مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد 1396، دوره 17، شماره 3، ص‌ص 367-375

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی آسیب ایجاد شده در کامپوزیت گلیر در اثر برخورد مایل گلوله ضدزره کالیبر متوسط

پویا پیرعلی[1*]، مهرداد قدمی[2]، رضا بابایی[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 1774-15875، ppirali@mut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 آذر 1395

پذیرش: 24 بهمن 1395

ارائه در سایت: 14 فروردین 1396

کلید واژگان:

نفوذ مایل

گلیر(Glare)

پرتابه کالیبر متوسط

گلوله ضدزره (AP)

چکیده

پرتابه‌های کالیبر متوسط ضدزره، که معمولاً علیه اهداف هوایی یا زرهی مورد استفاده قرار می‌گیرند، انرژی جنبشی زیادی دارند و در عمل امکان جلوگیری از نفوذ این پرتابه‌ها در اهداف مختلف به طور مستقیم وجود ندارد؛ بنابراین لازم است تا با مطالعه اهداف، راهی برای مقابله با این نوع پرتابه‌ها ارائه شود. در این مطالعه به شبیه‌سازی عددی پدیده نفوذ مایل پرتابه کالیبر متوسط ضدزره در اهداف مسطح گلیر 3 2/1 و گلیر 5 2/1 با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس و حلگر دینامیک صریح، پرداخته شده و آسیب‌دیدگی ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت‌های برخورد مورد مطالعه 625 و 1250 متر بر ثانیه و زوایای برخورد صفر، 30، 45 و 60 درجه بوده است. به منظور صحت‌سنجی روش حل از یک رابطه تجربی که مقدار انرژی نفوذ را برای ورق‌های نازک گلیر تعیین می‌کند، استفاده شده است. نتایج حاکی از پدیده‌های خاص مثل پتالینگ نامتقارن و ایجاد ریزترک‌ها در برخوردهای مایل بوده و همچنین نشان‌دهنده این است که سرعت برخورد کمتر و زاویه برخورد بیشتر منجر به افزایش آسیب می‌شود. بعلاوه، لایه‌لایه‌شدگی هدف نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

Numerical investigation of the damaged area of GLARE® under oblique impact of the AP projectile with medium caliber

Pooya Pirali*, Mehrdad Ghadami, Reza Babaei

Mechanical Engineering Research Center, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, ppirali@mut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 December 2016
Accepted 12 February 2017
Available Online 03 April 2017

Keywords:
Oblique Penetration
GLARE
Medium Caliber
AP Projectile

ABSTRACT

The medium caliber armor piercing projectiles, commonly being used against armored and aerial targets, have high kinetic energy and in practice, it is impossible to prevent these projectiles from penetration through different types of targets. So it is essential to demonstrate a solution to repel these projectiles by study on behavior of the targets. In this study, numerical simulation of oblique penetration of medium caliber armor piercing projectile through the flat targets of GLARE3 2/1 and GLARE5 2/1 has been investigated by ABAQUS finite element software, and using explicit-dynamic solver. 625m/s and 1250m/s strike velocities and 0, 30, 45, and 60 degree strike angles have been studied. Damaged area have been investigated. To verify the solving method, an experimental equation, which has determined the penetration energy of a thin GLARE target, has been used. Results have shown that some special phenomena (e.g. asymmetric petalling, and small-cracks formation) appear when penetration occurs obliquely. This is also has been shown that the lower strike velocity, and the higher strike angle will result in the higher target damage. Furthermore, delamination of target has been investigated.

1- مقدمه

گلیر[1] به دسته خاصی از ورق‌های الیاف-فلز[2] اطلاق می‌شود که صفحه فلزی آن از جنس آلومینیوم و الیاف آن از جنس شیشه بهمراه رزین اپوکسی می‌باشد. نحوه چینش لایه‌های گلیر به شکلی است که بایستی همواره یک لایه الیاف بین دو لایه آلومینیوم قرار گرفته و در مجموع بالاترین و پایین‌ترین لایه نیز باید از جنس آلومینیوم باشد. لازم به ذکر است که لایه الیاف مذکور، از چند زیر لایه الیاف شیشه تشکیل شده است که جنس آلومینیوم و الیاف شیشه و نحوه چینش زیرلایه‌های الیاف شیشه، اساس نام‌گذاری گلیرها می‌باشد. نام‌گذاری گلیرها از دو بخش تشکیل می‌گردد؛ بخش اول که شامل نام گلیر و یک عدد است، نشان‌دهنده استانداردی می‌باشد که جنس لایه آلومینیوم و جنس الیاف شیشه و نحوه چینش زیرلایه‌های الیاف شیشه را نشان می‌دهد. بخش دوم نشان‌دهنده تعداد لایه‌های آلومینیوم و لایه‌های الیاف شیشه است که همواره تعداد لایه‌های آلومینیوم، یک واحد از تعداد لایه‌های الیاف شیشه بیشتر است. به طور مثال بخش اول گلیر3 2/1 یعنی گلیر 3 بیانگر خانواده‌ای از گلیرها می‌باشد که جنس آلومینیوم آنها، آلومینیوم

[1] GLARE
[2] Fiber-Metal Laminate - FML

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
P. Pirali, M. Ghadami, R. Babaei, Numerical investigation of the damaged area of GLARE® under oblique impact of the AP projectile with medium caliber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 367-375, 2017 (in Persian)

2024-تی3[1] و الیاف شیشه آنها از جنس اس2-گلاس[2] است. لایه الیاف شیشه آن از دو زیرلایه و به صورت0/90 تشکیل شده است و بخش دوم یعنی 2/1، نشان‌دهنده یک عضو خاص از خانواده گلیر3 است که فقط از دو لایه آلومینیوم و یک لایه الیاف شیشه(که شامل دو زیر لایه به صورت 0/90 است) تشکیل شده و در مجموع یک کامپوزیت 4 لایه را تشکیل داده است [1].

از بین خانواده‌های گلیر، دو خانواده گلیر3 و گلیر5، به دلیل خواص خوب از نظر ضربه و خستگی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند و در این مطالعه نیز بررسی‌ها بر روی این دو نوع گلیر صورت گرفته است. جنس آلومینیوم و الیاف شیشه در گلیر3 و گلیر5 مشابه است. اما گلیر5 شامل 4 زیرلایه الیاف شیشه به صورت 0/90/90/0 می‌باشد. ضخامت لایه‌های الیاف و آلومینیوم در هر دو گلیر نیز، به ترتیب 0.266 و 0.35 میلی‌متر در نظر گرفته شده است [2].

ورق‌های الیاف-فلز گلیر جایگزین بسیار مناسبی برای آلیاژهای خالص آلومینیوم در سازه‌های اساسی هواپیما هستند. رفتارهای آغازش و گسترش ترک خستگی و همچنین میزان تحمل آسیب این ورق‌ها از آلومینیوم خالص بهتر است. در طی دهه‌های گذشته، تقاضای افزاینده صنایع هوایی برای سازه‌های با عملکرد بالا و وزن کم، گرایش زیادی به سمت گسترش مدل‌های اصلاح شده برای ورق‌های الیاف-فلز ایجاد کرده و مطالعات فراوانی روی ورق‌های الیاف-فلز شامل بررسی خواص مکانیکی، هندسی و پاسخ آن به بارگذاری‌های مختلف (مثل انفجاری، ضربه کم‌سرعت، ضربه پرسرعت، کشش) و اثرات این پارامترها بر یکدیگر صورت گرفته است [3]. در سال‌های اخیر، صبوری و همکارانش، نفوذ ضربه بالستیک در اهداف گلیر را با شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی و بررسی اثر ترتیب چینش آلومینیوم (با ضخامت‌های متفاوت)، مورد مطالعه قرار داده‌اند [4]. همچنین صدیقی و همکارانش، مروری بر مقاومت ضربه ورق‌های الیاف-فلز ارائه داده‌اند [5] و احمدی و همکارانش، خواص ضربه پرسرعت گلیر را از طریق بررسی اهداف با نسبت ضخامت‌های مختلف و مکانیزم آسیب مورد مطالعه قرار داده‌اند [6]. بعلاوه صدیقی و همکارانش پاسخ به ضربه کم‌سرعت گلیر نیز مطالعه کرده‌اند [7] و ضربه پرسرعت پرتابه استوانه‌ای به پنل ساندویچی توسط قلمی و همکارانش بررسی گردیده است [8]. مسعودی و همکارانش نیز تاثیر نانورس بر روی خواص بالستیکی کامپوزیت الیاف-فلز گلیر را با بررسی تجربی و عددی آن مطالعه نموده‌اند [9]. با توجه به بررسی تاریخچه مطالعه روی گلیر، مشاهده می‌شود که علی‌رغم مطالعات گسترده انجام شده روی جنبه‌های مختلف ورق‌های الیاف-فلز، هیچ‌گونه تحقیقی روی پدیده نفوذ مایل پرتابه‌های کالیبر متوسط ضدزره در گلیر صورت نگرفته است؛ حال آنکه بزرگترین تهدید برای تعدادی از هواپیماهای مدرن که بخش اعظمی از بدنه آنها از جنس ورق‌های الیاف-فلز است (و استفاده از این کامپوزیت‌ها در اکثر هواپیماهای آینده قابل پیش‌بینی است)، برخورد این نوع پرتابه‌ها می‌باشد. پرتابه‌ای که در این مطالعه انتخاب گردیده است، پرتابه ام-791[3] با کالیبر 25 میلیمتر است. جنس هسته آن تنگستن و جنس روکش آن از پلی اتیلن بوده و سرعت آن در دهانه سلاح 1345 متر بر ثانیه می‌باشد. برد مؤثر آن 2000 متر بوده و سرعت آن در این برد، 1250 متر بر ثانیه می‌باشد [10]. با توجه به جرم حدود 65 گرمی این پرتابه، انرژی جنبشی آن در لحظه برخورد در فاصله 2000 متری از محل پرتاب، حدود 51000 ژول خواهد بود که مقدار بسیار بزرگی است. بنابراین هیچ هدفی به طور مستقیم نمی‌تواند در برابر نفوذ آنها مقاومت کند و برای همین باید با مطالعه این پدیده، راه‌حل‌هایی برای کاهش آسیب‌ها، خصوصا آسیب‌های خطرناک منجر به فروپاشی ارائه گردد. این مطالعه می‌تواند از دیدگاه مکانیک شکست، به بررسی ابعاد آسیب‌های مختلف هدف یا پرتابه بپردازد و همچنین می‌تواند از دیدگاه دفاعی راه حلی برای افزایش احتمال کمانه کردن پرتابه، پس از برخورد با هدف ارائه دهد. در این مطالعه، با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی آسیب‌دیدگی‌های ورق گلیر ناشی از برخورد مایل پرتابه کالیبر متوسط ضدزره پرداخته شده است.

2- تئوری‌های مسئله

برای شبیه‌سازی رفتار مواد مختلف مورد استفاده در ساخت هدف گلیر و همچنین پرتابه، نیاز به مدل‌های مادی ایزوتروپیک (شبیه‌سازی آلومینیوم، تنگستن و پلی‌اتیلن)، کامپوزیت تک جهته سه بعدی (شبیه‌سازی الیاف شیشه) و ماده چسبنده (شبیه‌سازی اپوکسی) می‌باشد.

2-1- مدل مادی ایزوتروپیک

به ماده‌ای اطلاق می‌شود که در همه جهات دارای خواص مکانیکی یکسانی بوده و برای تعریف رفتار این نوع مواد در ناحیه الاستیک، تنها به یک مدول الاستیسیته و یک ضریب پواسون در کنار رابطه هوک نیاز است. همچنین در صورت نرم بودن این مواد، برای تعریف ناحیه الاستیک و پلاستیک، تنها نیاز به مشخص بودن دو استحکام تسلیم و نهایی می‌باشد و زمانیکه تنش در ماده از تنش نهایی بیشتر شود، ماده دچار شکست می‌گردد [11].

2-2- مدل مادی ورق کامپوزیت تک جهته سه بعدی

این مواد تنها رفتار الاستیک دارند و خواص مکانیکی آنها در جهت‌های مختلف، متفاوت است؛ بنابراین برای تعریف رفتار الاستیک این مواد، به سه مدول الاستیسیته، سه ضریب پواسون و سه مدول برشی در کنار روابط هوک نیاز است. هفت مود شکست برای الیاف در این ماده تعریف می‌گردد که به صورت رابطه (1) می‌باشد [11].

$$\begin{gathered}\sigma_1 \geq X_t \\ |\sigma_1| \geq X_c \\ \sigma_2 \geq Y_t \text{ یا } \sigma_3 \geq Y_t \\ |\sigma_2| \geq Y_c \text{ یا } |\sigma_3| \geq Y_c \\ |\tau| \geq S\end{gathered} \qquad (1)$$

طبق رابطه (1)، اگر تنش کششی در راستای طولی الیاف از استحکام کششی طولی، یا تنش فشاری طولی از استحکام فشاری طولی، یا تنش کششی عرضی از استحکام کششی عرضی، یا اندازه تنش فشاری عرضی از استحکام فشاری عرضی و یا اندازه تنش برشی از استحکام برشی بیشتر گردد، الیاف دچار شکست می‌شوند [11].

2-3- مدل مادی ماده چسبنده

به منظور مطالعه و شبیه‌سازی پدیده لایه‌لایه‌شدگی[4] در کامپوزیت‌ها، نیاز به تعریف خواص مکانیکی ماده چسبنده است. روابط مربوط به چسب‌ها دقیقا از روابط مکانیک شکست نشأت می‌گیرند؛ چرا که ایجاد و گسترش لایه‌لایه-شدگی کامپوزیت را می‌توان مثل ایجاد و گسترش یک ترک در نظر گرفت. رفتار چسب قبل از آغاز جدایش به صورت الاستیک خطی است. در خصوص

[1] Aluminum 2024-T3
[2] S2-Glass
[3] M-791
[4] Delamination

کامپوزیت‌ها، از آنجایی که ضخامتی برای چسب بین لایه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود از رابطه کشش-جدایش[1] به جای تنش-کرنش استفاده می‌گردد. رابطه (2) نشان‌دهنده رابطه کشش-جدایش است [12].

$$\sigma_i = K_i\delta_i\,, i = I, II, III \tag{2}$$

در رابطه (2)، K_i سفتی پنالتی نامیده می‌شود و ضریبی است که کشش را به جدایش در هر جهت مرتبط می‌کند و واحد آن نیوتون بر مترمکعب است. در روابط مکانیک شکست، سه مود گسترش ترک به صورت بازشدگی، برشی و پارگی وجود دارد. اندیس‌های موجود در رابطه 2 بیانگر هرکدام از این مودها است. برای هر یک از مودهای گسترش ترک، یک استحکام چسب نیز تعریف می‌شود که با رسیدن میزان بارگذاری به این مقادیر، جدایش آغاز می‌گردد. همان‌طور که قبلا گفته شد، تا قبل از آغاز جدایش، چسب رفتار الاستیک خطی دارد اما بعد از آن رفتار الاستیک آسیب‌دیده دارد که بر اساس آن مقادیر سفتی پنالتی مورد استفاده در رابطه (2) براساس رابطه (3) تعریف می‌شود[12].

$$K_i = (1 - D_i)\widetilde{K}_i \tag{3}$$

همچنین برای تعریف رفتار گسترش جدایش چسب در مرحله بعد از آغاز جدایش، از روابط مکانیک شکست برای گسترش ترک بعد از ایجاد ترک، یعنی انرژی شکست (انرژی آزاد شده بر واحد سطح یا انرژی گریفیث) برای هر یک از سه مود استفاده می‌گردد [12].

2-4- انرژی نفوذ برای ورق‌های نازک گلیر و سرعت بالای برخورد پرتابه

انرژی نفوذ برای ورق‌های بسیار نازک گلیر که توسط پرتابه با سرعت‌های بسیار بالا و بدون زاویه برخورد و زاویه حمله مورد برخورد و نفوذ قرار می‌گیرند، به کمک رابطه (4) پیش‌بینی شده است [13].

$$E_p = \frac{\pi d^2 T}{4}\left[1 + \Gamma\sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}}V_i\right]\sigma_e$$

$$\sigma_e = \frac{Y}{\sqrt{3}}\left\{1 + \ln\left[\frac{1}{\sqrt{3}}\left(\frac{E}{Y}\right)\right]\right\} \tag{4}$$

رابطه (4)، یک رابطه تجربی است که با استفاده از انجام تست‌های تجربی متعدد ضربه بالستیک قائم (توسط گلوله‌هایی با هندسه‌های مختلف) روی هدف مسطح از جنس گلیر3 با چیدمان 2/1 (که بسیار نازک است) بدست آمده و تنها می‌تواند افت انرژی جنبشی گلوله حاصل از نفوذ را برای اهداف نازک گلیر و سرعت‌های بسیار زیاد گلوله و زاویه برخورد صفر (برخورد قائم یا غیرمایل) به کمک ویژگی‌های هندسی و مکانیکی کامپوزیت (شامل ضخامت T و چگالی ρ_t)، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده (شامل مدول الاستیسیته E و استحکام تسلیم Y) و خواص مکانیکی و هندسی پرتابه (شامل اندازه کالیبر d ، هندسه سر پرتابه Γ و سرعت اولیه برخورد V_i) پیش‌بینی کند. با توجه به رابطه 4 با افزایش سرعت برخورد، چگالی و ضخامت کامپوزیت و کالیبر گلوله، انرژی جذب شده توسط گلیر بر اثر نفوذ گلوله در آن بیشتر می‌شود. بعلاوه ضریب مرتبط با هندسه سر پرتابه و مقادیر گزارش شده برای آن، نشان‌دهنده آن است که هرچه نوک گلوله به سمت نوک‌تیزتر شدن پیش رود، انرژی جذب شده توسط گلیر کمتر می‌گردد [13].

[1] Traction-Separation

3- مدل‌سازی مسئله

3-1- مدل‌سازی هدف

مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس[2] و به صورت اکسپلیسیت دینامیک[3] صورت گرفته است. در این مدل‌سازی، تک تک لایه-های هدف به طور جداگانه به صورت المان‌های سالید[4] و سی3دی8آر[5] و ابعاد 20×20 سانتی‌متر ایجاد گردیده‌اند. به کمک تعریف اینتراکشن[6] چسب بین لایه‌ها، امکان مدل‌سازی پدیده لایه‌لایه‌شدگی نیز فراهم آمده است. اهداف مورد مطالعه، گلیر3 و گلیر5 هستند و جنس لایه‌های مختلف هدف، آلومینیوم 2024-تی3 و الیاف اس2-گلاس می‌باشد. در مطالعات صورت گرفته، رفتار آلومینیوم 2024-تی3 به صورت یک ماده ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است و خواص مکانیکی آن در جدول 1 ارائه گردیده است [11].

الیاف اس2-گلاس نیز یک ورق کامپوزیت تک لایه و تک جهته سه بعدی فرض شده است و خواص مکانیکی مرتبط با این کامپوزیت سه بعدی در جدول 2 ارائه شده است[11].

رزین یا چسب مجموعه هدف نیز اپوکسی است که علاوه بر نگه‌داشتن الیاف در کنار هم، باعث چسبیدن لایه الیاف به لایه آلومینیوم می‌شود و خواص آن نیز در جدول 3 ارائه شده است [12].

3-2- مدل‌سازی پرتابه

پرتابه ام-791 دارای هسته تنگستنی و روکش پلی اتیلن می‌باشد. تنگستن یک فلز ایزوتروپیک است و خواص مکانیکی آن در جدول 4 ارائه شده است[10].

همچنین خواص مکانیکی پلی اتیلن که فقط رفتار الاستیک خطی دارد و در استحکام تسلیم دچار شکست می‌شود، در جدول 5 ارائه گردیده است [10].

جدول 1 خواص مکانیکی آلومینیوم 2024-تی3[11]

Table 1 Mechanical Properties of Aluminum 2024-T3 [11]

خواص مکانیکی	مقدار
چگالی (kg/m3)	2780
مدول الاستیسیته (GPa)	73.1
ضریب پواسون	0.33
درصد تغییر طول (٪)	18
استحکام تسلیم (MPa)	345
استحکام نهایی (MPa)	483

جدول 2 خواص مکانیکی الیاف اس2-گلاس [11]

Table 2 Mechanical Properties of S2-Glass [11]

خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی	مقدار
مدول یانگ اول E_1(GPa)	36	ضریب پواسون 23	0.34
مدول یانگ دوم E_2(GPa)	5	ضریب پواسون 13	0.25
مدول یانگ سوم E_3(GPa)	5	استحکام کششی طولی Xt(MPa)	465
مدول برشی 12 G_{12}(GPa)	2.7	استحکام کششی عرضی Yt(MPa)	5.6
مدول برشی 13 G_{12}(GPa)	2.7	استحکام فشاری عرضی Yc(MPa)	5.6
مدول برشی 23 G_{12}(GPa)	1.92	استحکام برشی S(MPa)	19.2
ضریب پواسون 12	0.25	چگالی (kg/m3)	1540

[2] Abaqus
[3] Explicit Dynamic
[4] Solid
[5] C3D8R
[6] Interaction

جدول 3 خواص چسبانندگی اپوکسی [12]

Table 3 Cohesive Properties of Epoxy [12]

خواص چسبانندگی	مقدار	خواص چسبانندگی	مقدار
سفتی پنالتی مود اول K_I(N/m3)	570×10^{22}	سفتی پنالتی مود دوم K_{II}(N/m3)	570×10^{22}
سفتی پنالتی مود سوم K_{III}(N/m3)	570×10^{22}	استحکام مود اول چسب (MPa)	57
استحکام مود دوم چسب (MPa)	57	استحکام مود سوم چسب (MPa)	57
انرژی شکست مود اول (J/m2)	280	انرژی شکست مود دوم (J/m2)	280
انرژی شکست مود سوم (J/m2)	280		

جدول 4 خواص مکانیکی تنگستن [10]

Table 4 Mechanical Properties of Tungsten [10]

خواص مکانیکی	مقدار
چگالی (kg/m3)	17500
مدول الاستیسیته (GPa)	324
ضریب پواسون	0.28
استحکام تسلیم (MPa)	517
استحکام نهایی (MPa)	758
درصد تغییر طول	2

جدول 5 خواص مکانیکی پلی اتیلن [10]

Table 5 Mechanical Properties of Polyethylene [10]

خواص مکانیکی	مقدار
چگالی (kg/m3)	950
مدول الاستیسیته (GPa)	1.37
ضریب پواسون	0.4
استحکام تسلیم (MPa)	31.7

در شبیه‌سازی المان محدود به منظور اهمیت بررسی تغییر شکل پرتابه، هم هسته و هم روکش آن غیر صلب لحاظ شده و از المان سالید سی3دی8آر در المان‌بندی آن استفاده گردیده است. به دلیل محکم بودن پوسته و هسته در کنار هم نیز، امکان هیچگونه لغزش روی هم برای آنها وجود ندارد و بنابراین به صورت یک هندسه واحد تعریف گردیده‌اند. شکل 1 ابعاد پرتابه ام-791 را نمایش می دهد [10].

3-3- صحت‌سنجی مدل

به منظور صحت‌سنجی مدل، از رابطه 4 استفاده گردیده و همچنین بررسی حساسیت به مش برای پرتابه و هدف به طور جداگانه صورت گرفته است. به کمک رابطه 4، مقدار افت انرژی بر اثر نفوذ برای گلیر3 2/1 و پرتابه 25 میلی‌متری مسئله، 220.3 ژول محاسبه گردید. به منظور بررسی حساسیت به مش نیز، ابتدا تعداد المان‌های هدف 9500 درنظر گرفته شده و حساسیت به مش پرتابه بررسی گردید. سپس با انتخاب مقدار 29832 المان برای پرتابه، حساسیت به مش هدف مورد بررسی قرار گرفت و مقدار 10000 برای تعداد المان‌های هدف برگزیده شد(هر لایه 2500 المان). شکل‌های 2 و 3 به ترتیب بررسی حساسیت به مش را برای پرتابه و هدف نشان می‌دهند.

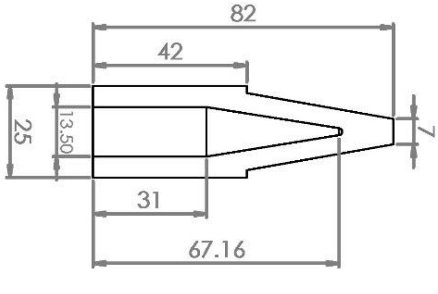

Fig. 1 Projectile Dimensions (in mm) [10]

شکل 1 ابعاد پرتابه (میلی‌متر) [10]

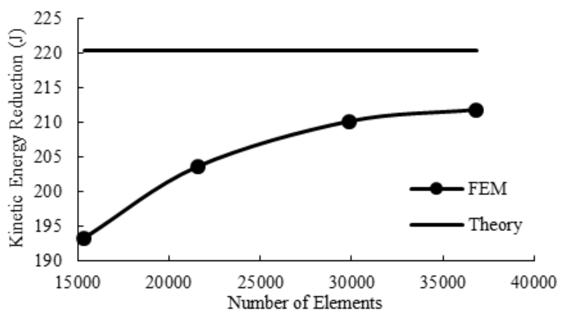

Fig. 2 Mesh Sensitivity of Projectile

شکل 2 حساسیت به مش پرتابه

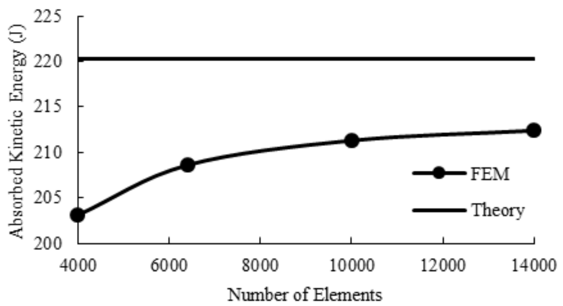

Fig. 3 Mesh Sensitivity of Target

شکل 3 حساسیت به مش هدف

با توجه به شکل‌های 2 و 3، صحت مدل‌سازی بررسی شده است. شکل 4 یک نمونه از مدل نهایی (با زاویه برخورد 45 درجه) را نمایش می‌دهد.

3-4- حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده

پس از صحت‌سنجی مدل، روی هر یک از اهداف گلیر3 2/1 و گلیر5 2/1 ، 8 شبیه‌سازی المان محدود صورت گرفته است (در مجموع 16 شبیه‌سازی) که در 4 شبیه‌سازی، پرتابه سرعت اولیه 1250 متر بر ثانیه دارد و برخورد در زوایای صفر، 30، 45 و 60 درجه (نسبت به بردار نرمال هدف) رخ می‌دهد. در 4 شبیه‌سازی دیگر، به منظور بررسی اثر سرعت، پرتابه سرعت اولیه 625 متر بر ثانیه دارد و مجدد با زوایای برخورد صفر، 30، 45 و 60 درجه به هدف برخورد می‌کند. شبیه‌سازی‌های المان محدود به صورت برخورد مایل و در صفحه افقی عمود بر سطح هدف صورت می‌گیرد. همچنین هرگونه حرکت

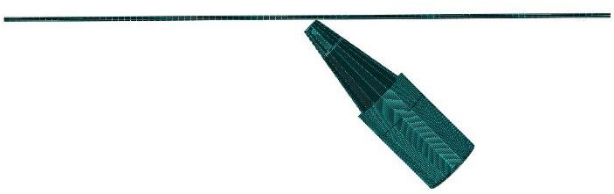

Fig. 4 Final finite element model

شکل 4 مدل نهایی المان محدود

برای هدف در هر سه لبه‌ی بالا، راست و چپ به طور کامل مقید فرض شده است. از آنجایی که زاویه حمله در این مطالعه در نظر گرفته نمی‌شود، لذا سرعت برخورد پرتابه با سطح، همواره در راستای محور پرتابه خواهد بود.

4- نتایج

در شکل‌های 5 تا 8 تاریخچه‌های انرژی جنبشی پرتابه به ازای زوایای برخورد مختلف به ترتیب برای گلیر3 2/1 با سرعت 625 و 1250 متر بر ثانیه و گلیر5 2/1 با سرعت برخورد 625 و 1250 متر بر ثانیه مقایسه شده است.

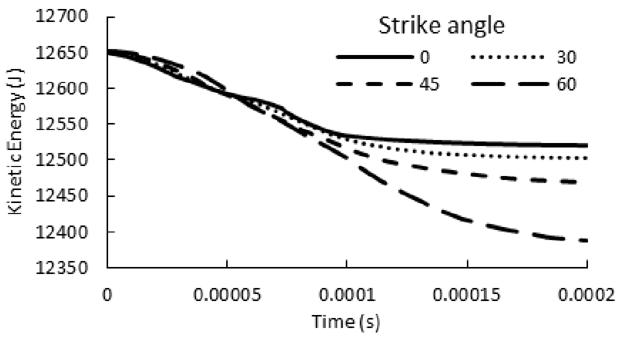

Fig. 5 Kinetic energy history of projectile impacted to GLARE3 2/1 with strike velocity of 625 m/s

شکل 5 تاریخچه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کرده با گلیر3 2/1 با سرعت برخورد 625 متر بر ثانیه

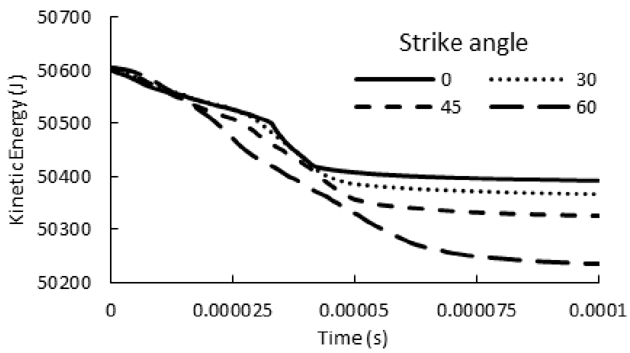

Fig. 6 Kinetic energy history of projectile impacted to GLARE3 2/1 with strike velocity of 1250 m/s

شکل 6 تاریخچه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کرده با گلیر3 2/1 با سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه

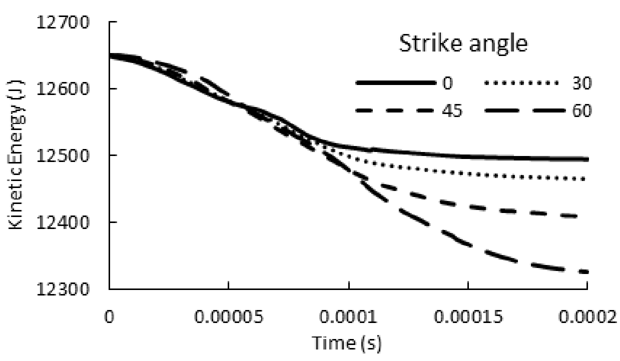

Fig. 7 Kinetic energy history of projectile impacted to GLARE5 2/1 with strike velocity of 625 m/s

شکل 7 تاریخچه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کرده با گلیر55 2/1 با سرعت برخورد 625 متر بر ثانیه

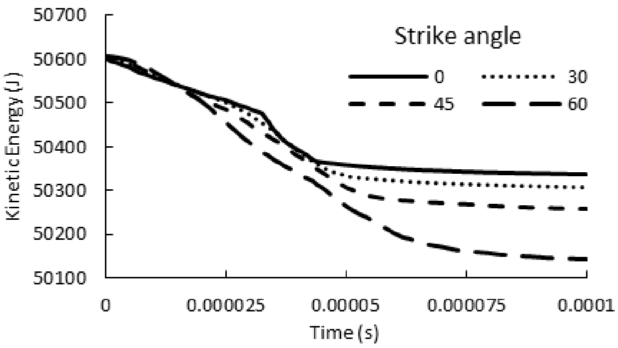

Fig. 8 Kinetic energy history of projectile impacted to GLARE5 2/1 with strike velocity of 1250 m/s

شکل 8 تاریخچه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کرده با گلیر5 2/1 با سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه

با توجه به شکل‌های 5 تا 8 همه‌ی نتایج دارای ویژگی خاصی هستند؛ نمودار در هر چهار حالت دارای سه قسمت است؛ بخش کم شیب که نشان‌دهنده‌ی برخورد قسمت کم قطر نوک پرتابه است، قسمت با شیب زیاد که نشان-دهنده‌ی برخورد بخش با قطر بزرگتر پرتابه است و بخش نهایی که مجدد شیب ملایمی دارد تا به حالتی پایدار می‌رسد که نشان‌دهنده‌ی نفوذ کامل پرتابه و عبور از صفحه هدف می‌باشد. میزان افت انرژی جنبشی با افزایش زاویه برخورد بیشتر می‌شود؛ چرا که با افزایش زاویه برخورد، سطح وسیع تری از هدف با پرتابه درگیر می‌شود و نفوذ در این سطح وسیع‌تر نیازمند انرژی بیشتری می‌باشد؛ علاوه بر این، این افزایش افت انرژی را می‌توان به افزایش تأثیرگذاری لایه‌های ساخته شده از الیاف شیشه‌ی کامپوزیت در زوایای برخورد بالاتر نسبت داد.

در جدول 6، میزان کاهش انرژی جنبشی مستخرج از شکل های 5 تا 8 برای هر دو کامپوزیت گلیر مورد مقایسه قرار گرفته است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل استحکام بالاتر گلیر5، مقادیر متناظر افت انرژی آن در مقایسه با گلیر3، بیشتر است و به ازای افزایش زاویه برخورد، اختلاف افت انرژی در دو کامپوزیت به دلیل افزایش تأثیرگذاری الیاف شیشه، بیشتر می شود. همچنین با افزایش سرعت برخورد در بازه‌ی 625 تا 1250 متر بر ثانیه، میزان افت انرژی جنبشی به ازای شرایط همزمان جنس یکسان و سرعت یکسان افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که به ازای سرعت یکسان، با افزایش زاویه برخورد، میزان افت انرژی افزایش می یابد و با مقایسه دو سرعت 625 تا 1250 متر بر ثانیه، این موضوع قابل توجه است که میزان افزایش افت انرژی به ازای افزایش زاویه برخورد در سرعت 1250 متر بر ثانیه بیشتر از مقادیر متناظر در سرعت 625 متر بر ثانیه است. علت این تفاوت‌ها با مقایسه تکانه پرتابه ($Fdt=mdV$) در کنار تعریف کار انجام شده توسط نیروی متوسط پرتابه ($dW=Fdx$) قابل توجیه است. زیرا با افزایش زاویه برخورد هم مدت زمان برخورد و هم مقدار جابه‌جایی نقطه اثر

جدول 6 افت انرژی جنبشی (ژول)

Table 6 Kinetic energy reduction (J)

حالت	صفر درجه	30 درجه	45 درجه	60 درجه
گلیر3 625	130.6	147.9	182	263.5
گلیر3 1250	212.4	236.6	279.2	370.2
گلیر5 625	156.5	185.8	242.6	325.6
گلیر5 1250	268.3	296.6	348.1	461

نیروی متوسط افزایش یافته و در نتیجه تغییرات انرژی جنبشی بیشتر می‌گردد. همچنین با افزایش سرعت برخورد، مقدار نیروی میانگین بیشتر شده و در نتیجه مقادیر متناظر افت انرژی جنبشی به ازای سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه بیشتر از 625 متر بر ثانیه می‌شود.

جدول‌های 7 و 8 طول بزرگترین ترک افقی و عمودی را برای تک تک لایه‌ها به ازای زوایای برخورد صفر، 30، 45 و 60 درجه و سرعت‌های برخورد 625 و 1250 متر بر ثانیه به ترتیب برای گلیر3 و گلیر5 نمایش می‌دهند.

با توجه به جداول 7 و 8 در راستای افقی و در همه حالات، با افزایش زاویه برخورد، طول بزرگترین ترک نیز افزایش می‌یابد. علت این موضوع، افزایش سطح درگیری پرتابه و هدف می‌باشد. اما در راستای عمودی، این موضوع تنها تا زاویه 45 درجه مشاهده می‌گردد و البته روند افزایش طول ترک عمودی حتی در این بازه نیز دائمی نیست و متأثر از عوامل دیگر مثل جهت الیاف (در لایه‌های الیافی) و پدیده پتالینگ نامتقارن (در لایه آلومینیوم پشت هدف) می‌باشد. طوریکه طول ترک عمودی با افزایش زاویه برخورد می‌تواند ثابت بماند یا حتی کاهش داشته باشد. علت به وجود آمدن پدیده پتالینگ نامتقارن در برخورد مایل، فشاری است که پرتابه روی ناحیه‌ی مقابل خود روی هدف در زمان نفوذ اعمال می‌کند و باعث برآمدگی بخشی از هدف -که روبروی پرتابه قرار دارد- به سمت جلو می‌شود. بخشی از هدف که مخالف حرکت پرتابه- که بخش پشت پرتابه است- قرار دارد، همراه با حرکت پرتابه کشیده شده و اثر فشاری پرتابه در این ناحیه، با افزایش زاویه برخورد، کاهش می‌یابد. در زاویه 60 درجه، در تمامی حالات، کاهش طول ترک عمودی به ازای افزایش زاویه برخورد از 45 به 60 درجه قابل مشاهده است.

جدول 7 طول ناحیه آسیب‌دیده گلیر3 (سانتی‌متر)

Table 7 Length of damaged area in GLARE3 (cm)

لایه/سرعت	0 افق	0 عمود	30 افق	30 عمود	45 افق	45 عمود	60 افق	60 عمود
اول/625	3	3	3.8	3.4	4.4	3.6	5.8	3.6
دوم/625	3.6	5.2	4	5.6	4.2	6.4	5.2	6
سوم/625	5.6	4.2	6	5	6.6	5.4	7	5.4
چهارم/625	5.4	5.4	5.6	5.2	6.2	6.4	6.8	5
اول/1250	2.9	2.9	3.2	3.2	4	3.4	5.4	3.2
دوم/1250	3.2	5.2	3.6	5.2	3.8	5.4	5	4.6
سوم/1250	5.6	3.4	5.6	4	6	4.6	6.6	4.6
چهارم/1250	3.2	3.2	4.2	3	4.6	3.8	5.8	3.4

جدول 8 طول ناحیه آسیب‌دیده گلیر5 (سانتی‌متر)

Table 8 Length of damaged area in GLARE5 (cm)

لایه/سرعت	0 افق	0 عمود	30 افق	30 عمود	45 افق	45 عمود	60 افق	60 عمود
اول/625	3	3	3.4	3	4	3.2	5.4	3.2
دوم/625	3.4	5	3.8	5.2	4	5.6	5	5.2
سوم/625	5.2	4	5.4	4.4	6	4.6	6.8	4.6
چهارم/625	5.2	4.2	5.4	4.6	6	4.6	6.8	4.8
پنجم/625	4.4	5.6	4.6	6	5	6.8	5.4	6.4
ششم/625	5.6	5.6	5.6	5.2	6.4	5.6	6.6	5.2
اول/1250	2.9	2.9	3.2	2.8	3.8	3	5.2	3
دوم/1250	3.2	5	3.6	5	3.8	5.2	4.8	4.6
سوم/1250	5.2	3.4	5.2	3.6	5.6	4	6.4	4
چهارم/1250	5.2	4	5.2	4.4	5.6	4.4	6.6	4.4
پنجم/1250	4.2	5.6	4.4	5.6	4.6	5.8	5.2	5.2
ششم/1250	3.4	3.4	4	3.4	5.4	4.2	5.6	3.4

این موضوع را می‌توان به تشکیل ریزترک‌های متعدد به جای یک ترک بزرگ نسبت داد که در اثر افزایش سطح درگیری پرتابه و هدف (پرتابه علاوه بر حرکت در راستای ضخامت هدف، روی سطح هدف نیز جابه‌جا می‌شود.) و توزیع بار روی بخش وسیع‌تری از هدف رخ می‌دهد.

همان‌طور که از جداول 7 و 8 مشاهده می‌گردد، لایه‌های آلومینیوم (لایه اول و چهارم در گلیر3 و اول و ششم در گلیر5) به دلیل تقارن خواص مکانیکی، به ازای زاویه برخورد صفر درجه، دارای طول ترک افقی و عمودی برابر هستند؛ اما با افزایش زاویه برخورد و افزایش سطح درگیری هدف و پرتابه در راستای افقی، طول ترک‌های افقی بیشتر از طول ترک‌های عمودی می‌شود. اما این موضوع در لایه‌های الیاف صدق نمی‌کند؛ لایه‌های الیاف با زاویه الیاف صفر درجه(لایه دوم در گلیر3 و لایه‌های دوم و پنجم در گلیر5) به دلیل ضعیف بودن جهت عرضی الیاف، به ازای زاویه برخورد صفر درجه، دارای طول ترک عمودی بیشتری نسبت به طول ترک افقی هستند. اما به دلیل افزایش سطح درگیری در راستای افقی به ازای زوایای برخورد بالاتر، طول ترک افقی نیز افزایش یافته و اختلاف بین ترک‌های عمودی و افقی کاهش می‌یابد و به ازای زاویه برخورد 60 درجه که در آن پدیده ریزترک‌ها رخ می‌دهد. حتی ممکن است طول ترک عمودی کمتر از طول ترک افقی شود. اما این موضوع در مورد لایه الیاف با زاویه الیاف 90 درجه (لایه سوم در گلیر3 و لایه سوم و چهارم در گلیر5) متفاوت است؛ چرا که جهت عرضی الیاف که جهت ضعیف‌تری است در راستای افقی قرار می‌گیرد و باعث می‌شود که در کنار پدیده افزایش سطح درگیری افقی، ترک‌های افقی همواره از ترک‌های عمودی بزرگتر باشند.

با توجه به جداول 7 و 8 و با مقایسه حالات متناظر سرعت‌های 625 و 1250 متر بر ثانیه، مشاهده می‌گردد که در همه‌ی موارد، ترک‌های متناظر به ازای سرعت 625 متر بر ثانیه، از ترک‌های ناشی از سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه بزرگتر هستند. علت این موضوع همان تفاوت میان بار استاتیک و بار ضربه‌ای است؛ زمانی که یک بار به طور استاتیک به یک سیستم وارد می‌شود، تمام بخش‌های آن سیستم زمان کافی را برای احساس آن بار دارند؛ اما وقتی بار به صورت ناگهانی و ضربه‌ای به یک سیستم وارد شود، تنها بخشی از سیستم که در معرض بارگذاری قرار دارد، آن را حس می‌کند و مدت زمانی نیاز است تا موج تنش ایجاد شده بر اثر ضربه توسط کل سیستم حس گردد. حال اگر میزان این تنش از تنش منجر به شکست تجاوز کند، آن بخش از سیستم که در معرض بارگذاری بوده است، دچار شکست شده و با قطع ارتباط بین بخش تحت بارگذاری سیستم و دیگر اجزای سیستم، موج تنش منجر به شکست به قسمت‌های دیگر سیستم نمی‌رسد. به عبارت دیگر هرچه مدت زمان اعمال بار کمتر باشد، بخش کوچکتری از سیستم از بین خواهد رفت. با توجه به این استدلال، بار ناشی از برخورد پرتابه با سرعت 625 متر بر ثانیه در مدت زمان طولانی تر نسبت به سرعت 1250 متر بر ثانیه، بر هدف اعمال می‌شود. بنابراین، ترک‌های ناشی از نفوذ پرتابه با سرعت 625 متر بر ثانیه بزرگتر از ترک‌های متناظر با سرعت 1250 متر بر ثانیه هستند.

شکل 9، نمونه‌ای از پتالینگ نامتقارن و شکل 10، نمونه‌ای از ایجاد ریزترک‌ها را نمایش می‌دهند.

در شکل‌های 11 تا 14 لایه‌لایه‌شدگی هدف گلیر5 2/1 به ازای سرعت 625 متر بر ثانیه و 1250 متر بر ثانیه و به ترتیب به ازای زاویه برخورد صفر، 30، 45 و 60 با یکدیگر مقایسه گردیده‌اند.

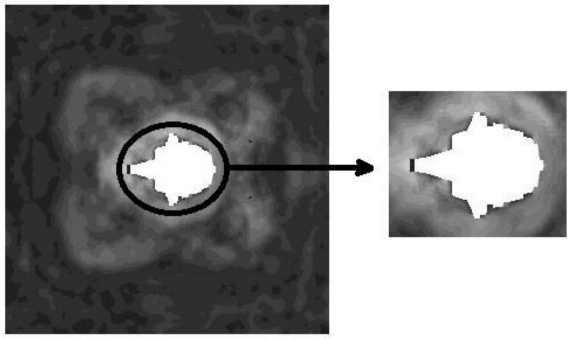

Fig. 9 Asymmetric petaling

شکل 9 نمونه‌ای از پتالینگ نامتقارن

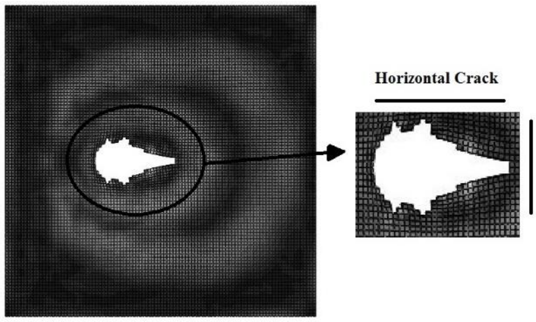

Fig. 10 Formation of vertical small-cracks

شکل 10 نمونه‌ای از تشکیل ریزترک‌های عمودی

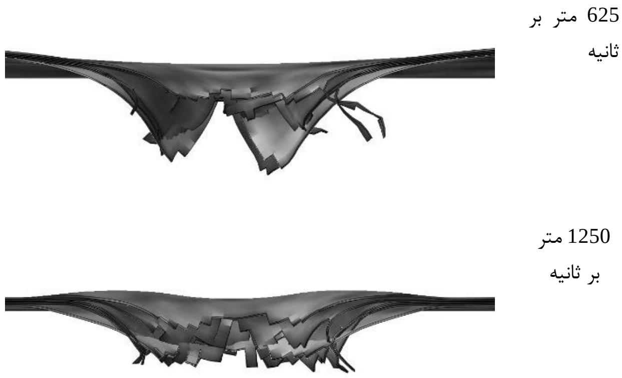

Fig. 11 Delamination of GLARE5- strike angle of zero degree

شکل 11 لایه‌لایه‌شدگی گلیر5 – زاویه برخورد صفر درجه

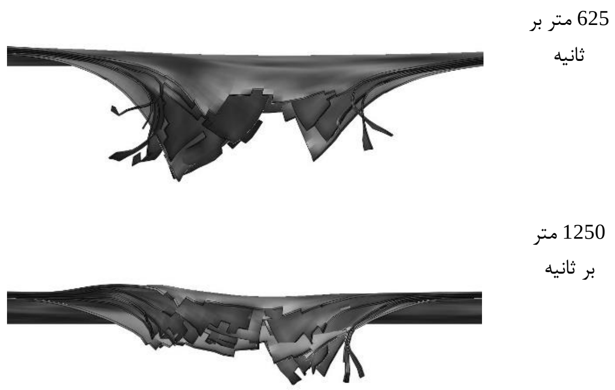

Fig. 12 Delamination of GLARE5- strike angle of 30 degree

شکل 12 لایه‌لایه‌شدگی گلیر5 – زاویه برخورد 30 درجه

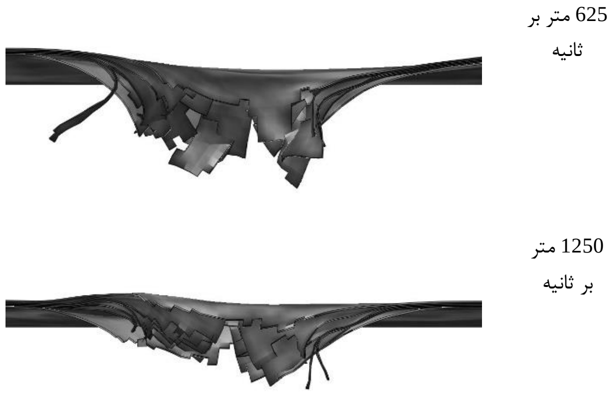

Fig. 13 Delamination of GLARE5- strike angle of 45 degree

شکل 13 لایه‌لایه‌شدگی گلیر5 – زاویه برخورد 45 درجه

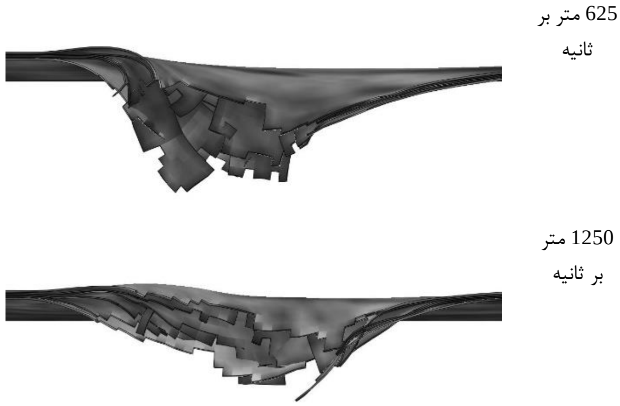

Fig. 14 Delamination of GLARE5- strike angle of 60 degree

شکل 14 لایه‌لایه‌شدگی گلیر5 – زاویه برخورد 60 درجه

از آنجایی که نتایج لایه‌لایه‌شدگی در گلیر3 مشابه گلیر5 می‌باشد، تنها به بررسی لایه‌لایه‌شدگی گلیر5 پرداخته شده و لازم به ذکر است که نتایج در مورد گلیر3 نیز قابل استناد است. با توجه به شکل‌های 11 تا 14 به ازای سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه و زاویه برخورد صفر درجه، کامپوزیت دچار برآمدگی محسوس متقارن در اطراف سوراخ نفوذ می‌شود. این برآمدگی با آنکه در اثر سرعت برخورد 625 متر بر ثانیه نیز به وجود می‌آید، اما در مقایسه با برآمدگی ناشی از سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است. برآمدگی ناشی از سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه باعث افزایش فاصله جدایش لایه‌ها و کاهش عمق پتالینگ می‌شود. با افزایش زاویه برخورد، این برآمدگی نامتقارن شده و در ناحیه روبروی گلوله، مرتفع‌تر می‌شود و در سمت مخالف گلوله ارتفاع آن کمتر می‌شود که این امر موجب افزایش فاصله جدایش بین لایه‌ها در سمت مقابل گلوله و کاهش فاصله جدایش لایه‌ها در سمت مخالف گلوله می‌گردد. علاوه بر این، موضوع برآمدگی باعث ایجاد اختلاف عمق پتالینگ بین حالت 625 متر بر ثانیه و 1250 متر بر ثانیه می‌شود.

در بررسی لایه‌لایه‌شدگی، رفتار موج تنش حاصل از برخورد گلوله به هدف و همچنین بار اعمالی، اهمیت ویژه‌ای دارند. زاویه برخورد صفر درجه منجر به پتالینگ متقارن (طبق شکل 11) می‌شود. علاوه بر این همان‌طور که از شکل 11 مشاهده می‌شود، لایه‌لایه‌شدگی بین لایه پنجم و ششم، ناحیه وسیع‌تری را نسبت به لایه‌لایه‌شدگی بین لایه‌های دیگر شامل می‌شود. علت

این امر رفتار انتهای آزاد موج تنش است که باعث افزایش دو برابری سرعت موج در لایه ششم و جدایش آن از لایه پنجم که سرعت موج در آن کمتر است، می‌شود. علاوه بر این از آنجایی که سرعت موج در آلومینیوم و الیاف شیشه تقریبا یکسان است، سطح جدا شده بین لایه‌ی آلومینیوم-الیاف تقریبا با سطح جدا شده بین الیاف-الیاف یکسان است. با این حال به دلیل بیشتر بودن اندک سرعت موج تنش در آلومینیوم نسبت به الیاف شیشه، سطح جدا شده آلومینیوم-الیاف کمی بیشتر از سطح جدا شده‌ی الیاف-الیاف است.

با مقایسه شکل 11 با شکل‌های 12 تا 14، به خوبی نقش بار اعمالی در پدیده لایه‌لایه‌شدگی قابل مشاهده است. به این دلیل که در حالات برخورد مایل به دلیل افزایش فشار روی لایه‌های بالایی که منجر به برآمدگی لایه اول شده است، سطح جدا شده بین لایه‌ها در تمام سطوح بین لایه‌ها، به یکدیگر بسیار نزدیک شده است. البته لایه‌لایه‌شدگی به خاطر مایل بودن برخورد، به صورت نامتقارن است. پتالینگ نیز به طور نامتقارن صورت می‌گیرد و عمق پتالینگ در سمت مخالف گلوله بیشتر از عمق پتالینگ روبروی گلوله است. به ازای زاویه 60 درجه نیز ادامه روند کم شدن اختلاف اندازه‌ی سطوح جدا شده‌ی بین لایه‌های مختلف در ناحیه مقابل گلوله قابل مشاهده است. در مقابل به دلیل غلبه‌ی چشم‌گیر رفتار موج تنش در ناحیه پشت گلوله، اندازه سطح جدایش لایه‌ی پنجم و ششم بیشتر از باقی سطوح است و علاوه بر این به دلیل کم شدن میزان بار اعمالی و وسیع‌تر شدن ناحیه اعمال آن، سطوح جدا شده در پشت گلوله نسبت به سطوح جدا شده در جلوی گلوله، دارای وسعت بیشتری هستند. عمق پتالینگ نیز در پشت گلوله بیشتر از عمق پتالینگ در جلوی گلوله است و همچنین عمق پتالینگ پشت گلوله نسبت به حالت 45 درجه کمتر شده است که به دلیل کاهش بیش از حد تکانه‌ی گلوله در جهت ضخامت هدف می‌باشد. این کاهش عمق، باعث کاهش طول پارگی-های ناشی از پتالینگ می شود.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به کمک شبیه‌سازی المان محدود پدیده نفوذ مایل پرتابه ضدزره کالیبر 25 میلی‌متر در نرم‌افزار آباکوس به بررسی ابعاد ناحیه آسیب-دیده هدف گلیر3 2/1 و گلیر5 2/1 بر اثر نفوذ پرداخته شد. سرعت‌های برخورد 625 و 1250 متر بر ثانیه و زوایای برخورد صفر، 30، 45 و 60 درجه مورد بررسی قرار گرفت. روش حل به کمک رابطه تجربی صحت‌سنجی شده و اختلاف مقادیر افت انرژی جنبشی گلوله بین شبیه‌سازی و رابطه 3.58 درصد محاسبه گردید. همچنین مشاهده گردید که افت انرژی جنبشی گلوله به ازای مقادیر متناظر زاویه برخورد و جنس یکسان، برای سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه بین 40.5 تا 71.44 درصد (در حالات مختلف) بیشتر از سرعت برخورد 625 متر بر ثانیه است. بعلاوه با افزایش زاویه برخورد به ازای جنس یکسان و سرعت یکسان، افت انرژی جنبشی گلوله بین 10.54 تا 108 درصد (در حالات مختلف) افزایش می‌یابد. همچنین گلیر5 از گلیر3 توانایی بیشتری در جذب انرژی جنبشی گلوله به ازای شرایط یکسان دارد (بین 19.83 تا 26.31 درصد در حالات مختلف، جذب انرژی بیشتر دارد). با افزایش زاویه برخورد همواره طول آسیب‌دیدگی افقی به ازای شرایط مشابه جنس هدف یکسان و سرعت برخورد یکسان بین 10 تا 80 درصد (در حالات مختلف) بیشتر می‌شود، اما با وجود آمدن ریزترک‌ها در راستای عمودی در زاویه برخورد 60 درجه، طول آسیب‌دیدگی عمودی بعد از زاویه 45 درجه یا کاهش می‌یابد و یا ثابت می‌ماند. همچنین مشاهده گردید که به ازای سرعت 625 متر بر ثانیه، ابعاد آسیب‌دیدگی نسبت به حالات متناظر برای سرعت 1250 متر بر ثانیه بین 1 تا 60 درصد (در حالات مختلف) بیشتر می‌شود. از آنجا که به طور مستقیم نمی‌توان با نفوذ این نوع پرتابه‌ها مقابله کرد، می‌توان با بررسی ابعاد آسیب‌دیدگی اندازه‌گیری شده در این مطالعه و با استفاده از روابط مکانیک شکست و اعمال برخی اصلاحات در هدف، سطح آسیب-دیدگی‌ها -خصوصاً در راستای افقی- را کاهش داد. همچنین می‌توان با مطالعه روی هندسه هدف راهی برای کمانه‌کردن پرتابه بعد از برخورد و یا کاهش آسیب‌دیدگی افقی یافت.

6- فهرست علایم

d	کالیبر پرتابه (m)
D	میزان آسیب‌دیدگی
E_P	انرژی نفوذ (J)
K	سفتی پنالتی (Nm^{-3})
$\tilde{K}$	سفتی پنالتی اولیه (Nm^{-3})
T	ضخامت هدف (m)
V_i	سرعت برخورد
X	استحکام طولی (MPa)
Y	استحکام عرضی (MPa)
τ	تنش برشی (MPa)
σ	تنش (Mpa)
δ	جدایش (m)
Γ	ضریب شکل نوک پرتابه
ρ_t	چگالی هدف (kgm^{-3})
زیرنویس‌ها	
1,2,3	راستای الیاف
t	کششی
c	فشاری
I, II, III	مودهای مکانیک شکست

7- مراجع

[1] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, O. Çoban, A review: Fiber metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 3671–3685, 2011.

[2] E. C. Botelhoa, R. A. Silvac, L. C. Pardinia, M. C. Rezendea, A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/epoxy/aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures, *Materials Research*, Vol. 9, No. 3, pp. 247-256, 2006.

[3] F. D. Morinière, R. C. Alderliesten, R. Benedictus, Modelling of impact damage and dynamics in fiber-metal laminates – review, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 67, No. 1, pp. 27-38, 2014.

[4] H. Sabouri, H. Ahmadi, G.H. Liaghat, Ballistic Impact Perforation into GLARE Targets: Experiment, Numerical Modelling and Investigation of Aluminum Stacking Sequence, *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 178-18, 2011.

[5] M. Sadighi, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, Impact resistance of fiber-metal laminates: A review, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 77-90, 2012.

[6] H. Ahmadi, G.H. Liaghat, H. Sabouri, E. Bidkhouri, Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber metal laminates, *Journal of Composite Material*, Vol. 47, No. 13, pp. 1605-1615, 2012.

[7] F.D. Morinière, R.C. Alderliesten, M. Sadighi, R. Benedictus, An integrated study on the low-velocity impact response of the GLARE fiber-metal laminate, *Composite Structures*, Vol. 100, No. 1, pp. 89-103, 2013.

[8] M. Ghalami, M. Sadighi, Investigation of high velocity impact of cylindrical projectile on sandwich panels with fiber–metal laminates skins and polyurethane core, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 142-152, 2014.
[9] A. Masoudi, G.H. Liaghat, M.H. Pol, Effects of nanoclay on the ballistic behavior of GLARE - Experimental and numerical investigation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 41-53, 2014 (In Persian فارسی).
[10] Headquarters Department of the Army, *Army Ammunition Data Sheets*, Technical Manual TM 43-0001-27, Washington D.C., April, 1994.
[11] Y. Huang, J. Liu, X. Huang, J. Zhang, G. Yue, Delamination and fatigue crack growth behavior in Fiber Metal Laminates (Glare) under single overloads, *International Journal of Fatigue*, Vol. 78, No. 1, pp. 53–60, 2015.
[12] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus*, pp. 512-581, Boca Raton, CRC Press, 2013.
[13] S. R. Reid, H. M Wen, *Impact Behavior of Fiber-Reinforced Composite Materials and Structures*, pp. 237-256, Cambridge, Wood-Head Publishing, 2000.