و درعین حال پایداری عددی مدل حفظ شود. این مقادیر سفتی کاهش یافته به گونه‌ای تنظیم شده‌اند که نمودارهای نیرو-زمان، نیرو-جابجایی و انرژی جذب‌شده-زمان در مدل عددی، تطابق قابل‌قبولی با نتایج آزمایشگاهی مرجع [15] داشته باشند؛ بنابراین، مقادیر ارائه شده در جدول 3 در چارچوب فرایند تنظیم و اعتبارسنجی مدل تعیین شده‌اند.

5-2 نوع المان

برای مدل‌سازی لایه‌ی آلیاژ آلومینیوم و چندلایه کامپوزیتی از المان‌های جامد شش‌وجهی هشت‌گره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته (C3D8R) همراه با فعال‌سازی کنترل پدیده‌ی ساعت شنی استفاده شد. به منظور افزایش دقت محاسبات، در اطراف ناحیه‌ی ضربه از مش‌بندی ریزتری استفاده گردید. برای اطمینان از استقلال نتایج عددی از اندازه مش، یک مطالعه حساسیت مش روی المان‌های سه‌بعدی در ناحیه برخورد انجام شد. در این بررسی، طول لبه المان‌ها به سه مقدار 1.25، 1 و 0.75 میلی‌متر تنظیم گردید و تحلیل برای هر سه حالت به صورت کامل اجرا شد. شاخص‌هایی شامل حداکثر نیرو، زمان رسیدن به اوج نیرو و جابجایی نهایی ضربه‌زننده برای مطالعه حساسیت مش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه مش از 1.25 میلی‌متر به 1 میلی‌متر، تغییرات نیروی بیشینه و جابجایی بیشینه به ترتیب حدود 4.33 درصد و 3.00 درصد بوده‌است. براین اساس، اندازه مش 1 میلی‌متر به عنوان اندازه مناسب در

اثرات مرتبط با دما در این پژوهش به علت انرژی پایین ضربه در نظر گرفته نشده است. بر اساس قانون تجمعی آسیب مدل جانسون-کوک، آسیب به صورت زیر پیش‌بینی می‌شود:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \quad (2)$$

همچنین کرنش پلاستیک مؤثر به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)](1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \quad (3)$$

که در آن σ^* نشان‌دهنده تنش سه‌محوره می‌باشد. مؤلفه‌های D_1 ، D_2 ، D_3 و D_4 ثوابت شکست هستند. شکست المان‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار $D=1$ شود. مؤلفه‌های مدل مواد برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 مؤلفه‌های مدل جانسون-کوک برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 [15]

Table 1 Johnson-Cook model parameters for the 6061-T6 aluminum alloy [25]

ρ (kg/m ³)	ν	E (GPa)	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
2703	0.33	70.00	324.10	113.80	0.42	0.002	1.34
D_1	D_2	D_3	D_4	D_5			
-0.77	1.45	-0.47	0.00	1.60			

2-2 تک‌لایه شیشه/اپوکسی

کامپوزیت‌ها ماده‌ای مرکب هستند که از دو یا چند ماده مختلف تشکیل شده‌اند. به طور کلی یک تک‌لایه کامپوزیتی دارای خواص همسانگرد عرضی¹ می‌باشد. اگر راستای 1 را در راستای الیاف و راستای 2 را عمود بر الیاف در صفحه 1-2 در نظر بگیریم، خواص کامپوزیت در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی [15]

Table 2 Mechanical properties of the glass/epoxy composite layers [15]

E_1 (GPa)	$E_2 = E_3$ (GPa)	$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{13}$	ν_{23}	ρ (kg/m ³)
37.21	10.52	3.00	2.70	0.30	0.27	1604
X_T (MPa)	X_C (MPa)	Y_T (MPa)	Y_C (MPa)	$S_{12} = S_{13}$ (MPa)	S_{23} (MPa)	
589.78	416.39	48.68	120.70	43.54	34.00	

3-2 معیار آغاز آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی

معیار سه‌بعدی آسیب هشین بهبودیافته یکی از معروف‌ترین معیارها در پیش‌بینی آغاز آسیب در یک تک‌لایه کامپوزیتی است که در کارهای پژوهشی و صنعتی پیشین به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [26-28]. برای استفاده از این معیار در نرم افزار آباکوس از زیررول² استفاده گردید. معیار آغاز آسیب تورق ناشی از کشش ($\sigma_{33} > 0$) و تورق ناشی از فشار ($\sigma_{33} < 0$)، به ترتیب، در معادلات 4 و 5 ارائه شده‌اند.

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{S_{23}}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

² Subroutine

¹ Transversely Isotropic

نتایج آزمایشگاهی است. شکل 2 مقایسه مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ فلزی در مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] پس از ضربه 18.5 ژول را نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌توان دریافت که مدل جانسون-کوک توانست فرآیند تغییر شکل پلاستیک آلیاژ فلزی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند، به‌طوری که مساحت ناحیه‌ی پلاستیک بدست آمده از مدل عددی و آزمایشگاهی طبق شکل 2 تطابق خوبی با یکدیگر داشتند.

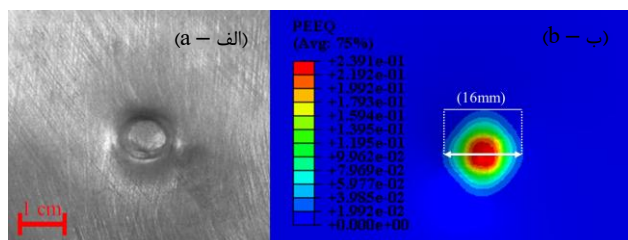


Fig. 2 The comparison of the plastic deformation area in the metallic alloy after 18.5 J impact; (a) experimental result [15], and (b) numerical model result

شکل 2 مقایسه مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ فلزی پس از ضربه 18/5 ژول: (الف) نتیجه آزمایشگاهی [15] و (ب) نتیجه مدل عددی

در شکل‌های 3 تا 5 به ترتیب مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ فلزی بدست آمده از مدل عددی پس از ضربه‌های 15، 11.5 و 8 ژول در لایه‌ی تماس با ضربه‌زن و لایه‌ی دور از محل تماس با ضربه‌زن نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ آلومینیوم پایین (لایه‌ی دور از محل تماس با ضربه‌زن) بیشتر از آلیاژ آلومینیوم بالایی (لایه‌ی در تماس با ضربه‌زن) است. همچنین، با افزایش میزان انرژی ضربه، مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ فلزی بیشتر شد. تطابق شرایط مدل‌سازی و آزمایشگاهی نیز نشان داد که مدل جانسون-کوک به خوبی توانست رفتار الاستوپلاستیک آلیاژ آلومینیوم را مدل‌سازی کند.

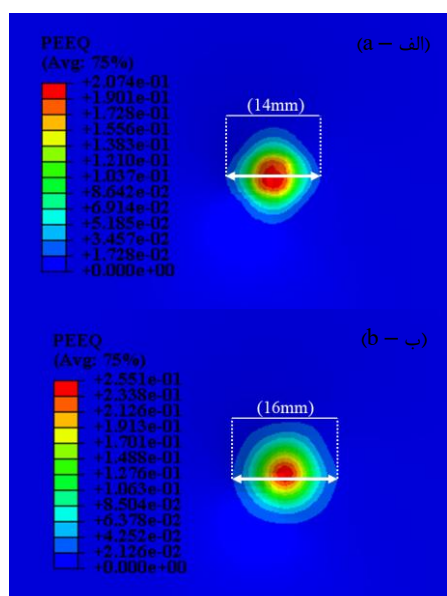


Fig. 3 The plastic deformation area in the metallic alloy after a 15 J impact in the (a) impact-side layer and (b) opposite-side layer

شکل 3 مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ فلزی بدست آمده از مدل عددی پس از ضربه 15 ژول در (الف) لایه‌ی در تماس با ضربه‌زن و (ب) لایه‌ی دور از محل تماس با ضربه‌زن

ناحیه برخورد انتخاب شد. در نواحی دورتر از محل ضربه نیز از مش درشت‌تر برای کاهش هزینه محاسباتی استفاده گردید. همچنین، باتوجه به نتایج آزمایشگاهی که نشان‌دهنده عدم نفوذ در نمونه بودند، حذف المان در مدل‌سازی عددی مجاز دانسته نشد [15].

6-2- ضربه‌زننده

نحوه تماس بین ضربه‌زننده و کامپوزیت گلیر به‌صورت الگوی تماس عمومی¹ در آباکوس/اکسپلیسیت مدل‌سازی شد. ضریب اصطکاک $\mu=0.3$ بین ضربه‌زننده و کامپوزیت گلیر لحاظ گردید. مقدار ضریب اصطکاک بر اساس گزارش‌های تجربی موجود برای ضربه کم‌سرعت به چندلایه‌های فلز-الیاف و همچنین داده‌های آزمایشگاهی مرجع [15] انتخاب شد. همچنین ضربه‌زننده به‌صورت صلب مدل‌سازی شد و باتوجه به جرم ثابت آن، با تغییر سرعت برخورد ضربه‌زننده به کامپوزیت گلیر، انرژی‌های ضربه‌ای معادل 8، 11.5، 15 و 18.5 ژول مدل‌سازی و بررسی شدند.

7-2- هندسه شبیه‌سازی‌شده

در مدل عددی، دو ورق از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 هر یک با ضخامت 0.4 میلی‌متر در بالا و پایین نمونه کامپوزیت گلیر قرار داده شدند. همچنین هشت لایه از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی هر یک با ضخامت 0.175 میلی‌متر با لایه‌چینی $[Al/0/90/0/90]_s$ مدل‌سازی شدند. ابعاد کلی کامپوزیت گلیر برابر با 150×100 میلی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین دو گیره متشکل از دو صفحه فولادی با ابعاد 150×100 میلی‌متر که دارای سوراخی به ابعاد 60×60 میلی‌متر در مرکز خود بودند، کامپوزیت گلیر را به‌طور کامل در میان خود ثابت نگه داشتند تا در حین آزمایش از سرخوردن نمونه و جابجایی آن جلوگیری شود. نوک ضربه‌زننده به صورت نیمکره‌ای به قطر 10 میلی‌متر مطابق با شرایط آزمایشگاهی مدل‌سازی شد. همچنین جرم ضربه‌زننده باتوجه به آزمایش صورت گرفته 7 کیلوگرم در نظر گرفته شده بود [15]. شکل 1 هندسه نمونه کامپوزیت گلیر شبیه‌سازی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

باتوجه به مش‌بندی هدفمند و عدم استفاده از مقیاس‌دهی جرمی²، حل مدل عددی بدون نیاز به سخت‌افزار خاص و با زمان محاسباتی مناسب انجام شده است.

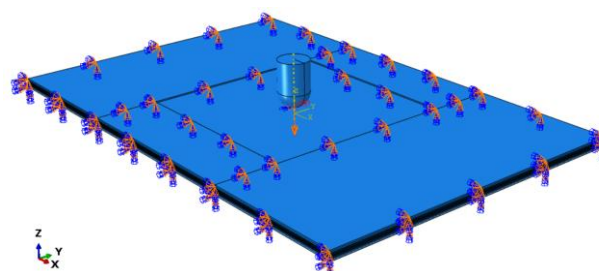


Fig. 1 The geometry of the GLARE composite specimen simulated in the ABAQUS software

شکل 1 هندسه نمونه کامپوزیت گلیر شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

3- نتایج و بحث

3-1- آسیب لایه آلیاژ فلزی

پس از ضربه سرعت پایین در کامپوزیت گلیر، آلیاژ فلزی دچار آسیب شده و وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. یکی از معیارهای اعتبارسنجی مدل عددی توسعه‌یافته، مقایسه مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در مدل عددی با

² Mass Scaling

¹ General contact algorithm

دچار آسیب تورق شدند. پس از آن، المان‌های آسیب‌دیده دچار کاهش سفتی شده که در نتیجه نیروی مقاومت کامپوزیت گلیتر در برابر ضربه یا همان نیروی تماس بین ضربه‌زننده و کامپوزیت گلیتر کاهش یافت. نیروی تماس بین ضربه‌زننده و کامپوزیت گلیتر به کمک تعریف نقطه مرجع¹ بر روی ضربه‌زننده از مدل‌سازی عددی استخراج شد. همانطور که در شکل 6 دیده می‌شود، مدل عددی توسعه یافته به خوبی فرایند بارگذاری را مدل‌سازی کرده است، اما در زمان باربرداری نتایج مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی کمی اختلاف داشت. این اختلاف می‌تواند به این دلیل باشد که در ضربه 18.5 ژول، ترک‌هایی در قسمت ضربه نخورده آلیاژ آلومینیوم ایجاد شد که این موضوع باعث کاهش خواص مکانیکی قطعه و به تبع آن باعث کاهش نیرو می‌شود. بر همین اساس، بخشی از انرژی ضربه‌زننده صرف ایجاد ترک در لایه آلیاژ آلومینیوم شده که باعث می‌شود در هنگام بازگشت ضربه‌زننده، نیروی کمتری به آن وارد شود. به این دلیل که ایجاد و گسترش ترک در آلیاژ فلزی در مدل عددی لحاظ نشده است، نیروی حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود در زمان باربرداری بیشتر بوده که این اختلاف در ضربه‌های با انرژی پایین‌تر، کمتر شده است.

شکل 7 نمودار نیرو-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای انرژی ضربه 18.5 ژول را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، حداکثر جابجایی ضربه‌زننده در نتایج عددی و آزمایشگاهی برای ضربه 18.5 ژول به هم نزدیک بوده است. همانطور که در شکل 7 دیده می‌شود، در یک میزان جابجایی برابر (پس از رسیدن به حداکثر نیرو)، مقدار نیروی ضربه‌زننده در مدل عددی بیشتر از مقدار آزمایشگاهی بوده است. این اختلاف به دلیل آن است که در مدل عددی مکانیزم‌های اتلاف انرژی مانند گرما و صوت و همچنین تشکیل ترک‌ها و ریزترک‌های احتمالی در آلیاژ آلومینیوم، در نظر گرفته نشده است. در نتیجه، در هنگام بازگشت ضربه‌زننده، انرژی ذخیره شده در ضربه‌زننده بیشتر و به تبع آن نیروی بیشتری دارد.

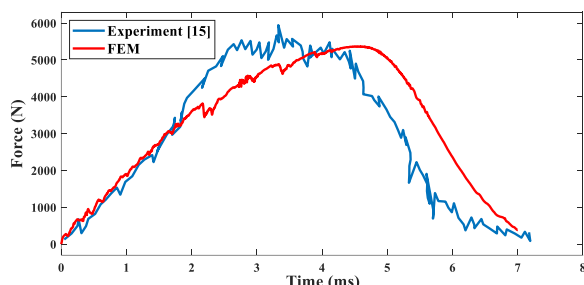


Fig. 6 Force-time diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 18.5 J

شکل 6 نمودار نیرو-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 18.5 ژول

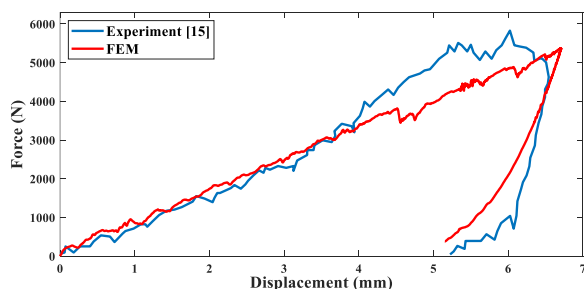


Fig. 7 Force-displacement diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 18.5 J

شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 18.5 ژول

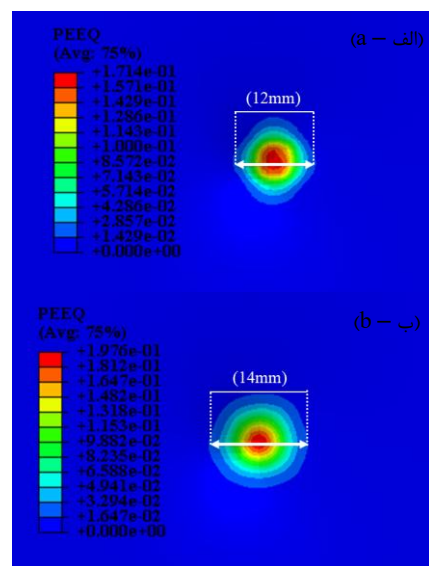


Fig. 4 The plastic deformation area in the metallic alloy after a 11.5 J impact in the (a) impact-side layer and (b) opposite-side layer

شکل 4 مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ فلزی بدست آمده از مدل عددی پس از ضربه 11.5 ژول در (الف) لایه‌ی در تماس با ضربه‌زن و (ب) لایه‌ی دور از محل تماس با ضربه‌زن

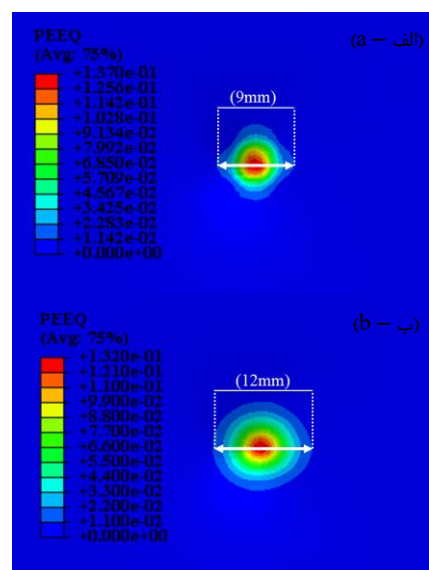


Fig. 5 The plastic deformation area in the metallic alloy after an 8 J impact in the (a) impact-side layer and (b) opposite-side layer

شکل 5 مساحت ناحیه تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ فلزی بدست آمده از مدل عددی پس از ضربه 8 ژول در (الف) لایه‌ی در تماس با ضربه‌زن و (ب) لایه‌ی دور از محل تماس با ضربه‌زن

3-2- آسیب تورق کامپوزیت گلیتر پس از ضربه

از دیگر معیارهای اعتبارسنجی مدل عددی توسعه‌یافته، بررسی نمودارهای نیرو-زمان، نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده-زمان برای کامپوزیت گلیتر در ضربه سرعت پایین در انرژی‌های ضربه 8، 11.5، 15 و 18.5 ژول است.

شکل 6 نمودار نیرو-زمان ضربه‌زننده بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 18.5 ژول را نشان می‌دهد. در ابتدا با پرتاب ضربه‌زننده، نیروی تماس بین ضربه‌زننده و کامپوزیت گلیتر افزایش پیدا کرد. پس از افزایش نیرو و تنش در المان‌های اطراف ناحیه برخورد، برخی از المان‌ها

¹ Reference Point

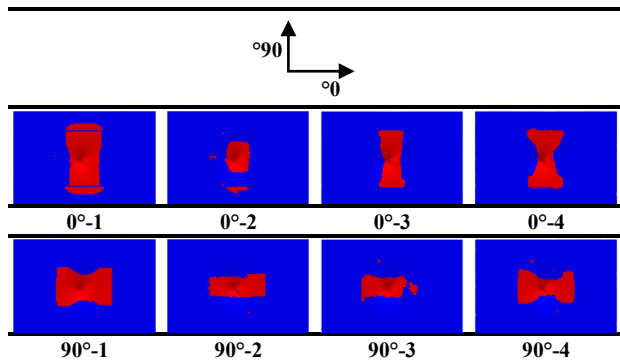


Fig. 10 Delamination due to the induced compressive and tensile loading after an 18.5 J impact

شکل 10 تورق ناشی از فشار و کشش ایجاد شده پس از ضربه 18.5 ژول

در شکل‌های 11، 12 و 13 به ترتیب مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی [15] نیرو-زمان، نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده-زمان کامپوزیت گلیتر برای ضربه 15 ژول مشاهده می‌شود. این نتایج نشان داد که مدل عددی توسعه یافته توانست فرایند ضربه سرعت پایین در انرژی ضربه 15 ژول را با دقت مناسبی مدل‌سازی کند.

شکل 14 تورق ایجاد شده در لایه‌های مختلف کامپوزیت گلیتر برای ضربه 15 ژول را نمایش می‌دهند. همانطور که در این شکل‌ها قابل مشاهده است، جهت و نحوه ایجاد آسیب پس از ضربه‌های 15 و 18.5 ژول مشابه هم بودند و فقط مساحت آسیب پس از ضربه 15 ژول کمتر بود.

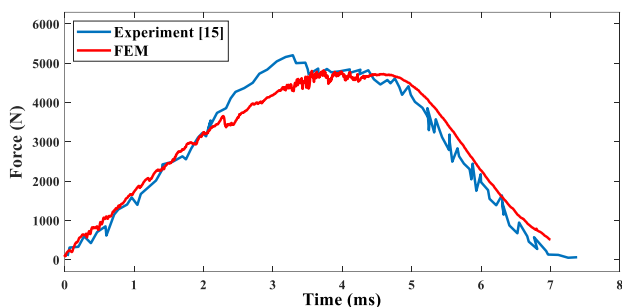


Fig. 11 Force-time diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 15 J

شکل 11 نمودار نیرو-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 15 ژول

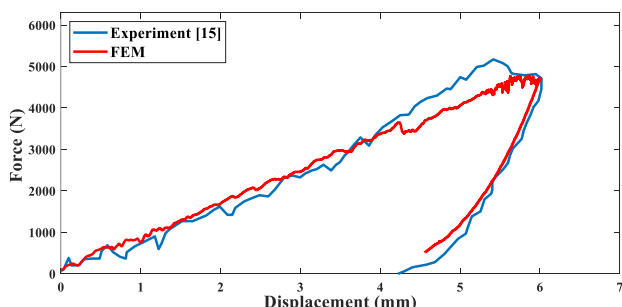


Fig. 12 Force-displacement diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 15 J

شکل 12 نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 15 ژول

شکل 8 نمودار انرژی جذب شده-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 18.5 ژول در کامپوزیت گلیتر را نشان می‌دهد. انرژی جذب شده توسط کامپوزیت گلیتر بیانگر انرژی است که قطعه دریافت می‌کند و این انرژی صرف تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک در آلیاژ آلومینیوم، و همچنین ایجاد تغییر شکل و آسیب در لایه‌های کامپوزیتی می‌شود. در واقع، این نمودار معادل مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی است. در مدل عددی، کامپوزیت گلیتر انرژی کمتری جذب می‌کند که علت آن در نظر نگرفتن مکانیزم‌هایی نظیر ایجاد ترک در آلیاژ آلومینیوم است.

تطابق نتایج عددی و آزمایشگاهی [15] در نمودارهای نیرو-زمان، نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده-زمان نشان داد که مدل عددی توسعه یافته در این مطالعه توانست فرایند ضربه سرعت پایین در انرژی ضربه 18.5 ژول را با دقت مناسبی مدل‌سازی کند.

شکل 9 نحوه نام‌گذاری لایه‌های مختلف نمونه کامپوزیت گلیتر به منظور نمایش شکل آسیب در آنها در این بخش را نشان می‌دهد.

شکل 10 تورق ایجاد شده در لایه‌های مختلف کامپوزیت گلیتر برای ضربه 18.5 ژول را نمایش می‌دهند. قسمت‌های قرمز رنگ المان‌هایی را نشان می‌دهند که آسیب‌دیده و افت خواص مکانیکی داشته‌اند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، آسیب ایجاد شده در لایه‌های صفر و 90 درجه عمود بر جهت الیاف هستند که در مدل عددی جهت آسیب به درستی پیش‌بینی شد. همچنین مشاهده شد که دورترین لایه صفر درجه نسبت به محل برخورد ضربه‌زن، مساحت آسیب بیشتری نسبت به لایه صفر درجه در نزدیکی محل برخورد داشت. همچنین در دورترین لایه 90 درجه نسبت به محل برخورد ضربه‌زن، سطح آسیب بیشتری دیده شد.

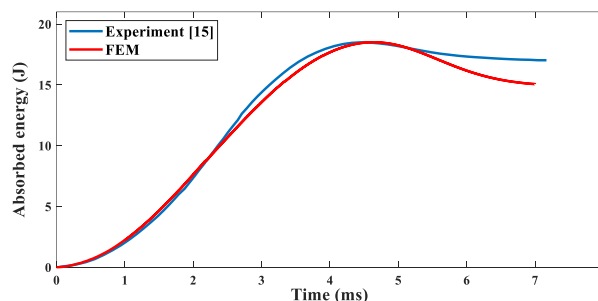


Fig. 8 Absorbed energy-time obtained from the numerical model and experimental study [15] diagram for the 18.5 J impact

شکل 8 نمودار انرژی جذب شده-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 18.5 ژول

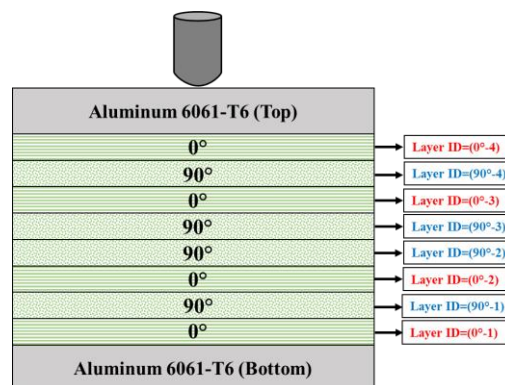


Fig. 9 Labeling of different layers of the GLARE composite specimen

شکل 9 نام‌گذاری لایه‌های مختلف نمونه کامپوزیت گلیتر

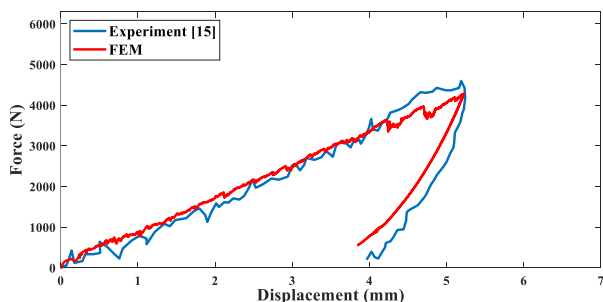


Fig. 16 Force-displacement diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 11.5 J

شکل 16 نمودار نیرو-جابجایی برای انرژی ضربه 11.5 ژول

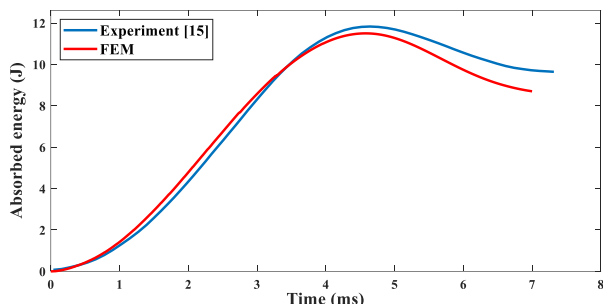


Fig. 17 Absorbed energy-time diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the 11.5 J impact

شکل 17 نمودار انرژی جذب شده-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 11.5 ژول

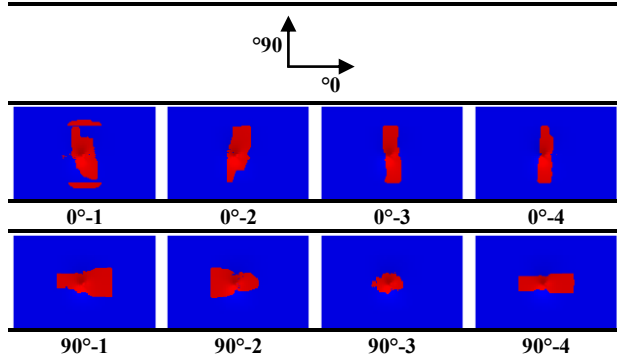


Fig. 18 Delamination due to the induced compressive and tensile loading after an 11.5 J impact

شکل 18 تورق ناشی از فشار و کشش ایجاد شده پس از ضربه 11.5 ژول

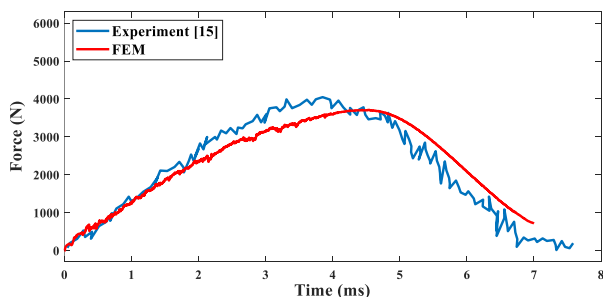


Fig. 19 Force-time diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 8 J

شکل 19 نمودار نیرو-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای انرژی ضربه 8 ژول

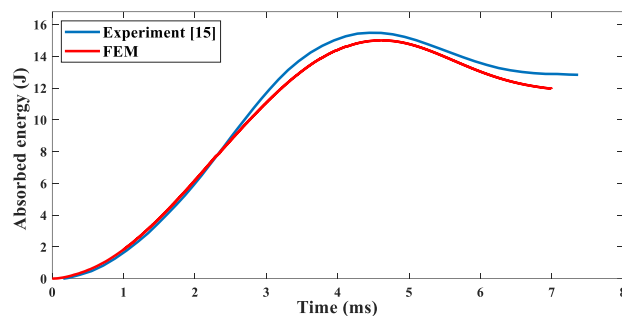


Fig. 13 Absorbed energy-time diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the 15 J impact

شکل 13 نمودار انرژی جذب شده-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 15 ژول

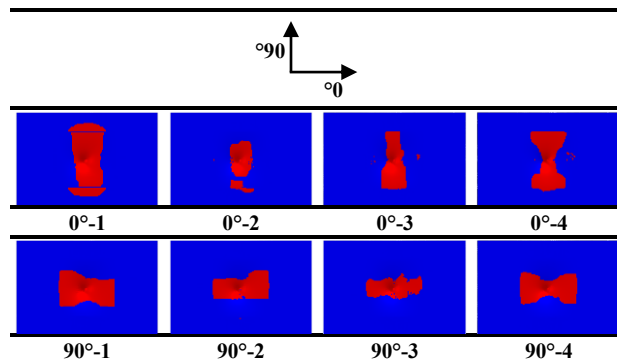


Fig. 14 Delamination due to the induced compressive and tensile loading after a 15 J impact

شکل 14 تورق ناشی از فشار و کشش ایجاد شده پس از ضربه 15 ژول

در شکل های 15، 16 و 17 به ترتیب مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی [15] نیرو-زمان، نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده-زمان کامپوزیت گیلر برای ضربه 11.5 ژول مشاهده می شود. این نتایج نیز نشان داد که مدل عددی توسعه یافته توانست فرایند ضربه سرعت پایین در انرژی ضربه 11.5 ژول را با دقت مناسبی مدل سازی کند.

شکل 18 تورق ایجاد شده در لایه های مختلف کامپوزیت گیلر برای ضربه 11.5 ژول را نمایش می دهند. همانطور که در این شکل ها قابل مشاهده است، مساحت آسیب پس از ضربه 11.5 ژول کمتر از ضربه های 15 و 18.5 ژول بود. در شکل های 19، 20 و 21 به ترتیب مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی [15] نیرو-زمان، نیرو-جابجایی و انرژی جذب شده-زمان کامپوزیت گیلر برای ضربه 8 ژول مشاهده می شود، که تطابق خوبی بین این نتایج وجود داشت.

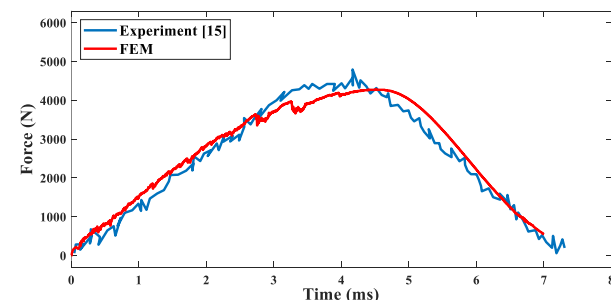


Fig. 15 Force-time diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 11.5 J

شکل 15 نمودار نیرو-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 11.5 ژول

مساحت آسیب نشان می‌دهد که افزایش انرژی ضربه موجب رشد قابل ملاحظه‌ای در وسعت ناحیه تورق می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که توزیع و شدت آسیب تورق مستقیماً تابع میدان تنش ناشی از ضربه است. در تمامی انرژی‌های بررسی‌شده، لایه‌های دورتر از نقطه تماس، به‌ویژه دورترین لایه‌های صفر و 90 درجه نسبت به ضربه‌زننده، آسیب تورق بیشتری را تجربه کردند که مطابق با رفتار خمشی نمونه تحت ضربه سرعت پایین است.

4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رفتار کامپوزیت گلیر با لایه‌چینی [Al/0/90/0/90]_s تحت ضربه‌ی سرعت پایین با انرژی‌های مختلف به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شد و چارچوبی عددی برای ارزیابی آسیب تورق ارائه گردید. نتایج نشان داد با افزایش سرعت ضربه‌زننده، انرژی ضربه و مساحت آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی افزایش می‌یابد و بخش بیشتری از آلیاژ آلومینیوم وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. به طور کمی، افزایش انرژی ضربه از 8 به 18.5 ژول باعث افزایش مساحت آسیب تورق در دورترین لایه‌ی صفر درجه نسبت به ضربه‌زننده حدود 129 درصد و در دورترین لایه‌ی 90 درجه حدود 47 درصد گردید. بخشی از انرژی ضربه جذب نمونه و بخشی به‌صورت انرژی الاستیک ذخیره شده و باعث برگشت ضربه‌زننده می‌شود. انرژی جذب شده صرف ایجاد آسیب‌هایی همچون تورق و پلاستیسیت شدن آلیاژ فلزی می‌گردد. مدل اجزای محدود توسعه‌یافته در این پژوهش برای ضربات کم‌انرژی مناسب است، زیرا در این حالت هیچ آسیبی به‌غیر از تغییر شکل پلاستیک در آلیاژ آلومینیوم دیده نمی‌شود. برتری اصلی این مدل نسبت به رویکردهای مبتنی بر مکانیک شکست در آن است که آسیب‌ها با استفاده از مفاهیم الاستیسیت و تغییرات در ماتریس سفتی شبیه‌سازی می‌شوند. این رویکرد نیازی به تعریف اولیه مکان ترک ندارد و امکان نمایش واقع‌بینانه‌تری از آسیب‌های ناشی از ضربات سرعت پایین فراهم می‌آورد. مدل عددی توسعه‌یافته می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در تحلیل و طراحی سازه‌های هیبریدی مشابه مورد استفاده قرار گیرد. شایان ذکر است در این مدل، مکانیزم‌های شکست در لایه‌های آلومینیوم (شامل گسترش ترک‌های درون لایه‌ای) تنها از طریق پلاستیسیت مدل شده و مکانیزم شکست صریح برای آلیاژ فلزی لحاظ نشده است. همچنین اثرات نرخ کرنش در لایه‌های کامپوزیتی با توجه به سرعت پایین ضربه در مدل حاضر مورد توجه قرار نگرفته و می‌تواند منجر به اختلاف جزئی با نتایج تجربی در بخش باربرداری شود. در پژوهش‌های بعدی می‌توان مدل‌های عددی را برای محدوده‌های گسترده‌تری از سرعت برخورد و هندسه‌های مختلف نمونه گسترش داد.

مراجع

- [1] Lu, B., Zhang, J., Zheng, D., Zhang, T., Xie, J., "Study On Off-Center Impact Behavior And Damage Characterization Of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminate," Composite Structures, Vol. 304, pp. 116404, 2023.
- [2] Phiri, R., Rangappa, S.M., Siengchin, S., Oladijo, O.P., Ozbakkaloglu, T., "Advances In Lightweight Composite Structures And Manufacturing Technologies: A Comprehensive Review," Heliyon, Vol. 10, No. 21, pp. e39661, 2024.
- [3] Parvande, P., Hamed, M., Rezghi Maleki, H., "Investigation Of Glass, Basalt, And Hybrid Fibers Effect On The Mechanical Behavior And Energy Absorption Of Fiber-Metal Laminates Based On 5052 Aluminum Alloy," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 12, No. 1, pp. 2704-2716, 2025.
- [4] Zhang, J., Wang, Y., Wen, Y., Dai, X., Zhao, Y., Fang, G., "Energy Dissipation Mechanism Of Fiber Metal Laminate Under Low-

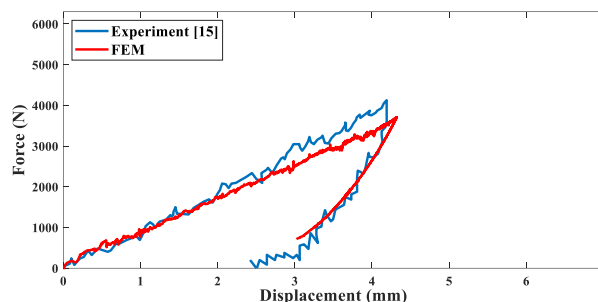


Fig. 20 Force-displacement diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the impact energy of 8 J

شکل 20 نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 8 ژول

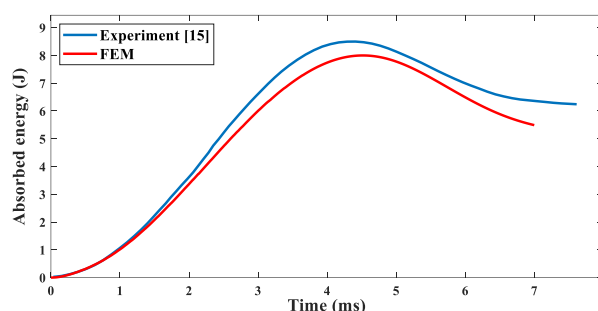


Fig. 21 Absorbed energy-time diagram obtained from the numerical model and experimental study [15] for the 8 J impact

شکل 21 نمودار انرژی جذب شده-زمان بدست آمده از مدل عددی و مطالعه آزمایشگاهی [15] برای ضربه 8 ژول

شکل 22 تورق ایجاد شده در لایه‌های مختلف کامپوزیت گلیر برای ضربه 8 ژول را نمایش می‌دهند. همانطور که در این شکل‌ها قابل مشاهده است، مساحت آسیب تورق پس از ضربه 8 ژول کمتر از ضربه‌های 11.5، 15 و 18.5 ژول بود.

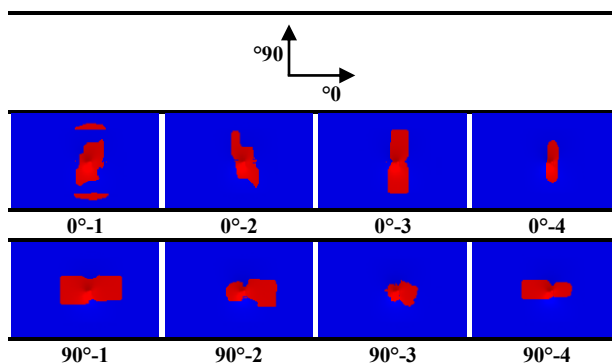


Fig. 22 Delamination due to the induced compressive and tensile loading after an 8 J impact

شکل 22 تورق ناشی از فشار و کشش ایجاد شده پس از ضربه 8 ژول

بررسی کمی مساحت ناحیه‌ی آسیب نیز نشان داد که با افزایش انرژی ضربه، وسعت آسیب تورق در لایه‌های کامپوزیتی به طور قابل توجهی افزایش یافت. در ضربه‌ی 8 ژول، بیشترین مساحت آسیب تورق در دورترین لایه‌ی صفر درجه از محل برخورد برابر 1081 میلی‌متر مربع و در دورترین لایه‌ی 90 درجه برابر 1412 میلی‌متر مربع بود درحالی که در ضربه‌ی 18.5 ژول این مقادیر به ترتیب به 2476 و 2080 میلی‌متر مربع افزایش یافت. این افزایش

- [22] Wang, K., Taheri, F., "Comparison Of The Low-Velocity Impact Responses And Compressive Residual Strengths Of GLARE And A 3DFML," *Polymers*, Vol. 15, No. 7, pp. 1723, 2023.
- [23] Choo, J., Jung, Y., Jo, H., Lee, I., "Distribution Estimation Of Johnson-Cook Parameters Considering Correlation In Quasi-Static State," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 244, pp. 108086, 2023.
- [24] Sirigiri, V.K.R., Gudiga, V.Y., Gattu, U.S., Suneesh, G., Buddaraju, K.M., "A Review On Johnson Cook Material Model," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 62, pp. 3450–3456, 2022.
- [25] Schwer, L.E., Windsor, C.A., "Aluminum Plate Perforation: A Comparative Case Study Using Lagrange With Erosion, Multi-Material ALE, and Smooth Particle Hydrodynamics," 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria, 2009.
- [26] Kermanidis, T., Labeas, G., Tserpes, K.I., Pantelakis, S., "Finite Element Modeling Of Damage Accumulation In Bolted Composite Joints Under Incremental Tensile Loading," *Proceedings of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2000)*, Barcelona, Spain, 2000.
- [27] Zhang, Y., Van Paepegem, W., De Corte, W., "An Enhanced Progressive Damage Model For Laminated Fiber-Reinforced Composites Using The 3D Hashin Failure Criterion: A Multi-Level Analysis And Validation," *Materials*, Vol. 17, pp. 5176, 2024.
- [28] Li, Z., Wang, Y., Xiong, J., "Low-Velocity Impact Performance And Damage Mechanisms Of All-CFRP Honeycomb Sandwich Shell," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 199, pp. 105231, 2025.
- Velocity Impact," *Thin-Walled Structures*, Vol. 183, pp. 110355, 2023.
- [5] Beumler, T., "Fiber Metal Laminate Structures: From Laboratory To Application," Royal Aeronautical Society, Hamburg Branch, Hamburg, Germany, 2009.
- [6] Kakati, S., Chakraborty, D., "Low Velocity Impact On Fibre Metal Laminates: A Review," *Journal of Composite Materials*, Vol. 57, pp. 1–23, 2023.
- [7] Jakubczak, P., Bienias, J., "Non-Destructive Damage Detection In Fibre Metal Laminates," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 38, pp. 49, 2019.
- [8] Hamzat, A.K., Murad, M.S., Adediran, I.A., Asmatulu, E., Asmatulu, R., "Fiber-Reinforced Composites For Aerospace, Energy, And Marine Applications: An Insight Into Failure Mechanisms Under Chemical, Thermal, Oxidative, And Mechanical Load Conditions," *Advanced Composites and Hybrid Materials*, Vol. 8, pp. 152, 2025.
- [9] Smolnicki, M., Lesiuk, G., Duda, S., de Jesus, A.M.P., "A Review On Finite-Element Simulation Of Fibre Metal Laminates," *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 30, pp. 749–763, 2023.
- [10] Rathnasabapathy, M., Mouritz, A.P., Orifici, A.C., "Finite Element Modelling Of The Impact Response Of Fibre Metal Laminates Under Tension Preloading," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 157, pp. 106930, 2022.
- [11] Zarei, H., Shahnazar, P., Meskini, M., Sarkhosh, R., "Ballistic Performance Analysis Of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composite," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 356–365, 2022.
- [12] Seo, H., Hundley, J., Hahn, H.T., Yang, J.M., "Numerical Simulation Of Glass-Fiber-Reinforced Aluminum Laminates With Diverse Impact Damage," *AIAA Journal*, Vol. 48, No. 3, pp. 676–687, 2010.
- [13] Maio, L., Monaco, E., Ricci, F., Lecce, L., "Simulation Of Low Velocity Impact On Composite Laminates With Progressive Failure Analysis," *Composite Structures*, Vol. 103, pp. 75–85, 2013.
- [14] Jakubczak, P., Podolak, P., Biruk-Urban, K., Bienias, J., "Enhancement Of Numerical Model Of Low-Velocity Impact Response Of Fibre Metal Laminates By Adaptation Of Non-Homogeneous Cohesive Zone Model And Microstructural Anisotropy Of Metal Layers," *Composites Science and Technology*, Vol. 268, pp. 111212, 2025.
- [15] Azhdari, S., Fakhreddini-Najafabadi, S., Taheri-Behrooz, F., "An Experimental And Numerical Investigation On Low-Velocity Impact Response Of GLAREs," *Composite Structures*, Vol. 271, pp. 114123, 2021.
- [16] Soltani, M., Haji Aboutalebi, F., Heidari-Rarani, M., Sadeghi Nezhad, M.S., "Progressive Damage Analysis Of GLARE Laminates Under Low-Velocity Impact: Numerical Simulations And Experimental Validations," *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 95, No. 6, pp. 132, 2025.
- [17] Hosseini-Toudeshky, H., Navaei, A., Mostafavi, Z., "Structural Response And Progressive Damage Analyses Of GLARE Under Repeated Low-Velocity Impacts," *European Journal of Mechanics – A/Solids*, Vol. 116, pp. 105850, 2026.
- [18] Cetinkaya, B., Yilmaz, E., Özkol, İ., Şen, İ., Saracyakupoglu, T., "Development Of Structural Model Of Fiber Metal Laminate Subjected To Low-Velocity Impact And Validation By Tests," *Journal of Composites Science*, Vol. 9, No. 7, pp. 322, 2025.
- [19] Wang, K., Taheri, F., "Experimental And Numerical Analysis Of Low-Velocity Impact And Compression After Impact Responses Of Novel 3D Hybrid Composites," *Composite Structures*, Vol. 338, pp. 118133, 2024.
- [20] Liu, J., Li, Y., Huang, M., Zhang, Y., Lu, Y., Yue, Q., "Numerical Analysis Of Low-Velocity Impact Damage In Fiber Metal Laminate (FML) By Introducing Plasticity Of Fiber Composite Materials," *Composite Structures*, Vol. 357, pp. 118912, 2025.
- [21] Rasheeda, P., Sikarwar, R.S., "Modelling And Damage Evaluation Of Glass Fiber-Reinforced Aluminium Laminates Subjected To Quasi-Static Indentation," *International Journal of Mechanical Materials Design*, Vol. 21, pp. 823–847, 2025.