

تحلیل پاسخ ضربه چندلایه‌های الیاف-فلز کارال و گلار با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

مهناز ذاکری^۱، حسن منصوری^۲، مهناز صادقیان^۳

۱ دانشیار، آزمایشگاه سازه‌های پیشرفته، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، m.zakeri@kntu.ac.ir

۲ دانش آموزی، آزمایشگاه سازه‌های پیشرفته، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳ دانش آموزی، آزمایشگاه سازه‌های پیشرفته، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

پاسخ ضربه سرعت‌پایین دو نوع چندلایه الیاف-فلز (FML) حاوی دولایه آلومینیوم، یکی شامل هسته کامپوزیت الیاف کربن (نمونه کارال) و دیگری دارای هسته کامپوزیت الیاف شیشه (نمونه گلار) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. جهت تحلیل رفتار FML ها، از یک مدل سه‌بعدی اجزاء محدود در محیط نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. ابتدا اثر تغییر انرژی ضربه زننده بر پاسخ ضربه سرعت‌پایین بررسی شد. با افزایش انرژی اولیه ضربه زننده، بیشینه نیروی تماسی و میزان جابجایی چندلایه‌ها افزایش می‌یابد. میزان افزایش جابجایی و جذب انرژی در نمونه گلار بیش از کارال است. سپس به بررسی اثر جرم ضربه زننده و کسر حجمی فلز پرداخته شد. گرچه در برابر بار ضربه‌ای سرعت‌پایین، چندلایه الیاف-فلز کارال نسبت به گلار مقاوم‌تر است، اما تورق در کارال بیش از نمونه گلار است. حداکثر نیروی تماسی برای نمونه کارال تحت اثر ضربه زننده با جرم‌های مختلف نیز در مقایسه با نمونه گلار، به‌طور میانگین حدود ۱۰/۵ درصد بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: چندلایه‌های الیاف-فلز^۱ (FML)، کسر حجمی فلز^۲، معیار واماندگی، نیروی تماسی

۴۱

سال ۱۴ - شماره ۱
پیاوردتایستان ۱۴۰۴
نشریه علمی
دانش و فناوری هوافضا



Impact response analysis of CARALL and GLARE fiber-metal laminates using finite element modeling

Mahnaz Zakeri¹, Hassan Mansoori², Mehrnaz Sadeghian³

1- Associate Professor, Advanced Structures Research Lab., Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Tech., Iran.

2- PhD. Graduated Student, Advanced Structures Research Lab., Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Tech., Iran.

3- MSc. Graduated Student, Advanced Structures Research Lab., Faculty of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Tech., Iran.

Abstract

The low-velocity impact response of two types of fiber-metal laminates (FMLs) with two aluminum layers, one containing a composite core of carbon fibers (CARALL) and the other containing a composite core of glass fibers (GLARE) are investigated and compared. To analyze the behavior of the FMLs, a 3D finite element model in the Abaqus software environment is used. First, the effect of changing the impactor energy on the low-velocity impact response is discussed. With increasing the initial impactor energy, the maximum contact force increases as well as the displacement. The increase in displacement and energy absorption in the GLARE sample is more than that of CARALL. Next, the effect of impactor mass and metal volume fraction is investigated. Although the CARALL sample is more resistant to low-velocity impact, delamination in the CARALL is more than that in the GLARE sample. Also, the maximum contact force for the CARALL sample subjected to impactors with different masses was, on average, about 10.5% higher than the GLARE.

Keywords: fiber metal laminates (FMLs), metal volume fraction, failure criterion, contact force



۱- مقدمه

چندلایه‌های الیاف-فلز نوعی کامپوزیت هیبریدی هستند که از کنار هم قرار گرفتن لایه‌های نازک فلز و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف تشکیل شده‌اند. متداول‌ترین فلزات مورد استفاده در چندلایه‌های الیاف-فلز عبارتند از آلومینیوم، تیتانیوم، فولاد و منیزیم. توسعه خانواده چندلایه‌های الیاف-فلز به نام-های آرال^۳، کارال^۴، و گلار^۵ در دهه ۸۰ میلادی آغاز شد. در این مواد FML به ترتیب از مواد مرکب بر حاوی الیاف آرامید، کربن و شیشه در ترکیب با ورق-های نازک آلومینیوم استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر چندلایه‌های الیاف-فلز به دلیل سبک‌وزن بودن، مقاومت بالا در برابر ضربه و خوردگی و تحمل خستگی، در صنعت هوافضا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. بار ضربه‌ای در سازه‌های هوایی در اثر عوامل متعددی همچون زباله‌های موجود در باند فرودگاه، تگرگ، تعمیرات، برخورد بین هواپیما با محموله یا خودروهای خدماتی، سقوط ابزار، برخورد پرندگان و ... اتفاق می‌افتد. بسته به شدت ضربه، میزان خسارت در سازه از ایجاد ترک‌های جزئی تا وقوع شکست متفاوت است. طبق یک بررسی آماری، ۱۳ درصد از خسارت‌ها در ۷۱ فروند هواپیمای بوئینگ به دلیل برخورد اجسام خارجی بوده است [۱]. از این رو مطالعات متعددی بر روی رفتار ضربه‌ای مواد FML با ترکیبات گوناگون، به منظور دستیابی به نمونه‌ای با مقاومت بالاتر در برابر ضربه انجام شده است [۲].

توسکی و همکاران [۳] اثر تکرار ضربه سرعت‌پایین بر روی چندلایه‌های الیاف-فلز را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها چنین نتیجه‌گیری کردند که کاهش فاصله ضربه جدید از موقعیت ضربه قبلی، سفتی چندلایه را کاهش می‌دهد، اما اگر ترکی در چندلایه وجود نداشته باشد، عکس حالت فوق اتفاق می‌افتد. یو و همکاران [۴] رفتار FML حاوی الیاف کربن را در بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان می‌دهد با افزایش تنش تسلیم آلومینیوم می‌توان مقاومت در برابر ضربه چندلایه‌های الیاف-فلز را افزایش داد. قاسمی و همکاران [۵] رفتار دینامیکی

چندلایه الیاف-فلز مستطیلی شکل با تکیه‌گاه ساده تحت ضربه سرعت‌پایین را مطالعه نمودند. آن‌ها با تغییر دادن جرم و سرعت پرتابه در انرژی ورودی یکسان، به مطالعه تأثیر جرم و سرعت پرتابه پرداختند و دریافتند که افزایش سرعت پرتابه، افزایش نسبت خیز به ارتفاع چندلایه را به دنبال دارد.

کاپرینو و همکاران [۶] با اجرای آزمون‌های ضربه‌ای مختلف تأثیر پارامتر سرعت ضربه، جرم ضربه زننده و انرژی ضربه را بر روی پاسخ ورق چندلایه الیاف-فلز حاوی الیاف شیشه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند وابستگی رفتار ورق به انرژی ضربه نسبت به جرم و سرعت بیشتر است. سانگ و همکاران [۷] عملکرد چندلایه‌های الیاف-فلز با الیاف کربن را در برابر ضربه با انرژی‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد مطالعه قرار دادند. ایشان در بررسی خود از المان‌های توپر^۷ برای مدل‌سازی لایه‌های فلزی و المان‌های پوسته^۷ برای مدل‌سازی لایه‌های کامپوزیتی استفاده کردند. نتایج تغییرات نیرو تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داد، اما به علت عدم استفاده از معیار خرابی برای لایه‌های فلزی، در انرژی‌های بالاتر اختلاف بیشتری بین نتایج عددی و تجربی مشاهده شد.

صدیقی و همکاران [۸] اثر ضخامت فلز روی مقاومت ضربه چندلایه‌های الیاف-فلز را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش ضخامت آلومینیوم، عملکرد ضربه چندلایه‌ها بهبود می‌یابد اما سبب افزایش وزن می‌گردد. همچنین سید یعقوبی و همکاران [۹] اثر ضخامت روی چندلایه گلار را مورد ملاحظه قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که افزایش مقدار لایه‌های شیشه/اپوکسی در نمونه‌های گلار باعث افزایش مقاومت در برابر خرابی شده و افزایش در مینیمم انرژی شروع ترک را به دنبال خواهد داشت.

زارع زاده مهریزی و همکاران [۱۰] تأثیر وجود الاستومرها را روی FML های تحت بارهای ضربه سرعت پایین بررسی کردند. ایشان با افزودن یک لایه الاستومری روی سطح عقب کامپوزیت، چقرمگی سازه، ظرفیت تغییر شکل و جذب انرژی ویژه را بهبود دادند. سان و همکاران [۱۱] پاسخ ضربه سرعت پایین

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}_{pl}}{(\bar{\epsilon}_{pl})_f} \right) \quad (4)$$

که $\Delta \bar{\epsilon}_{pl}$ مقدار تغییرات پلاستیک معادل در طول فرآیند بارگذاری است. فلز مورد استفاده در این پژوهش، آلیاژ آلومینیوم T3-2024 است و تمام خواص و ثابت‌های ماده مورد نیاز در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- آسیب در لایه‌های الیاف کربن و شیشه
 لایه‌های کامپوزیت تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین ممکن است دچار آسیب درون‌لایه‌ای و بین‌لایه‌ای شوند که شامل پنج مود آسیب است. در این پژوهش برای تعریف نقطه شروع شکست از معیار واماندگی هشین^۹ [۱۵ و ۱۶] بر پایه کرنش‌های به‌دست‌آمده از المان‌ها در شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. طبق معیار هشین هرگاه مودهای تخریب به مقدار واحد برسند، شکست در ماده در حال آغاز است که روابط آن برای پنج مود آسیب مورد نظر به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

واماندگی کششی الیاف:

$$\sigma R_{ft}^2 = \left(\frac{\epsilon_{11}}{X_T^e} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{12}}{S_{12}^e} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon_{13}}{S_{13}^e} \right)^2 \epsilon_{11} \geq 0 \quad (5)$$

جدول ۱. خواص ماده آلومینیوم T3-2024 [۱۴]

مقدار مربوطه	پارامتر
۲/۷۷	چگالی (kg/m ³)
۷۲۴۰۰	مدول یانگ (MPa)
۰/۳۳	نسبت پواسون
۴۶۵	ثابت ماده جانسون-کوک A (MPa)
۶۰۷	ثابت ماده جانسون-کوک B (MPa)
۰/۰۰۸۳	ثابت ماده جانسون-کوک C
۰/۷۳	ثابت ماده جانسون-کوک n
۱/۷	ثابت ماده جانسون-کوک m
۷۷۵	دمای ذوب (K)
۱	نرخ کرنش موثر (s ⁻¹)
۸۷۵	گرمای ویژه (J/kg.K)
۰/۱۱۲	پارامتر D ₁
۰/۱۲۳	پارامتر D ₂
۱/۵	پارامتر D ₃
۰/۰۰۷	پارامتر D ₄
۰	پارامتر D ₅

چندلایه‌های الیاف کربن/اپوکسی در ترکیب با فلز تیتانیوم (Ti-FML) را بصورت تجربی بررسی کردند. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس و به کارگیری تکنیکها و معیارهای مناسب برای مدلسازی آسیب در مواد فلزی و کامپوزیتی، آزمون ضربه سرعت‌پایین ثقلی برای دو نمونه کارال و گلار مدل‌سازی شده است. برای تکمیل فرآیند مدلسازی از یک زیر برنامه VUMAT استفاده می‌شود تا مقاومت چندلایه‌های الیاف-فلز در برابر ضربه و همچنین تأثیر پارامترهای مختلف شامل مقدار انرژی ضربه، مقدار جرم ضربه زننده و ضخامت لایه فلزی مورد بررسی قرار گیرند.

۲- مدل‌سازی آسیب مواد

۲-۱- آسیب در لایه‌های فلز

برای مدل‌سازی آسیب در لایه‌های آلومینیوم در تحلیل و شبیه‌سازی فرآیند ضربه، مدل جانسون-کوک^۸ [۱۲] استفاده شده است. مدل‌سازی جانسون-کوک بر پایه روابط ضرایب ماده A, B, C, m و n استوار است [۱۳]:

$$\sigma = [A + B(\bar{\epsilon}_{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] [1 - T^{*m}] \quad (1)$$

که $\bar{\epsilon}_{pl}$ کرنش پلاستیک معادل، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع و $\dot{\epsilon}_{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. پارامتر T^* به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

T دمای ماده، T_r دمای اتاق (مرجع) و T_m دمای ذوب ماده است. همچنین میزان کرنش پلاستیک (کرنش شروع شکست) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\sigma(\bar{\epsilon}_{pl})_f = [D_1 + D_2 e^{(D_3 \sigma^*)}] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + D_5 T^*) \quad (3)$$

σ^* تنش نرمال شده توسط تنش معادل، D₁, D₂, D₃, D₄ و D₅ ثابت‌های ماده به‌دست‌آمده از آزمون‌های تجربی هستند. پارامتر D با فرض بر اینکه شکست زمانی رخ می‌دهد که D به مقدار واحد برسد، به‌صورت زیر تعیین می‌شود:



$$\begin{aligned}
 X_T^\varepsilon &= \frac{X_T}{E_{11}}, & X_C^\varepsilon &= \frac{X_C}{E_{11}} \\
 Y_T^\varepsilon &= \frac{Y_T}{E_{22}}, & Y_C^\varepsilon &= \frac{Y_C}{E_{22}} \\
 S_{12}^\varepsilon &= \frac{S_{12}}{G_{12}}, & S_{13}^\varepsilon &= \frac{S_{13}}{G_{13}} \\
 Z_T^\varepsilon &= \frac{Z_T}{E_{33}}, & S_{23}^\varepsilon &= \frac{S_{23}}{G_{23}}
 \end{aligned}
 \quad (10)$$

خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیت T700/3234 حاوی الیاف کربن و S2/FM94 حاوی الیاف شیشه، و همچنین ثوابت مربوط به معیار هشین در جدول ۲ ارائه شده است. برای تعیین و نمایش نقطه آغازین واماندگی و شکست در داخل و بین لایه‌های کامپوزیتی، از یک زیر برنامه VUMAT در آباکوس استفاده می‌شود [۱۸].

۲-۳- آسیب در ناحیه چسب

تورق یکی از مهم‌ترین موده‌های آسیب در بین لایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه‌ای است. تئوری ناحیه چسبیده^۱ یکی از روش‌های پرکاربرد در شبیه‌سازی لایه چسب بوده و نرم افزار آباکوس از قانون کشش-جدایش در این روش استفاده می‌نماید. دو معیار واماندگی برای مدل‌سازی آسیب آغازین و شکست نهایی در سطح چسبیده موردنیاز است که برای تعیین مود آسیب آغازین می‌توان از معیار تنش اسمی درجه دوم به شرح زیر استفاده کرد [۱۹]:

$$\left(\frac{\sigma_n}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{T}\right)^2 = 1 \quad (11)$$

σ_n تنش اسمی در حالت نرمال و σ_s و σ_t تنش اسمی برشی در محورهای اول و دوم هستند. N مقاومت کششی مود اول (مود I) و S و T مقاومت‌های برشی مود II و III سطح چسبیده هستند.

واماندگی فشاری الیاف:

$$R_{fc}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{11}}{X_C^\varepsilon}\right)^2 \varepsilon_{11} \leq 0 \quad (6)$$

واماندگی کششی ماتریس:

$$R_{mt}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{Y_T^\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_{23}^\varepsilon}\right)^2 \left(\varepsilon_{23}^2 - \frac{E_{22}E_{33}}{G_{23}^2} \varepsilon_{22}\varepsilon_{33}\right) + \left(\frac{\varepsilon_{12}}{S_{12}^\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{13}}{S_{13}^\varepsilon}\right)^2 (\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \geq 0 \quad (7)$$

واماندگی فشاری ماتریس:

$$\begin{aligned}
 R_{mc}^2 &= \left(\frac{E_{22}\varepsilon_{22} + E_{33}\varepsilon_{33}}{2G_{12}S_{12}^\varepsilon}\right)^2 + \\
 &\left(\frac{\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{Y_C^\varepsilon}\right) \left[\left(\frac{E_{22}Y_C^\varepsilon}{2G_{12}S_{12}^\varepsilon}\right)^2 - 1\right] + \\
 &\left(\frac{1}{S_{23}^\varepsilon}\right)^2 \left(\varepsilon_{23}^2 - \frac{E_{22}E_{33}}{G_{23}^2} \varepsilon_{22}\varepsilon_{33}\right) + \\
 &\left(\frac{\varepsilon_{12}}{S_{12}^\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{13}}{S_{13}^\varepsilon}\right)^2 (\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \leq 0 \quad (8)
 \end{aligned}$$

واماندگی تورق (لایه‌لایه شدن):

$$R_{ld}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{33}}{Z_T^\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{13}}{S_{13}^\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{23}}{S_{23}^\varepsilon}\right)^2 \varepsilon_{33} \geq 0 \quad (9)$$

که در آن ε_{ij} مؤلفه‌های تانسور کرنش، X_C^ε و X_T^ε استحکام کرنشی کششی و فشاری طولی، Y_C^ε و Y_T^ε استحکام کرنشی کششی و فشاری عرضی، S_{12}^ε ، S_{13}^ε و S_{23}^ε مقاومت‌های کرنشی برشی داخل و خارج از صفحه الیاف و ماتریس بوده و Z_T^ε استحکام کرنشی کششی در جهت ضخامت چندلایه است. همچنین R_i ($i=ft, fc, mt, mc, ld$) ضریب شکست برای تعیین میزان آسیب در هر نقطه از ماده است. ضریب شکست R_i کوچک‌تر از یک نشان‌دهنده آن است که در ماده هنوز آسیب رخ نداده و برای مقادیر بیشتر از یک در ماده شکست صورت گرفته است.

تمامی روابط استحکام کرنشی ذکرشده در بالا را می‌توان از طریق ثابت‌های مقاومت تنشی به صورت زیر به دست آورد:

جدول ۲. خواص مکانیکی مواد مرکب T700/3234 و

[E] S2/FM94

پارامتر	T700/3234	S2/FM94
چگالی (kg/m^3)	۱۵۶۰	۲۰۰۰
مدول یانگ در راستای محور ۱ (GPa)	۱۲۳	۴۸/۶
مدول یانگ در راستای محور ۲ و ۳ (GPa)	۸/۷	۸/۵
نسبت پواسون ۱۲ و ۱۳	۰/۳۲	۰/۳۳
نسبت پواسون ۲۳	۰/۳۸	۰/۳۸
مدول برشی ۱۲ و ۱۳ (GPa)	۴	۳/۵
مدول برشی ۲۳ (GPa)	۳	۳
مقاومت کششی طولی (MPa)	۲۱۰۰	۱۹۰۰
مقاومت فشاری طولی (MPa)	۸۷۰	۵۵۰
مقاومت کششی عرضی (MPa)	۳۵	۴۳
مقاومت فشاری عرضی (MPa)	۱۲۰	۹۰

جدول ۳. خواص المان‌های ناحیه چسبیده [۲۰]

پارامتر	مقدار مربوطه
مقاومت کششی N (MPa)	۲۰
مقاومت برشی S (MPa)	۶۰
مقاومت برشی T (MPa)	۶۰
نرخ انرژی شکست G_I (N/mm)	۰/۲۴
نرخ انرژی شکست G_{II} (N/mm)	۲/۵۹
نرخ انرژی شکست G_{III} (N/mm)	۲/۵۹

نمونه‌های الیاف-فلز 110×110 میلی‌متر بوده و ضخامت هر یک از لایه‌های کامپوزیتی شیشه و کربن 0.2 میلی‌متر و لایه‌های آلومینیومی 0.3 میلی‌متر می‌باشد.

برای تعریف تماس بین تمامی لایه‌ها از تماس معمولی^{۱۳} و روش پنالتی^{۱۴} با ضریب اصطکاک 0.7 و تماس سخت^{۱۵} در امتداد محورهای نرمال و تماسی استفاده شده است. مش‌بندی لایه‌های آلومینیوم و کامپوزیت با استفاده از المان کاهش‌یافته سه‌بعدی با هشت گره (C3D8R) انجام شده است. با مطالعه و بررسی همگرایی مش با تعداد المان‌های مختلف در سراسر لبه، مناسب‌ترین مش بندی در تعداد 50 المان با نسبت ابعاد 5 برای هر لایه مشاهده شد (شکل ۱).

دو گیره نگه‌دارنده و ضربه زننده به‌صورت مدل جسم صلب از نوع ناپیوسته^{۱۶} با مش‌بندی المان چهارضلعی سه‌بعدی با چهار گره (R3D4) در نظر گرفته شده‌اند. دو گیره نگه‌دارنده دارای سوراخی در مرکز به قطر 75 میلی‌متر می‌باشند. چندلایه‌های الیاف-فلز که توسط گیره‌ها مقید می‌شوند در تمامی راستاها شرایط مرزی گیردار داشته و ضربه‌زننده نیز فقط در راستای Z دارای آزادی جابجایی است.

۳-۱- صحنه‌گذاری

جهت حصول اطمینان از قابلیت کد سابروتین، یکی از نمونه‌های پژوهش یائو و همکاران [۱۷] مدل‌سازی و با استفاده از کد حاضر تحلیل شد. سپس نتایج تحلیل عددی با نتایج موجود در مقاله مرجع مقایسه و اعتبارسنجی شدند. چندلایه الیاف-فلز مورد نظر

شکست نهایی طبق معیار توزیع توانی از طریق رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right) + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right) + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right) = 1 \quad (12)$$

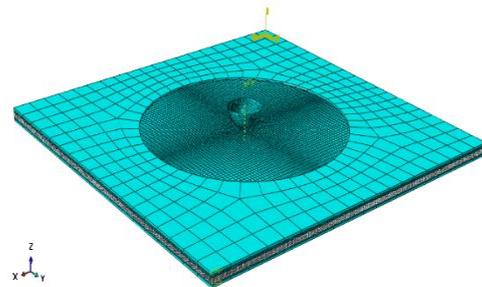
که G_I ، G_{II} و G_{III} نرخ انرژی آزادشده موده‌های شکست I، II و III بوده و G_{IC} ، G_{IIC} و G_{IIIC} انرژی‌های شکست بحرانی در موده‌های شکست مذکور هستند. در جدول ۳ پارامترهای مورد استفاده برای المان‌های ناحیه چسبیده سطح مشترک آورده شده است.

۳- شبیه‌سازی چندلایه‌های الیاف-فلز

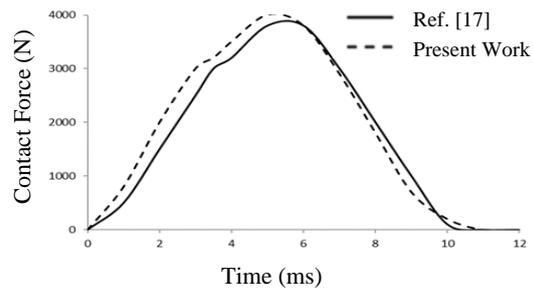
به‌منظور تحلیل رفتار نمونه‌های کارال و گلار تحت بارگذاری ضربه سرعت‌پایین، مدل‌سازی عددی بر پایه روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس توسط حل دینامیکی^{۱۱} ایجادشده و از زیر برنامه VUMAT به زبان برنامه‌نویسی فرترن^{۱۲} [۲۱] استفاده شده است. ضربه زننده، پرتابه‌ای با شکل هندسی دماغه کروی به قطر 25mm و جرم 10 کیلوگرم می‌باشد. نحوه لایه-چینی چندلایه‌های الیاف-فلز کارال و گلار به صورت $[AL/(\circ/90)_4/AL]$ در نظر گرفته شده است. ابعاد



حاوی لایه‌های فلزی آلومینیوم T۳-۲۰۲۴ و هسته چندلایه کامپوزیتی کربن/اپوکسی ۳۲۳۴/۰۰ TV بوده و در معرض ضربه زنده با دماغه کروی شکل به قطر ۱۲ میلی‌متر قرار گرفته است. نحوه آرایش لایه‌های نمونه به صورت $[AL/(0/90)_3/AL]$ بوده و ضخامت لایه‌ها و خواص مواد مطابق با مرجع [۱۷] انتخاب شده است.



شکل ۱. مش بندی چندلایه الیاف-فلز و ضربه زنده



شکل ۲. مقایسه نیروی تماسی بین نتایج شبیه‌سازی

حاضر و مرجع [۱۷]

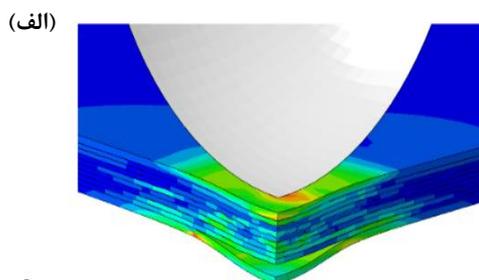
شکل ۲ نتایج تحلیل را برای نیروی تماسی تحت ضربه سرعت پایین با انرژی ۱۰ ژول نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارها می‌توان دریافت که مدلسازی حاضر از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۴- نتایج و بحث

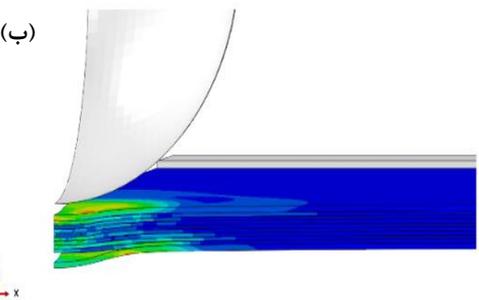
ابتدا چندلایه‌های الیاف-فلز کارال و گلار تحت ضربه سرعت پایین توسط ضربه زنده با دماغه کروی شکل به قطر ۲۵ mm با جرم ۱۰ کیلوگرم و انرژی ضربه اولیه ۱/۵ ژول قرار گرفتند. نحوه آسیب در بین لایه‌های نمونه کارال و گلار در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. در این شکل، ناحیه تورق

برای دولایه آلومینیوم و جدایش بین لایه‌های هسته کامپوزیتی قابل مشاهده است.

سطح ناحیه آسیب دیده در بین لایه‌های هسته کامپوزیتی برای نمونه‌های کارال و گلار به ترتیب برابر ۶۶/۰۹ و ۳۱/۱۳ میلی مترمربع است. ملاحظه می‌شود که سطح تورق در کارال نسبت به نمونه گلار بیشتر است (شکل ۵). این امر به دلیل سفتی بالاتر و انعطاف پذیری کم‌تر الیاف کربن می‌باشد. جذب انرژی پایین‌تر و تغییر شکل کمتر در لایه‌های الیاف کربن تحت ضربه سرعت پایین، موجب جدایش وسیع‌تر بین لایه کامپوزیت و لایه فلزی آلومینیوم شده است. انرژی جذب شده در چندلایه‌های الیاف-فلز برابر با انرژی صرف شده برای ایجاد آسیب و جدایش لایه‌ها بوده که برابر با ناحیه زیر نمودار جابه‌جایی-نیروی تماسی است. هراندازه که چندلایه الیاف-فلز از سفتی بیشتری برخوردار باشد، مقدار انرژی کمتری نیز جذب می‌نماید.



(الف)



(ب)

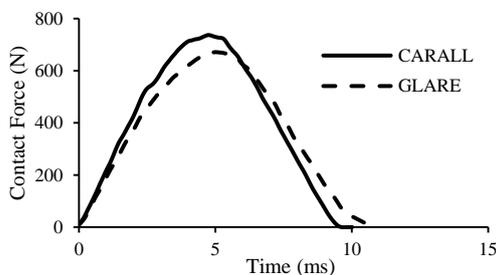
شکل ۳. نمایش سه‌بعدی آسیب در بین لایه‌های چندلایه

الیاف-فلز کارال

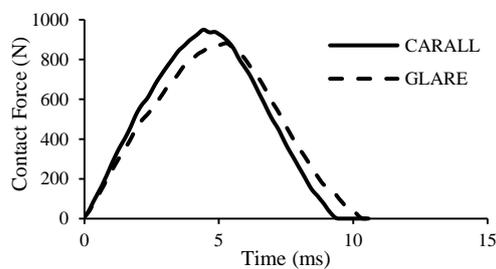
(الف) نمای روبرو، (ب) نمای جانبی نمونه.

۴-۱- بررسی اثر انرژی ضربه زننده

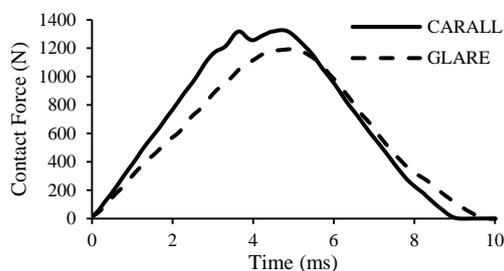
برای مطالعه اثر انرژی ضربه زننده، چندلایه‌های FML تحت سه انرژی ضربه اولیه ۱، ۱/۵ و ۲/۵ ژول قرار گرفته‌اند و تاریخچه‌های نیروی تماسی-زمان هر یک در شکل ۶ نشان داده شده است. برای سه انرژی ضربه مختلف مورد بررسی، بیشینه نیروی تماسی چندلایه کارال به‌طور میانگین در حدود ۱۱/۷ درصد بیش از نمونه گلار بوده که نشان‌دهنده مقاومت بالای نمونه کارال در برابر ضربه نسبت به گلار است. همچنین در تمامی حالت‌ها، کارال در مقایسه با گلار دارای مدت‌زمان تماس کمتری بوده و با افزایش انرژی ضربه، مدت‌زمان تماس کاهش می‌یابد.



شکل ۶. الف) انرژی ضربه ۱ ژول

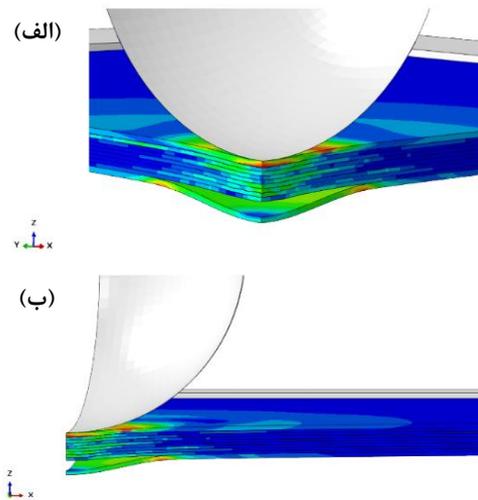


شکل ۶. ب) انرژی ضربه ۱/۵ ژول



شکل ۶. ج) انرژی ضربه ۲/۵ ژول

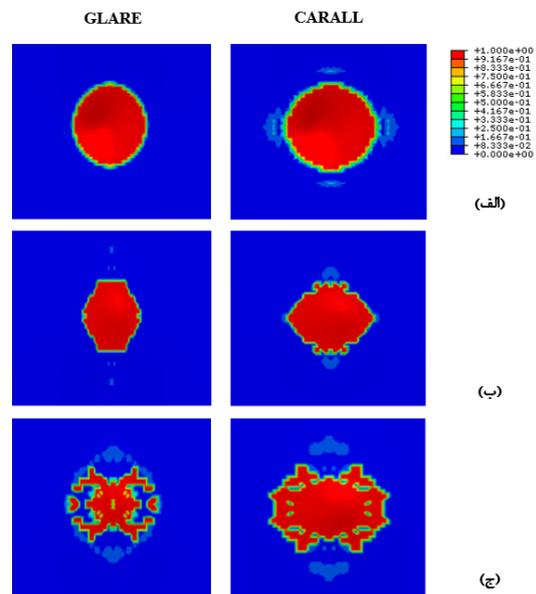
شکل ۶. تاریخچه‌های نیروی تماسی-زمان نمونه‌های کارال و گلار تحت انرژی ضربه‌های مختلف



شکل ۵. نمایش سه‌بعدی آسیب در بین لایه‌های چندلایه الیاف-فلز گلار

الف) نمای روبرو، ب) نمای جانبی نمونه.

در ادامه اثر پارامترهای مختلف شامل انرژی ضربه زننده، جرم ضربه زننده و کسر حجمی فلز (MVF) بر پاسخ ضربه سرعت‌پایین چندلایه‌های کارال و گلار بررسی می‌شود.



شکل ۵. ناحیه تورق چندلایه‌های الیاف-فلز گلار و کارال.

الف) لایه پایینی آلومینیوم.

ب) لایه رویی آلومینیوم.

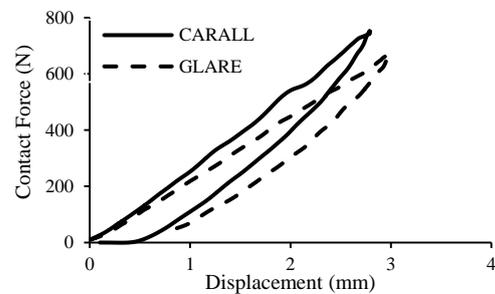
ج) هسته کامپوزیتی.

جدول ۴. حداکثر مقدار نیروی تماسی نمونه‌های کارال و

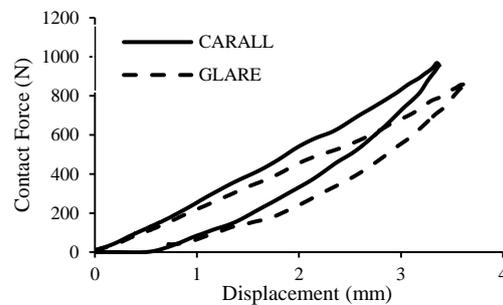
گلار (بر حسب نیوتن) با تغییر انرژی ضربه

نمونه	انرژی ضربه		
	۱ ژول	۱/۵ ژول	۲/۵ ژول
کارال	۷۵۱/۸	۹۶۸/۷۵	۱۳۵۲/۱۳
گلار	۶۷۱/۴۴	۸۸۲/۲۲	۱۱۹۳/۷۳
اختلاف (%)	۱۱/۹۶	۹/۸۱	۱۳/۲۷

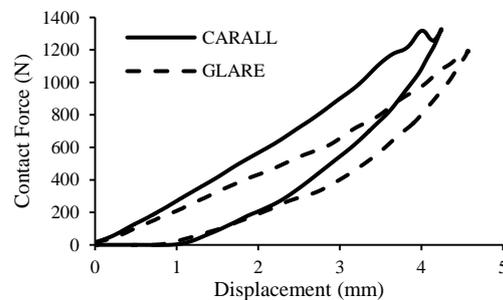
طبق نتایج ارائه شده در جدول ۴، با افزایش انرژی ضربه از ۱ ژول به ۱/۵ ژول (۵۰٪ افزایش)، بیشینه نیروی تماسی در نمونه کارال ۲۵/۲۵ درصد و در نمونه گلار ۲۷/۱۷ درصد افزایش یافته است. حال



(الف) انرژی ضربه ۱ ژول



(ب) انرژی ضربه ۱/۵ ژول



(ج) انرژی ضربه ۲/۵ ژول

شکل ۷. نمودارهای جابه‌جایی-نیروی تماسی نمونه‌های کارال و گلار تحت انرژی ضربه‌های مختلف

آن که با افزایش انرژی ضربه از ۱/۵ ژول به ۲/۵ ژول (۶۷٪ افزایش)، افزایش بیشینه نیروی تماسی در نمونه کارال ۳۳/۱۰ درصد و در نمونه گلار ۲۹/۹۸ درصد بوده است.

از سوی دیگر افزایش انرژی ضربه موجب افزایش جابه‌جایی در چندلایه‌های FML می‌شود. در شکل ۷ منحنی‌های جابه‌جایی-نیروی تماسی چندلایه‌های مورد مطالعه تحت انرژی ضربه‌های مختلف ارائه شده است. مقدار بیشینه جابه‌جایی با زیاد شدن مقدار انرژی ضربه از ۱ ژول به ۱/۵ ژول در نمونه‌های کارال و گلار به ترتیب ۱۸/۹۰ و ۲۲/۹۵ درصد و با تغییر انرژی ضربه و رسیدن به مقدار ۲/۵ ژول به ترتیب ۱۹/۳۰ و ۲۲/۷۸ درصد افزایش یافته‌اند. طبق نتایج موجود در جدول ۵، بیشینه جابه‌جایی در نمونه گلار به‌طور میانگین ۷/۶٪ بیشتر از کارال است. با بررسی ناحیه زیر منحنی جابه‌جایی-نیروی تماسی ملاحظه می‌شود که نمونه گلار قابلیت جذب انرژی بالاتری دارد. همچنین با افزایش انرژی ضربه، انرژی جذب‌شده در چندلایه‌های الیاف-فلز کاهش می‌یابد.

جدول ۵. حداکثر مقدار جابه‌جایی کارال و گلار (بر حسب

میلی‌متر) با تغییر انرژی ضربه

نمونه	انرژی ضربه		
	۱ ژول	۱/۵ ژول	۲/۵ ژول
کارال	۲/۷۹	۳/۳۷	۴/۲۵
گلار	۲/۹۹	۳/۶۴	۴/۵۷
اختلاف (%)	۷/۱۷	۸/۰۱	۷/۵۳

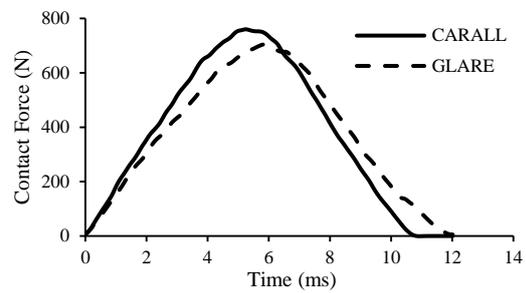
۴-۲- بررسی اثر جرم ضربه زننده

به‌منظور بررسی اثر جرم ضربه زننده بر روی پاسخ ضربه چندلایه‌های الیاف-فلز کارال و گلار، مدل‌سازی آزمون ضربه با انرژی ضربه ۱/۲۵ ژول و جرم‌های مختلف ۸، ۱۰ و ۱۴ کیلوگرم انجام شد. تاریخچه‌های نیروی تماسی-زمان برای نمونه‌ها در شکل ۸ ارائه شده است. با توجه به نتایج، با زیاد شدن جرم ضربه زننده، نیروی تماسی چندلایه‌های FML افزایش و مدت‌زمان تماس کاهش یافته است.

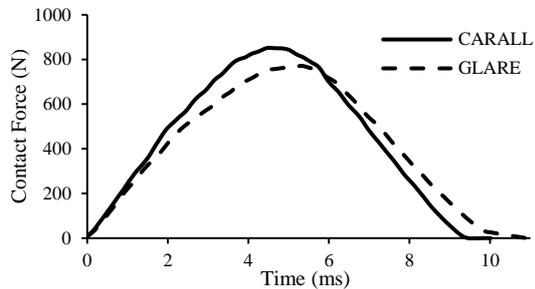
طبق جدول ۶ با ۲۵٪ افزایش در جرم ضربه زننده (تغییر از ۸ کیلوگرم به ۱۰ کیلوگرم)، بیشینه نیروی

جدول ۶. حداکثر مقدار نیروی تماسی کارال و گلار (برحسب نیوتن) با تغییر جرم ضربه زننده

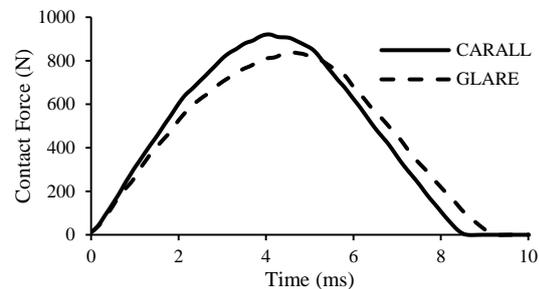
نمونه	جرم ضربه زننده		
	۸ کیلوگرم	۱۰ کیلوگرم	۱۴ کیلوگرم
کارال	۷۶۲/۴۲	۸۵۱/۹۵	۹۲۱/۱۸
گلار	۶۹۷/۱۶	۷۵۲/۳۴	۸۳۸/۷۴
اختلاف (%)	۸/۵۶	۱۳/۲۴	۹/۸۳



(الف) ضربه زننده با جرم ۸ کیلوگرم



(ب) ضربه زننده با جرم ۱۰ کیلوگرم



(ج) ضربه زننده با جرم ۱۴ کیلوگرم

شکل ۸. تاریخچه نیروی تماسی-زمان نمونه های کارال و گلار تحت اثر ضربه زننده با جرم های مختلف

تماسی نمونه کارال ۱۱/۷۴ درصد و برای نمونه گلار ۷/۹۱ درصد افزایش یافته است. حال آنکه با ۷۵٪ افزایش در جرم ضربه زننده (از ۸ کیلوگرم به ۱۴ کیلوگرم)، بیشینه نیروی تماسی در نمونه های کارال و گلار به ترتیب ۲۰/۸۸ و ۲۰/۳۱ درصد افزایش یافته است. نمونه کارال دارای مدت زمان تماس کمتری بوده و حداکثر مقدار نیروی تماسی برای این نمونه تحت اثر ضربه زننده با جرم های مختلف در مقایسه با نمونه گلار، به طور میانگین حدود ۱۰/۵ درصد بیشتر بوده است.

شکل ۹ نمودارهای جابه جایی-نیروی تماسی نمونه های کارال و گلار تحت اثر ضربه زننده با جرم های مختلف و انرژی ضربه ۱/۲۵ ژول را نشان می دهد. با بررسی این نمودارها می توان دریافت که نمونه گلار جذب انرژی بیشتری داشته است. همچنین افزایش جرم پرتابه، موجب کاهش مقدار انرژی جذب شده در چندلایه های الیاف-فلز شده است. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۷، میانگین بیشینه جابه جایی نمونه گلار در مرکز ورق ۷/۶٪ بیشتر از کارال است. با افزایش جرم ضربه زننده مقدار جابه جایی کاهش می یابد. طوری که با ۲۵٪ افزایش جرم ضربه زننده (از ۸ کیلوگرم به ۱۰ کیلوگرم)، حداکثر جابه جایی در نمونه های کارال و گلار به ترتیب ۱۴/۱۲ و ۱۵/۰۹ درصد و با ۷۵٪ افزایش در جرم ضربه زننده (از ۸ کیلوگرم به ۱۴ کیلوگرم)، به ترتیب ۲۲/۷۱ و ۲۳/۲۷ درصد کاهش یافته است.

جدول ۷. حداکثر مقدار جابه جایی کارال و گلار (برحسب میلی متر) با تغییر جرم ضربه زننده

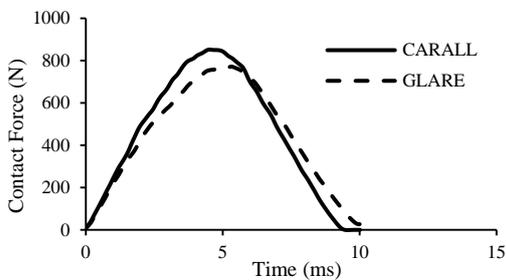
نمونه	جرم ضربه زننده		
	۸ کیلوگرم	۱۰ کیلوگرم	۱۴ کیلوگرم
کارال	۳/۶۱	۳/۱۰	۲/۷۹
گلار	۳/۹۱	۳/۳۲	۳/۰۰
اختلاف (%)	۸/۳۱	۷/۱۰	۷/۵۳

میانگین اختلاف بیشینه نیروی تماسی کارال با گلار در سه ضخامت لایه آلومینیوم، ۹/۲۴ درصد است. در شکل ۱۰ تاریخچه‌های نیروی تماسی-زمان نمونه‌های کارال و گلار نمایش داده شده است.

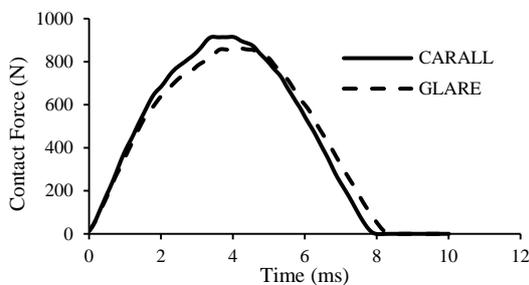
جدول ۸. حداکثر مقدار نیروی تماسی نمونه‌های کارال و

گلار (نیوتن) با تغییر کسر حجمی فلز

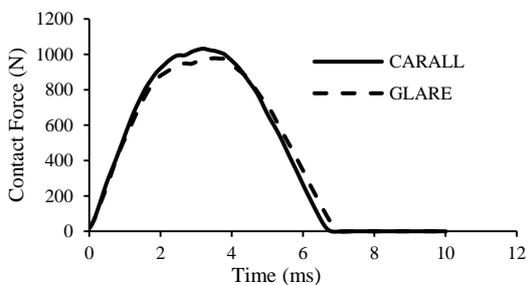
کسر حجمی فلز			نمونه
۴۷٪	۳۸٪	۲۷٪	
۱۰۳۷/۱۵	۹۵۱/۶۳	۸۵۱/۹۵	کارال
۹۷۸/۲۶	۸۶۵/۵۲	۷۶۲/۳۴	گلار
۶/۰۲	۹/۹۵	۱۱/۷۵	اختلاف (%)



(الف) کسر حجمی فلز ۲۷٪



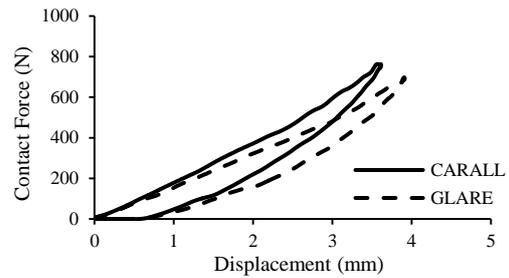
(ب) کسر حجمی فلز ۳۸٪



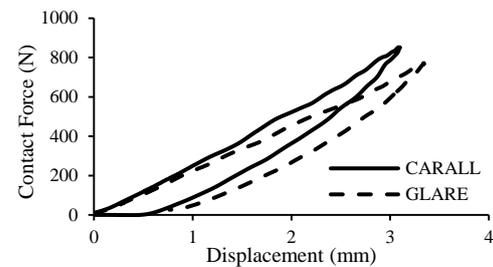
(ج) کسر حجمی فلز ۴۷٪

شکل ۱۰. تاریخچه‌های نیروی تماسی-زمان نمونه‌های

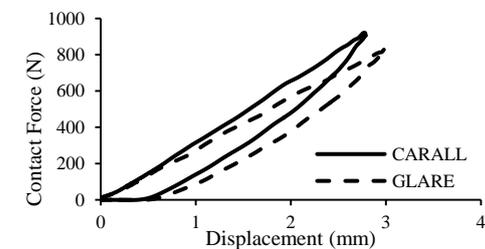
کارال و گلار برای مقادیر مختلف کسر حجمی فلز



(الف) ضربه زننده با جرم ۸ کیلوگرم



(ب) ضربه زننده با جرم ۱۰ کیلوگرم



(ج) ضربه زننده با جرم ۱۴ کیلوگرم

شکل ۹. نمودارهای جابه‌جایی-نیروی تماسی نمونه‌های کارال و گلار تحت ضربه زننده با جرم‌های مختلف

۴-۳- بررسی اثر کسر حجمی فلز

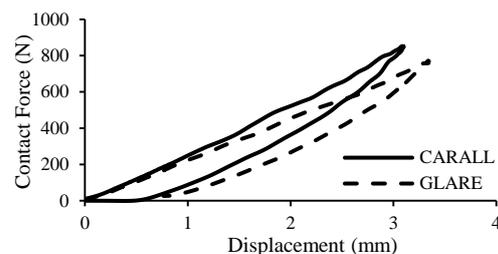
در این قسمت برای تعیین اثر MVF، چندلایه‌های الیاف-فلز حاوی لایه‌های آلومینیوم با ضخامت ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ و کسر حجمی فلز به ترتیب ۲۷٪، ۳۸٪ و ۴۷٪ تحت اثر ضربه زننده به جرم ۱۰ کیلوگرم و انرژی ضربه ۱/۲۵ ژول قرار گرفتند.

جدول ۸ نشان می‌دهد بیشینه نیروی تماسی برای چندلایه‌های الیاف-فلز کارال و گلار با افزایش MVF از ۲۷ درصد به ۳۸ درصد، به ترتیب ۱۱/۷۰ و ۱۳/۵۳ درصد بیشتر شده است. همچنین در مرحله دوم با جایگزینی لایه آلومینیوم با ضخامت ۰/۷ میلی‌متر و کسر حجمی فلز ۴۷ درصد به ترتیب ۸/۹۹ و ۱۳/۰۲ درصد افزایش داشته است. بیشترین نیروی تماسی در نمونه کارال بوده حال آنکه چندلایه گلار دارای مدت زمان تماس بیشتری می‌باشد. در مجموع نمونه کارال عملکرد بهتری در برابر ضربه داشته و

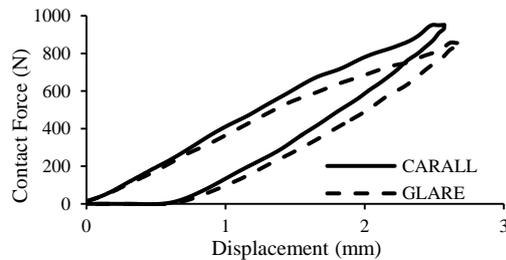
با توجه به این نتایج می‌توان دریافت که بطور کلی با افزایش درصد حجمی فلز، حداکثر مقدار نیروی تماسی افزایش و مدت زمان تماس کاهش می‌یابد. در شکل ۱۱ نمودارهای جابه‌جایی-نیروی تماسی برای چندلایه‌های FML ارائه شده است. با افزایش کسر حجمی فلز، مقدار جابه‌جایی و انرژی

جدول ۹. حداکثر مقدار جابه‌جایی کارال و گلار (بر حسب میلی‌متر) با تغییر کسر حجمی فلز

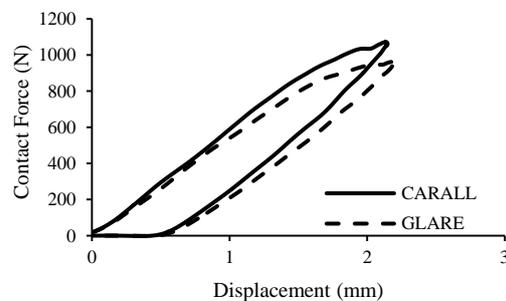
کسر حجمی فلز			
نمونه	۲۷٪	۳۸٪	۴۷٪
کارال	۳/۱۰	۲/۵۷	۲/۱۵
گلار	۳/۳۴	۲/۶۹	۲/۲۲
اختلاف (%)	۷/۷۴	۴/۶۷	۳/۲۶



(الف) کسر حجمی فلز ۲۷٪



(ب) کسر حجمی فلز ۳۸٪



(ج) کسر حجمی فلز ۴۷٪

شکل ۱۱. نمودارهای جابه‌جایی-نیروی تماسی نمونه های کارال و گلار برای مقادیر مختلف کسر حجمی فلز

جذب شده کاهش می‌یابند. نتایج موجود در جدول ۹ نیز نشان می‌دهند که با افزایش درصد حجمی فلز، حداکثر مقدار جابه‌جایی چندلایه‌های الیاف-فلز تحت ضربه سرعت پایین کاهش یافته است.

با تغییر کسر حجمی فلز از ۲۷٪ به ۳۸٪، مقدار بیشینه جابه‌جایی نمونه‌های کارال و گلار به ترتیب ۱۷/۱۰ و ۱۹/۴۶ درصد کاهش داشته است. سپس با افزایش MVF به ۴۷٪، مقدار بیشینه جابه‌جایی در نمونه‌ها به ترتیب ۱۹/۵۳ و ۱۷/۴۷ درصد کمتر شده است. مقدار جابه‌جایی در مرکز ورق در نمونه‌های گلار، بطور میانگین ۵/۲ درصد بیش از کارال می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار چندلایه‌های الیاف-فلز کارال و گلار در برابر ضربه سرعت پایین بررسی و مقایسه شد. نتایج را می‌توان به شرح زیر جمع بندی نمود:

- بهترین خواص ضربه در بین دو FML مورد بررسی، متعلق به نمونه کارال می‌باشد. این برتری به علت استحکام و مدول الاستیسته بالای الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه است. با این حال، مساحت ناحیه تورق در بین لایه‌های هسته کامپوزیتی نمونه کارال، بیش از ۲ برابر بزرگتر از نمونه گلار است.

- به دلیل انعطاف پذیری کمتر در کامپوزیت الیاف کربن، چندلایه الیاف-فلز کارال در مقایسه با گلار دارای بیشینه جابه‌جایی کمتری در مرکز ورق بوده است.

- بیشینه نیروی تماسی در چندلایه کارال بیش از گلار می‌باشد. با افزایش انرژی ضربه، بیشینه نیروی تماسی افزایش و مدت زمان تماس کاهش می‌یابد. همچنین انرژی جذب شده کاهش یافته و حداکثر مقدار جابه‌جایی در مرکز ورق بیشتر می‌شود. بیشینه جابه‌جایی در نمونه‌های گلار به طور متوسط ۷/۶٪ بیش از کارال است.

- با زیاد شدن مقدار جرم پرتابه در انرژی ضربه ثابت، مقدار نیروی تماسی چندلایه‌های FML افزایش می‌یابد. اما مدت زمان تماس، بیشینه جابه‌جایی و انرژی جذب شده کاهش می‌یابند.

[9] A. Seyed Yaghoobi, and B. Liaw, "Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: Experimental and numerical studies", *Composite Structures*, vol. 94, no. 8, pp. 2585-2598, July 2012.

[10] M. A. Zarezadeh-mehrizi, Gh. Liaghat, H. Ahmadi, A. Taherzadeh-Fard, and A. Khodadadi, "Numerical and experimental investigation of fiber metal laminates with elastomeric layers under low-velocity impact", *Polymer Composites*, Volume43, Issue4, 2022, pp. 1936-1947.

[11] J. Sun, W. Chen, H. Luo, X. Xie, J. Zhang, and C. Ding, "Low-Velocity Impact Behaviour of Titanium-Based Carbon-Fibre/Epoxy Laminate", *Materials*, vol. 17, no. 21, p. 5380, 2024.

[12] G. R. Johnson, "A constitutive model and data for materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures", in *Proc. 7th Inf. Sympo. Ballistics*, pp. 541-547, 1983.

[13] H. Mansoori, and H. Zarei, "FSI simulation of hydrodynamic ram event using LS-Dyna software", *Thin-Walled Structures*, vol. 134, pp. 310-318, January 2019.

[14] G. B. Chai, and P. Manikandan, "Low velocity impact response of fibre-metal laminates—A review", *Composite Structures*, vol. 107, pp. 363-381, January 2014.

[15] Z. Hashin, and A. Rotem, "A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials", *Journal of composite materials*, vol. 7, no. 4, pp. 448-464, October 1973.

[16] Z. Hashin, "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 47, no. 2, pp. 329-334, 1980.

[17] L. Yao, C. Wang, W. He, S. Lu, and De Xie, "Influence of impactor shape on low-velocity impact behavior of fiber metal laminates combined numerical and experimental approaches", *Thin-Walled Structures*, vol. 145, 106399, December 2019.

[18] H. Mansoori, and M. Zakeri, "Strain-rate-dependent progressive damage modelling of UHMWPE composite laminate subjected to impact loading", *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 31, no. 2, pp. 215-245, 2022.

[19] P.P. Camanho, and C.G. Davila, "Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials", *Tech. Rep. NASA/TM-2002-211737*, June 2002.

[20] H. Yademellat, A. Nikbakht, H. Saghafi, and M. Sadighi, "Experimental and numerical investigation of low velocity impact on electrospun nanofiber modified composite laminates", *Composite Structures*, vol. 200, pp. 507-514, September 2018.

• افزایش کسر حجمی فلز در چندلایه‌های FML، موجب افزایش حداکثر نیروی تماسی شده و مدت زمان تماس، حداکثر جابه‌جایی در مرکز ورق و همچنین مقدار انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. مقدار جابه‌جایی در مرکز ورق در نمونه‌های گلاس، بطور متوسط ۵/۲ درصد بیشتر از کارال می‌باشد.

۵- منابع

[1] L. B. Vogelesang, and A. Vlot, "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures", *Journal of materials processing technology*, vol. 103, no. 1, pp. 1-5, June 2000.

[2] V. Muniyan, V. V. Kumar, I. Suyambulingam, S. Priyadharshini, D. Divakaran, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, "A review of recent advancements in the impact response of fiber metal laminates", *Heliyon*, vol. 11, no. 2, e41756, 2025.

[3] M. Yarmohammad Tooski, R. C. Alderliesten, R. Ghajar, and S. M. R. Khalili, "Experimental investigation on distance effects in repeated low velocity impact on fiber-metal laminates", *Composite Structures*, vol. 99, pp. 31-40, May 2013.

[4] G. C. Yu, L. Z. Wu, L. Ma, and J. Xiong, "Low velocity impact of carbon fiber aluminum laminates", *Composite Structures*, vol. 119, pp. 757-766, January 2015.

[5] F.A. Ghasemi, S. Raissi, and K. Malekzadehfard, "Analytical and mathematical modeling and optimization of fiber metal laminates (FMLs) subjected to low-velocity impact via combined response surface regression and zero-one programming", *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 10, no. 2, pp. 391-408, March 2013.

[6] G. Caprino, G. Spataro, and S. Del Luongo, "Low-velocity impact behaviour of fibreglass-aluminium laminates", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, no. 5, pp. 605-616, May 2004.

[7] S. H. Song, Y. S. Byun, T. W. Ku, W. J. Song, J. Kim, and B. S. Kang, "Experimental and numerical investigation on impact performance of carbon reinforced aluminum laminates", *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 26, no. 4, pp. 327-332, April 2010.

[8] M. Sadighi, T. Parnanen, R. C. Alderliesten, M. Sayeefatabi, and R. Benedictus, "Experimental and numerical investigation of metal type and thickness effects on the impact resistance of fiber-metal laminates", *Applied Composite Materials*, vol. 19, no. 3, pp. 545- 559, June 2012.



[21] M. Zakeri, H. Mansoori, M. Sadeghian, and M. Guagliano, "Impact response of fiber metal laminates based on aluminum and UHMWPE composite: Numerical simulation", *Thin-Walled Structures*, vol. 172, p. 108796, March 2022.

۶- پی نوشت

1. Fiber Metal Laminates (FMLs)
2. Metal Volume Fraction (MVF)
3. ARALL
4. CARALL
5. GLARE
6. Solid elements
7. Shell elements
8. Johnson Cook Model
9. Hashin Failure Criteria
10. Cohesive Zone Model
11. Explicit
12. Fortran
13. General Contact
14. Penalty
15. Hard Contact
16. Discrete

۵۳

سال ۱۴ - شماره ۱
پهارویستفان ۱۴۰۴
نشریه علمی
دانش و فناوری هوا فضا



تحلیل پاسخ ضربه چندلایه‌های الیاف-فلز کارال و گلار
با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود