



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

پویا پیرعلی<sup>1\*</sup>، مهرداد قدمی<sup>2</sup>، رضا بابایی<sup>2</sup>

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

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

\* تهران، صندوق پستی 15875-1774، 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

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 استاندارد 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 گلیر 3/2/1 یعنی گلیر 3 بیانگر خانواده‌ای از گلیرها می‌باشد که جنس آلومینیوم آنها، آلومینیوم

گلیر<sup>1</sup> به دسته خاصی از ورق‌های الیاف-فلز<sup>2</sup> 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

<sup>1</sup> GLARE

<sup>2</sup> Fiber-Metal Laminate - FML

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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، راه‌حلی برای کاهش آسیب‌ها، خصوصاً آسیب‌های خطرناک منجر به فروپاشی ارائه گردد. این مطالعه می‌تواند از دیدگاه مکانیک شکست، به بررسی ابعاد آسیب‌های مختلف هدف یا پرتابه بردازد 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].

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\geq X_t \\ |\sigma_1| &\geq X_c \\ \sigma_2 &\geq Y_t \quad \sigma_3 \geq Y_t \\ |\sigma_2| &\geq Y_c \quad |\sigma_3| \geq Y_c \\ |\tau| &\geq S \end{aligned} \quad (1)$$

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<sup>4</sup> در کامپوزیت‌ها، نیاز به تعریف خواص مکانیکی ماده چسبنده است. روابط مربوط به چسب‌ها دقیقاً از روابط مکانیک شکست نشأت می‌گیرند؛ چرا که ایجاد و گسترش لایه‌لایه‌شدگی 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

2024-تی<sup>1</sup> و الیاف شیشه آنها از جنس اس-2-گلاس<sup>2</sup> است. لایه الیاف شیشه آن از دو زیرلایه و به صورت 0/90 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 افزایش 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 شبیه‌سازی 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 پرتابه-های 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-3791 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

<sup>1</sup> Aluminum 2024-T3

<sup>2</sup> S2-Glass

<sup>3</sup> M-791

<sup>4</sup> Delamination

### 3- مدل سازی مسئله

#### 3-1- مدل سازی هدف

مدل سازی المان محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس<sup>2</sup> و به صورت اکسپلیسیت داینامیک<sup>3</sup> صورت گرفته است. در این مدل سازی، تک تک لایه های هدف به طور جداگانه به صورت المان های سالید<sup>4</sup> و سی 3دی<sup>5</sup> آر 8 و ابعاد 20×20 سانتی متر ایجاد گردیده اند. به کمک تعریف اینتراکشن<sup>6</sup> چسب بین لایه ها، امکان مدل سازی پدیده لایه لایه شدن<sup>6</sup> نیز فراهم آمده است. اهداف مورد مطالعه، گلیر 3 و گلیر 5 هستند و جنس لایه های مختلف هدف، آلومینیوم 2024-تی 3 و الیاف اس 2-گلاس می باشد. در مطالعات صورت گرفته، رفتار آلومینیوم 2024-تی 3 به صورت یک ماده ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است و خواص مکانیکی آن در جدول 1 ارائه گردیده است [11]. الیاف اس 2-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 نگاه داشتن الیاف در کنار هم، باعث چسبیدن لایه الیاف به لایه آلومینیوم می شود و خواص آن نیز در جدول 3 ارائه شده است [12].

#### 3-2- مدل سازی پرتابه

پرتابه ام 791 دارای هسته تنگستنی و روکش پلی اتیلن می باشد. 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 می شود، در جدول 5 ارائه گردیده است [10].

جدول 1 خواص مکانیکی آلومینیوم 2024-تی 3 [11]

Table 1 Mechanical Properties of Aluminum 2024-T3 [11]	
مقدار	خواص مکانیکی
2780	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
73.1	مدول الاستیسیته (GPa)
0.33	ضریب پواسون
18	درصد تغییر طول (%)
345	استحکام تسلیم (MPa)
483	استحکام نهایی (MPa)

جدول 2 خواص مکانیکی الیاف اس 2-گلاس [11]

Table 2 Mechanical Properties of S2-Glass [11]			
مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
0.34	ضریب پواسون 23	36	مدول یانگ اول E <sub>1</sub> (GPa)
0.25	ضریب پواسون 13	5	مدول یانگ دوم E <sub>2</sub> (GPa)
465	استحکام کششی طولی X <sub>t</sub> (MPa)	5	مدول یانگ سوم E <sub>3</sub> (GPa)
5.6	استحکام کششی عرضی Y <sub>t</sub> (MPa)	2.7	مدول برشی 12 G <sub>12</sub> (GPa)
5.6	استحکام فشاری عرضی Y <sub>c</sub> (MPa)	2.7	مدول برشی 13 G <sub>12</sub> (GPa)
19.2	استحکام برشی S(MPa)	1.92	مدول برشی 23 G <sub>12</sub> (GPa)
1540	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	0.25	ضریب پواسون 12

<sup>2</sup> Abaqus

<sup>3</sup> Explicit Dynamic

<sup>4</sup> Solid

<sup>5</sup> C3D8R

<sup>6</sup> Interaction

کامپوزیت ها، از آنجایی که ضخامتی برای چسب بین لایه ها در نظر گرفته نمی شود از رابطه کشش-جدایش<sup>1</sup> به جای تنش-کرنش استفاده می گردد. رابطه (2) نشان دهنده رابطه کشش-جدایش است [12].

$$\sigma_i = K_i \delta_i, i = I, II, III \quad (2)$$

در رابطه (2)، K<sub>i</sub> سفتی پنالتی نامیده می شود و ضریبی است که کشش را به جدایش در هر جهت مرتبط می کند و واحد آن نیوتون بر مترمکعب است. در روابط مکانیک شکست، سه مود گسترش ترک به صورت بازشدگی، برشی و پارگی وجود دارد. اندیس های موجود در رابطه 2 بیانگر هر کدام از این مودها است. برای هر یک از مودهای گسترش ترک، یک استحکام چسب نیز تعریف می شود که با رسیدن میزان بارگذاری به این مقادیر، جدایش آغاز می گردد. همان طور که قبلا گفته شد، تا قبل از آغاز جدایش، چسب رفتار الاستیک خطی دارد اما بعد از آن رفتار الاستیک آسیب دیده دارد که بر اساس آن مقادیر سفتی پنالتی مورد استفاده در رابطه (2) براساس رابطه (3) تعریف می شود [12].

$$K_i = (1 - D_i) \bar{K}_i \quad (3)$$

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 می گردد [12].

#### 4-2- انرژی نفوذ برای ورق های نازک گلیر و سرعت بالای برخورد پرتابه

انرژی نفوذ برای ورق های بسیار نازک گلیر که توسط پرتابه با سرعت های بسیار بالا و بدون زاویه برخورد و زاویه حمله مورد برخورد و نفوذ قرار می گیرند، به کمک رابطه (4) پیش بینی شده است [13].

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

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

رابطه (4)، یک رابطه تجربی است که با استفاده از انجام تست های تجربی متعدد ضربه بالستیک قائم (توسط گلوله هایی با هندسه های مختلف) روی هدف مسطح از جنس گلیر 3 با چیدمان 2/1 (که بسیار نازک است) بدست آمده و تنها می تواند افت انرژی جنبشی گلوله حاصل از نفوذ را برای اهداف نازک گلیر و سرعت های بسیار زیاد گلوله و زاویه برخورد صفر (برخورد قائم یا غیرمایل) به کمک ویژگی های هندسی و مکانیکی کامپوزیت (شامل ضخامت T و چگالی ρ<sub>t</sub>)، خواص مکانیکی آلباز 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<sub>i</sub>) پیش بینی 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 می شود. علاوه بر ضریب مرتبط با هندسه سر پرتابه و مقادیر گزارش شده برای آن، نشان دهنده آن است که هر چه نوک گلوله به سمت نوک تیزتر شدن پیش رود، انرژی جذب شده توسط گلیر کمتر می گردد [13].

<sup>1</sup> Traction-Separation

کمک رابطه 4، مقدار افت انرژی بر اثر نفوذ برای گلیر 3 و 2/1 و پرتابه 25 میلی متری مسئله، 220.3 ژول محاسبه گردید. به منظور بررسی حساسیت به مش نیز، ابتدا تعداد المان‌های هدف 9500 در نظر 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.

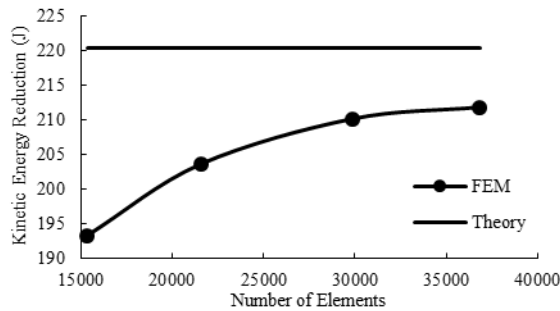


Fig. 2 Mesh Sensitivity of Projectile

شکل 2 حساسیت به مش پرتابه

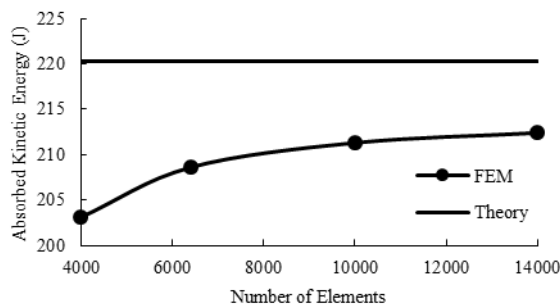


Fig. 3 Mesh Sensitivity of Target

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 گلیر 3 و 2/1 و گلیر 5 و 2، 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

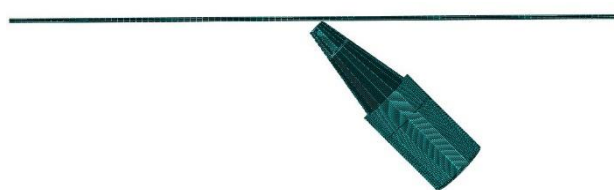


Fig. 4 Final finite element model

شکل 4 مدل نهایی المان محدود

جدول 3 خواص چسباندگی اپوکسی [12]

Table 3 Cohesive Properties of Epoxy [12]

مقدار	خواص چسباندگی	مقدار	خواص چسباندگی
$570 \times 10^{22}$	سفتی پنالتی مود دوم $K_{II}(N/m^3)$	$570 \times 10^{22}$	سفتی پنالتی مود اول $K_I(N/m^3)$
57	استحکام مود اول چسب (MPa)	$570 \times 10^{22}$	سفتی پنالتی مود سوم $K_{III}(N/m^3)$
57	استحکام مود سوم چسب (MPa)	57	استحکام مود دوم چسب (MPa)
280	انرژی شکست مود دوم (J/m <sup>2</sup> )	280	انرژی شکست مود اول (J/m <sup>2</sup> )
		280	انرژی شکست مود سوم (J/m <sup>2</sup> )

جدول 4 خواص مکانیکی تنگستن [10]

Table 4 Mechanical Properties of Tungsten [10]

مقدار	خواص مکانیکی
17500	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
324	مدول الاستیسیته (GPa)
0.28	ضریب پواسون
517	استحکام تسلیم (MPa)
758	استحکام نهایی (MPa)
2	درصد تغییر طول

جدول 5 خواص مکانیکی پلی اتیلن [10]

Table 5 Mechanical Properties of Polyethylene [10]

مقدار	خواص مکانیکی
950	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
1.37	مدول الاستیسیته (GPa)
0.4	ضریب پواسون
31.7	استحکام تسلیم (MPa)

در شبیه‌سازی المان محدود به منظور اهمیت بررسی تغییر شکل پرتابه، هم هسته و هم روکش آن غیر صلب لحاظ شده و از المان سالیید سی3دی8 آر 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 می‌دهد [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

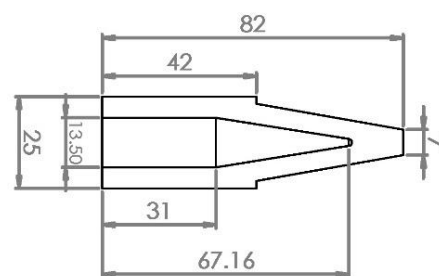
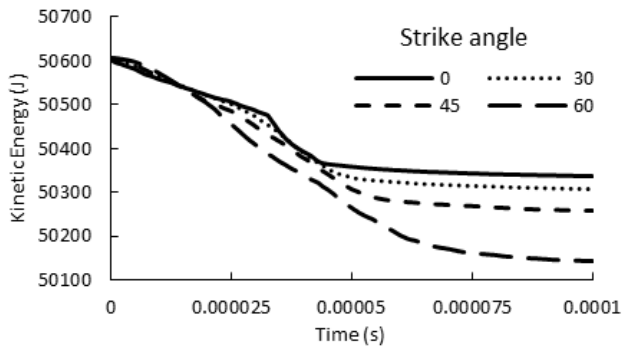


Fig. 1 Projectile Dimensions (in mm) [10]

شکل 1 ابعاد پرتابه (میلی متر) [10]



**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 گلیر 5/2 با سرعت برخورد 1250 متر بر ثانیه

با توجه به شکل‌های 5 تا 8 تمامی 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 نشان‌دهنده‌ی 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 شکل‌های 5 تا 8 برای هر دو کامپوزیت گلیر مورد مقایسه قرار گرفته است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل استحکام بالاتر گلیر 5، مقادیر متناظر افت انرژی آن در مقایسه با گلیر 3، بیشتر است و به ازای افزایش زاویه برخورد، اختلاف افت انرژی در دو کامپوزیت به دلیل افزایش تأثیرگذاری الیاف شیشه، بیشتر می‌شود. 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 می‌یابد 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

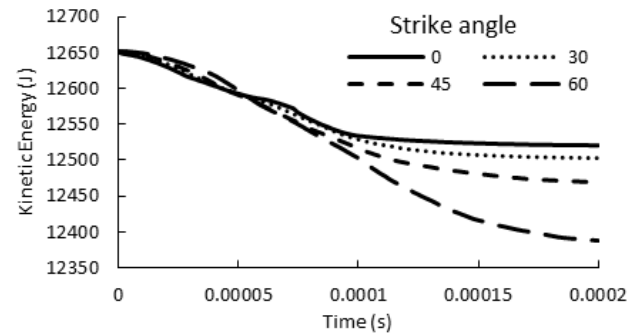
جدول 6 افت انرژی جنبشی (ژول)

حالت	صفر درجه	30 درجه	45 درجه	60 درجه
گلیر 3 625	130.6	147.9	182	263.5
گلیر 3 1250	212.4	236.6	279.2	370.2
گلیر 5 625	156.5	185.8	242.6	325.6
گلیر 5 1250	268.3	296.6	348.1	461

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.

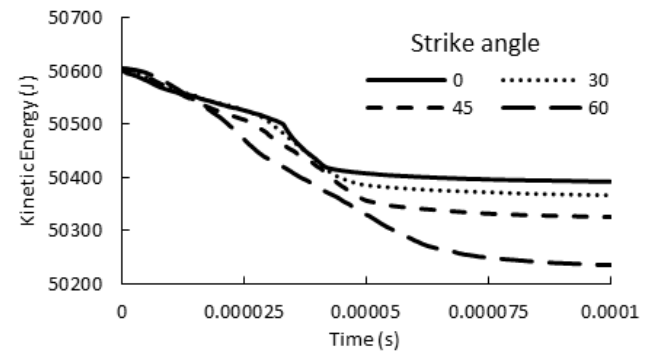
#### 4- نتایج

در شکل‌های 5 تا 8 تاریخچه‌های انرژی جنبشی پرتابه به ازای زوایای برخورد مختلف به ترتیب برای گلیر 3/2 با سرعت 625 و 1250 متر بر ثانیه و گلیر 5/2 با سرعت برخورد 625 و 1250 متر بر ثانیه مقایسه شده است.



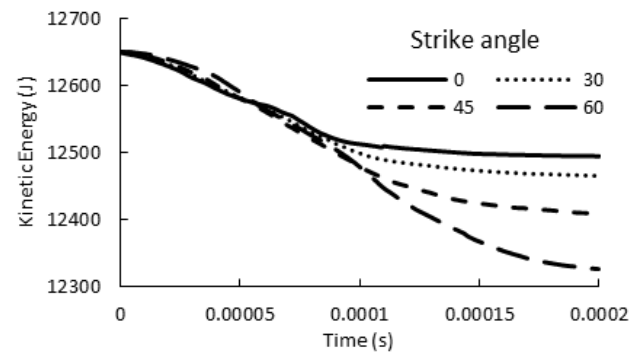
**Fig. 5** Kinetic energy history of projectile impacted to GLARE3 2/1 with strike velocity of 625 m/s

شکل 5 تاریخچه انرژی جنبشی پرتابه برخورد کرده با گلیر 3/2 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 گلیر 3/2 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 گلیر 5/2 با سرعت برخورد 625 متر بر ثانیه

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 - شود 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 طولانی‌تر 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.

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 افقی	0 عمود	30 افقی	30 عمود	45 افقی	45 عمود	60 افقی	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 افقی	0 عمود	30 افقی	30 عمود	45 افقی	45 عمود	60 افقی	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

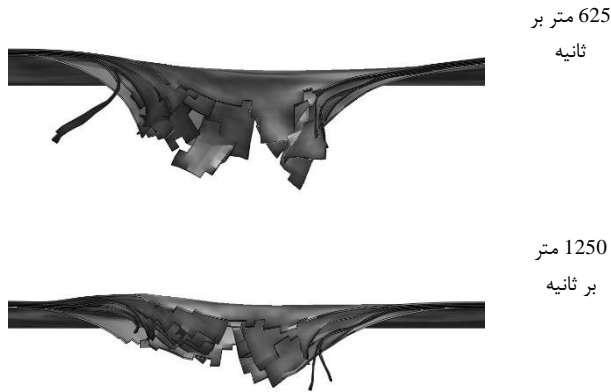


Fig. 13 Delamination of GLARE5- strike angle of 45 degree

شکل 13 لایه‌لایه‌شدگی گلیر 5 - زاویه برخورد 45 درجه

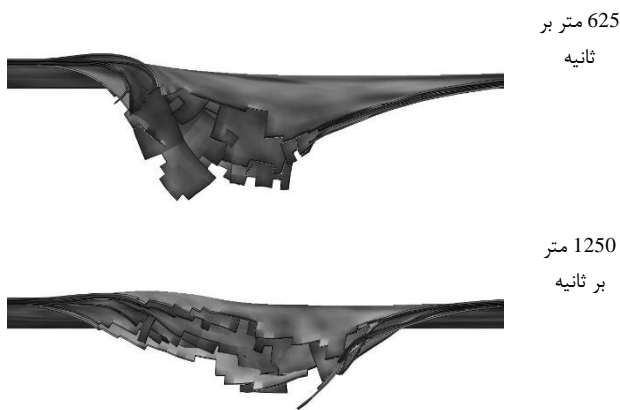


Fig. 14 Delamination of GLARE5- strike angle of 60 degree

شکل 14 لایه‌لایه‌شدگی گلیر 5 - زاویه برخورد 60 درجه

از آنجایی که نتایج لایه‌لایه‌شدگی در گلیر 3 مشابه گلیر 5 می‌باشد، تنها به بررسی لایه‌لایه‌شدگی گلیر 5 پرداخته شده و لازم به ذکر است که نتایج در مورد گلیر 3 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 چشم‌پوشی 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

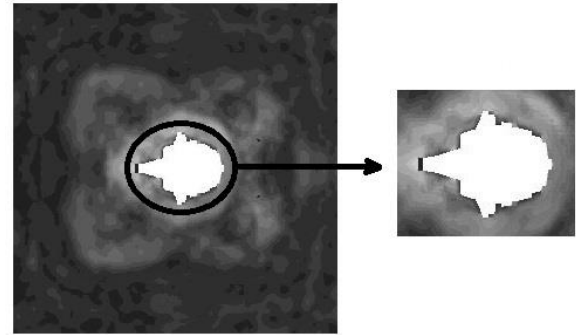


Fig. 9 Asymmetric petaling

شکل 9 نمونه‌ای از پتالینگ نامتقارن

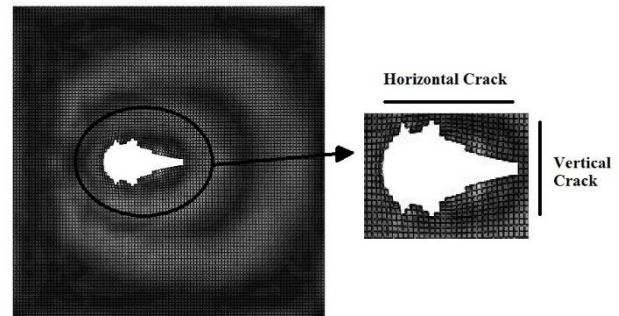


Fig. 10 Formation of vertical small-cracks

شکل 10 نمونه‌ای از تشکیل ریزترک‌های عمودی

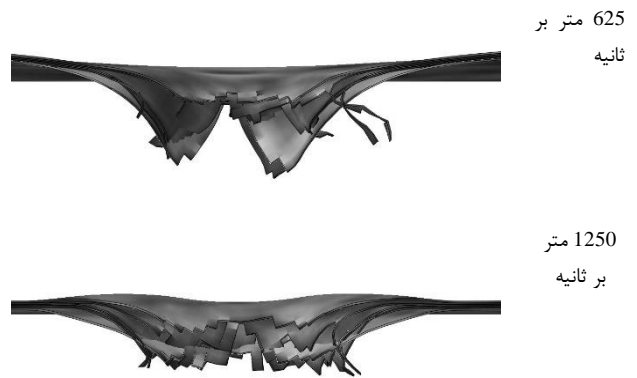


Fig. 11 Delamination of GLARE5- strike angle of zero degree

شکل 11 لایه‌لایه‌شدگی گلیر 5 - زاویه برخورد صفر درجه

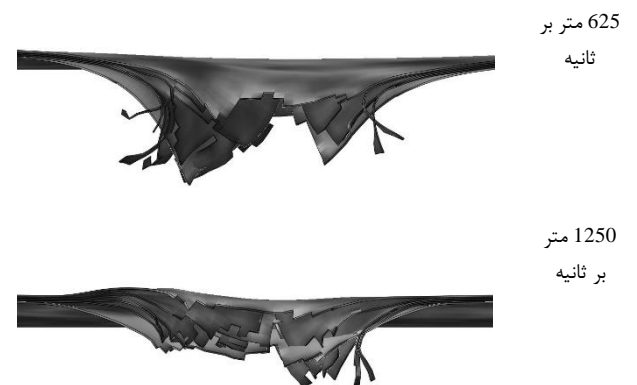


Fig. 12 Delamination of GLARE5- strike angle of 30 degree

شکل 12 لایه‌لایه‌شدگی گلیر 5 - زاویه برخورد 30 درجه

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 علائم

$d$	کالیبر پرتابه (m)
$D$	میزان آسیب‌دیدگی
$E_p$	انرژی نفوذ (J)
$K$	سفتی پنالتی ( $Nm^{-3}$ )
$\bar{K}$	سفتی پنالتی اولیه ( $Nm^{-3}$ )
$T$	ضخامت هدف (m)
$V_i$	سرعت برخورد
$X$	استحکام طولی (MPa)
$Y$	استحکام عرضی (MPa)
$\tau$	تنش برشی (MPa)
$\sigma$	تنش (Mpa)
$\delta$	جدایش (m)
$\Gamma$	ضریب شکل نوک پرتابه
$\rho_t$	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. Botelho, R. A. Silvac, L. C. Pardinia, M. C. Rezende, 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. Bidkhour, 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.

این امر رفتار انتهایی 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 تقریباً یکسان است، سطح جدا شده بین لایه‌ی آلومینیوم-الیاف تقریباً 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 شده 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 شده 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 می‌شود.

#### 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 گلیر 3/2/1 و گلیر 5/2/1 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. علاوه 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 گلیر 5 از گلیر 3 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



- 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.
- [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,