

## بررسی عددی اثر هندسه هدف در آسیب ایجاد شده در کامپوزیت گلیر در اثر برخورد مایل گلوله ضد زره کالیبر متوسط

پویا پیرعلی<sup>\*</sup>، مهرداد قدمی

پژوهشکده مکانیک و فناوری‌های ساخت، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۹ دی ۱۳۹۵  
بازنگری: ۲۴ اسفند ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

هندسه منحنی  
نفوذ مایل  
گلیر  
پرتابه کالیبر متوسط  
گلوله ضد زره

**چکیده:** پرتابه‌های کالیبر متوسط ضد زره، انرژی جنبشی زیادی دارند و عملاً امکان جلوگیری از نفوذ این پرتابه‌ها در اهداف مختلف به طور مستقیم وجود ندارد؛ بنابراین لازم است با مطالعه اهداف، راهی برای مقابله با این پرتابه‌ها ارائه گردد. یکی از کاربردهای پرتابه‌های کالیبر متوسط، علیه اهداف هوایی می‌باشد که عموماً از ورق‌های الیاف-فلز گلیر ساخته می‌شوند. در این مطالعه پدیده نفوذ مایل پرتابه کالیبر متوسط ضد زره در اهداف با هندسه مسطح، منحنی یا شعاع انحنای ۲۰ سانتی‌متر و انحنای ۶/۳ سانتی‌متر از جنس گلیر ۵ با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و آسیب‌دیدگی ایجاد شده بررسی شده است. شبیه‌سازی رفتار شکست کامپوزیت، براساس مدل کامپوزیت تک جهت سه بعدی بوده و برای این منظور، سابروتین وی‌یومت، نوشته شده و در نرم‌افزار آباکوس به کار رفته است. همچنین بدلیل پرنرژری بودن گلوله و آسیب‌های شدید آن، برخلاف مطالعات سابق، گلوله غیرصلب در نظر گرفته شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج، از یک رابطه تجربی استفاده شده و پس از صحت‌سنجی روش حل، برخورد گلوله به اهداف با هندسه‌های مختلف شبیه‌سازی شده و اثر انحنای هدف روی پدیده نفوذ در کامپوزیت گلیر بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که همواره افزایش انحنای هدف، نتیجه یکنواختی در کاهش یا افزایش آسیب‌دیدگی آن ندارد.

### ۱- مقدمه

گلیر<sup>۱</sup> به دسته خاصی از ورق‌های الیاف-فلز<sup>۲</sup> اطلاق می‌شود که فلز آن از جنس آلومینیوم و الیاف آن از جنس شیشه است و رزین آن که الیاف شیشه را در کنار هم نگه می‌دارد و آن‌ها را به ورق آلومینیوم می‌چسباند، 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 استاندارد است 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 ۳/۱ یعنی گلیر ۳ بیانگر خانواده‌ای از گلیرها می‌باشد که جنس آلومینیوم

آن‌ها، آلومینیوم ۲۰۲۴-تی<sup>۳</sup> و الیاف شیشه آن‌ها از جنس اس ۲-گلاس<sup>۴</sup> است و لایه الیاف شیشه آن از دو زیرلایه و به صورت ۰/۹۰ تشکیل شده است و بخش دوم یعنی ۳/۱، نشان‌دهنده یک عضو خاص از خانواده گلیر ۳ است که فقط از دو لایه آلومینیوم و یک لایه الیاف شیشه (که شامل دو زیر لایه به صورت ۰/۹۰ است) تشکیل شده و در مجموع یک کامپوزیت ۴ لایه را تشکیل داده است [۱].

از بین خانواده‌های گلیر، دو خانواده گلیر ۳ و گلیر ۵، 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 گلیر ۳ و گلیر ۵ مشابه است؛ اما گلیر ۵ شامل ۴ زیرلایه الیاف شیشه به صورت ۰/۹۰/۹۰/۰ می‌باشد. ضخامت لایه‌های الیاف و آلومینیوم در هر دو گلیر نیز، به ترتیب ۰/۲۶۶ و ۰/۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [۲].

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 افزایشدهنده صنایع هوایی برای

1 Glare

2 Fiber-Metal Laminate (FML)

3 Aluminum 2024-T3

4 S2 glass

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ppirali@mut.ac.ir

نظیر گلیر به عنوان تأخیرانداز مقید ترک به منظور بهبود عملکرد خستگی سازه‌های هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرند. نیک‌نژاد و زارعی [۱۶] نیز به مطالعه سرعت حد بالستیک یک ستون توخالی مستطیلی تحت نفوذ گلوله بالنت<sup>۴</sup> به صورت عددی و تئوری پرداختند. با توجه به بررسی تاریخی 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 ضد زره در گلیر صورت نگرفته است؛ حال آن‌که بزرگترین تهدید برای هواپیماهای مدرن که بخش اعظمی از بدنه آن‌ها از جنس ورق‌های الیاف-فلز است، برخورد این نوع پرتابه‌ها می‌باشد. پرتابه‌ای که در این مطالعه انتخاب گردیده است، پرتابه ام-۷۹۱<sup>۵</sup> با کالیبر ۲۵ میلی‌متر است. جنس هسته آن تنگستن و جنس روکش آن از پلی اتیلن است و سرعت آن در دهانه سلاح ۱۳۴۵ متر بر ثانیه می‌باشد. برد مؤثر آن ۲۰۰۰ متر بوده و سرعت آن در این برد، ۱۲۵۰ متر بر ثانیه می‌باشد [۱۷]. با توجه به جرم حدود ۶۵ گرمی این پرتابه، انرژی جنبشی آن در لحظه برخورد در فاصله ۲۰۰۰ متری از محل پرتاب، حدود ۵۱۰۰۰ ژول خواهد بود که مقدار بسیار بزرگی است (نیروی میانگین حاصل از آن در مدت زمان برخورد حدود ۸۰۰۰۰ نیوتون است که معادل وزن استاتیک یک بار ۸۰ تنی می‌باشد). 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 پردازد و همچنین می‌تواند از دیدگاه دفاعی راه‌حلی برای کمانه کردن پرتابه، پس از برخورد با هدف ارائه دهد. در این مطالعه، با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی اثر هندسه هدف (به عنوان راهکاری برای کاهش آسیب‌دیدگی) بر روی آسیب‌دیدگی‌های ورق گلیر ۵ ناشی از برخورد مایل پرتابه کالیبر متوسط ضد زره پرداخته شده است.

## ۲- الگوسازی مسأله

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

### ۲-۱- مدل‌های مادی

#### ۲-۱-۱- ماده ایزوتروپیک

به ماده‌ای اطلاق می‌شود که در همه جهات دارای خواص مکانیکی یکسانی است و برای تعریف رفتار این نوع مواد در ناحیه الاستیک، تنها

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 کم سرعت، کشش و...) و اثرات این پارامترها بر یکدیگر صورت گرفته است [۳]. در سال‌های اخیر، صبوری و همکاران [۴]، 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. همچنین صدیقی و همکاران [۵]، مروری بر مقاومت ضربه ورق‌های الیاف-فلز ارائه داده‌اند و در آن، نتایج مرتبط با ضربه این ورق‌ها را مورد بحث قرار داده و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه کرده‌اند. احمدی و همکاران [۶] نیز، خواص ضربه پرسرعت گلیر را از طریق بررسی اهداف با نسبت ضخامت‌های مختلف و مکانیزم آسیب مورد مطالعه قرار داده‌اند. به علاوه مورینیر و همکاران [۷] پاسخ به ضربه کم‌سرعت گلیر را نیز به کمک یک روش شبه استاتیک مطالعه کرده‌اند. ضربه پرسرعت پرتابه استوانه‌ای به پل ساندویچی هم از دو روش عددی و تجربی توسط قلمی و صدیقی [۸] بررسی گردیده است. سیتیکو و همکاران [۹] روی مدل‌سازی شکست نفوذ در ورق‌های الیاف-فلز تحت اثر بارگذاری انفجاری با ایمپالس بالا<sup>۱</sup> مطالعه کردند. در این مطالعه، شکست بر اثر نفوذ پل‌های الیاف-فلز تحت اثر بارگذاری انفجاری محلی با شدت بالا مورد مطالعه قرار گرفته است. مسعودی و همکاران [۱۰] نیز تأثیر نانورس بر روی خواص بالستیکی کامپوزیت الیاف-فلز گلیر را با بررسی تجربی و عددی آن مطالعه نموده‌اند. بوی چای و مانیکاندان [۱۱] هم یک مرور در مورد پاسخ به ضربه کم‌سرعت ورق‌های الیاف-فلز ارائه دادند. آن‌ها تلاش کردند تا مروری جامع پیرامون تحقیقات گذشته و حال روی پاسخ دینامیک ورق‌های الیاف-فلز تحت ضربه کم‌سرعت ارائه دهند. همچنین جایپراکاش و همکاران [۱۲] اثر ضخامت ورق فلز در گلیر را مطالعه کردند. در این مطالعه مقاومت ورق‌های الیاف-فلز به صورت تجربی روی سه ورق الیاف-فلز مختلف که از ورق‌های آلومینیوم با ضخامت اسمی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ میلی‌متر ساخته شده بوده‌اند، مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. کی و همکاران [۱۳] نیز به بررسی تجربی عملکرد ضربه‌ی ورق‌های گلیر پرداختند. در این مطالعه، بررسی تجربی روی مقاومت آسیب نسبت به نیروی متمرکز شبه استاتیک فشاری و ضربه کم‌سرعت روی ۴ نوع گلیر صورت گرفته است. به علاوه ژو و همکاران [۱۴] روی اثر نرخ کرنش روی مقاومت در برابر نفوذ ورق‌های الیاف-فلز مطالعه کردند. در این مطالعه، حساسیت به نرخ کرنش گروهی از الیاف-فلزها از طریق آزمایش‌های بار اسپلیت هاپکینسون<sup>۲</sup>، نفوذ شبه استاتیک و ضربه کم‌سرعت مورد بررسی قرار گرفته است. سید و همکاران [۱۵] نیز روی اثر آسیب ضربه روی عملکرد خستگی سازه‌های تقویت شده با تأخیراندازهای مقید ترک گلیر<sup>۳</sup> مطالعه کردند. طبق گزارش این مطالعه، الیاف-فلزهایی

- 1 High impulse
- 2 Split Hopkinson Bar
- 3 Glare bonded crack retarder

4 Blunt  
5 M-791

کامپوزیت‌ها، از آنجایی که ضخامتی برای چسب بین لایه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود از رابطه کشش-جدایش به جای تنش-کرنش استفاده می‌گردد. رابطه (۲) نشان‌دهنده رابطه کشش-جدایش<sup>۵</sup> است [۱۹].

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

در رابطه (۲)، ضریب  $K_i$  سفتی پنالتی<sup>۶</sup> نامیده می‌شود و ضریبی است که کشش  $\sigma_i$  (برحسب پاسکال) را به جدایش  $\delta_i$  (برحسب متر) در هرجهت مرتبط کرده و واحد آن نیوتون بر مترمکعب می‌باشد. در روابط مکانیک شکست، سه مود گسترش ترک به صورت بازشدگی، برشی و پارگی وجود دارد. اندیس‌های موجود در رابطه (۲) 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 قبلاً 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 (۲) به صورت رابطه (۳) با آسیب‌دیدگی کاهش می‌یابد [۱۹].

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

در رابطه (۳)،  $K_i$  سفتی پنالتی آسیب‌دیده،  $D_i$  میزان آسیب‌دیدگی و  $\tilde{K}_i$  سفتی پنالتی اولیه می‌باشد. 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 گریفت) برای هر یک از سه مود استفاده می‌گردد [۱۹].

#### ۲-۲- انرژی نفوذ برای ورق‌های نازک گلیر و سرعت بالای برخورد

از آنجایی که سرعت مورد مطالعه پرتابه ۱۲۵۰ متربرثانیه و کالیبر آن ۲۵ میلی‌متر بوده، امکان بررسی تجربی پدیده مورد مطالعه با وسایل آزمایشگاهی مرسوم (تفنگ‌های گازی<sup>۷</sup> موجود) غیرممکن است. به‌علاوه کنترل و مهار گلوله بعد از برخورد مایل با هدف به دلیل غیرقابل پیش‌بینی بودن مسیر حرکت گلوله بعد از کمانه کردن، انجام تست‌های تجربی را هرچه بیشتر دشوار ساخته است. بنابراین به دلیل عدم وجود داده‌های تجربی، به منظور صحت‌سنجی روش حل عددی این مسئله، از یک رابطه تجربی طبق مرجع [۲۰] استفاده شده و پس از صحت‌سنجی روش حل، از آن برای بررسی حالات برخورد مایل استفاده گردیده است.

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 تجربی (۴) پیش‌بینی گردیده است [۲۰].

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 وارده به ماده از تنش نهایی بیشتر شود، ماده دچار شکست می‌گردد [۱۸].

#### ۲-۱-۲- ورق کامپوزیت تک‌جهته 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 (۱) می‌باشد [۱۸].

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

طبق رابطه (۱)، اگر تنش کششی در راستای طولی الیاف  $\sigma_1$ ، از استحکام کششی طولی  $X_t$ ، یا اندازه تنش فشاری طولی  $|\sigma_1|$ ، از استحکام فشاری طولی  $X_c$ ، یا تنش کششی عرضی  $\sigma_2$  یا  $\sigma_3$ ، از استحکام کششی عرضی  $Y_t$ ، یا اندازه تنش فشاری عرضی  $|\sigma_2|$  یا  $|\sigma_3|$ ، از استحکام فشاری عرضی  $Y_c$  و یا اندازه تنش برشی  $|\tau|$  از استحکام برشی  $S$  بیشتر گردد، الیاف دچار شکست می‌شوند [۱۸].

در مطالعات سابق از مدل مادی اورتوتروپیک برای تعریف رفتار الیاف شیشه استفاده شده است؛ اما در این مطالعه از این مدل مادی جدید که طبق مرجع [۱۸] نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل مادی اورتوتروپیک ارائه می‌دهد استفاده شده و برای شبیه‌سازی این مدل در نرم‌افزار آباکوس<sup>۸</sup>، سابروتین تعریف شده توسط کاربر وی-یو-مت<sup>۹</sup>، نوشته شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

#### ۲-۱-۳- ماده چسبنده

به منظور مطالعه پدیده لایه لایه‌شدگی<sup>۳</sup> در کامپوزیت‌ها، نیاز به تعریف خواص مکانیکی ماده چسبنده<sup>۴</sup> است. روابط مربوط به چسب‌ها دقیقاً از روابط مکانیک شکست نشأت می‌گیرند. چراکه ایجاد و گسترش لایه لایه‌شدگی کامپوزیت را می‌توان مثل ایجاد و گسترش ترک در نظر گرفت. رفتار چسب قبل از آغاز جدایش به صورت الاستیک خطی است. در خصوص

5 Traction-Separation  
6 Penalty Stiffness  
7 Gas Gun

1 ABAQUS  
2 User-defined subroutine VUMAT  
3 Delamination  
4 Cohesive

جدول ۱: خواص مکانیکی آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳ [۱۸]

Table 1. Mechanical properties of aluminum 2024-T3 [18]

مقدار	خواص مکانیکی
۲۷۸۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۷۳/۱	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۳	ضریب پواسون
۱۸	درصد تغییر طول (%)
۳۴۵	استحکام تسلیم (MPa)
۴۸۳	استحکام نهایی (MPa)

جدول ۲: خواص مکانیکی الیاف اس ۲-گلاس [۱۸]

Table 2. Mechanical properties of S2-Glass [18]

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص مکانیکی
۰/۳۴	ضریب پواسون ۲۳	۳۶	مدول یانگ اول $E_1$ (GPa)
۰/۲۵	ضریب پواسون ۱۳	۵	مدول یانگ دوم $E_2$ (GPa)
۴۶۵	استحکام کششی طولی $Xt$ (MPa)	۵	مدول یانگ سوم $E_3$ (GPa)
۵/۶	استحکام کششی عرضی $Yt$ (MPa)	۲/۷	مدول برشی ۱۲ $G_{12}$ (GPa)
۵/۶	استحکام فشاری عرضی $Yc$ (MPa)	۲/۷	مدول برشی ۱۳ $G_{13}$ (GPa)
۱۹/۲	استحکام برشی $S$ (MPa)	۱/۹۲	مدول برشی ۲۳ $G_{23}$ (GPa)
۱۵۴۰	چگالی $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	۰/۲۵	ضریب پواسون ۱۲

به طور جداگانه به صورت المان‌های حجمی<sup>۲</sup> و سی‌دی‌آر<sup>۳</sup> و ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر ایجاد گردیده‌اند. در هندسه‌های غیرمسطح نیز ابعاد هدف همان ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و شعاع‌های انحنای متفاوت ۲۰ و ۶/۳ سانتی‌متر برای آن تعریف گردیده است. شکل ۱ و شکل ۲ به ترتیب نمای بالای اهداف با شعاع انحنای ۲۰ و ۶/۳ سانتی‌متر را نشان می‌دهند.

به کمک تعریف برهم‌کنش<sup>۴</sup> چسب بین لایه‌ها، امکان مدل‌سازی پدیده لایه لایه‌شدگی نیز فراهم آمده است. اهداف مورد مطالعه، گلیر ۵ هستند و جنس لایه‌های مختلف هدف، آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳ و الیاف اس ۲-

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

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

رابطه (۴)، 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 گلیر ۳ با چیدمان ۲/۱ (که بسیار نازک است) به دست 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  $\rho_t$ )، 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  $\Gamma$  و سرعت اولیه برخورد  $V_i$ ) پیش‌بینی کند. با توجه به رابطه ۴ با افزایش سرعت برخورد، چگالی و ضخامت کامپوزیت و کالیبر گلوله، انرژی جذب شده توسط گلیر بر اثر نفوذ گلوله در آن بیشتر می‌شود. به‌علاوه 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 [۲۰].

۲-۳- مدل‌سازی مسأله

۲-۳-۱- مدل‌سازی هدف

مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مدل اکسپلیسیت دینامیک<sup>۱</sup> صورت گرفته است و در این مدل‌سازی، تک تک لایه‌های هدف



Fig. 1. Curve target with curvature radius of 20cm

شکل ۱: هدف منحنی با شعاع انحنای ۲۰ سانتی‌متر

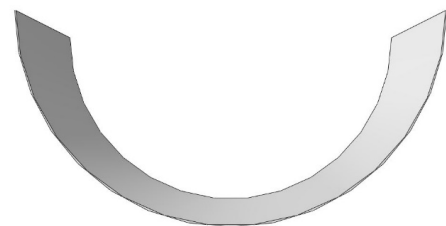


Fig. 2. Curve target with curvature radius of 6.3cm (cylindrical)

شکل ۲: هدف منحنی با شعاع انحنای ۶/۳ سانتی‌متر (استوانه‌ای)

1 Explicit Dynamic

- 2 Solid
- 3 C3D8R
- 4 Interaction

دارد و در استحکام تسلیم دچار شکست می‌شود، در جدول ۵ ارائه گردیده است [۱۷].

در شبیه‌سازی المان محدود به منظور اهمیت بررسی تغییر شکل پرتابه، هم هسته و هم روکش آن غیر صلب لحاظ شده و از المان حجمی سی‌دی‌۸ آر در ایجاد 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 ۳، ابعاد پرتابه ام-۷۹۱ را نمایش می‌دهد [۱۷].

### ۲-۳-۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی و بررسی حساسیت به مش

به منظور صحت‌سنجی مدل، از رابطه (۴) استفاده گردیده و همچنین بررسی حساسیت به مش برای پرتابه و هدف به طور جداگانه صورت گرفته است. به کمک رابطه (۴)، مقدار افت انرژی بر اثر نفوذ برای گلیسر ۳/۱ و پرتابه ۲۵ میلی‌متری مسئله، ۲۲۰/۳ ژول محاسبه گردید. به منظور بررسی حساسیت به مش نیز، ابتدا تعداد المان‌های هدف ۹۵۰۰ در نظر گرفته شد

### جدول ۵: خواص مکانیکی پلی اتیلن [۱۷]

Table 5. Mechanical properties of Polyethylene [17]

مقدار	خواص مکانیکی
۹۵۰	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
۱/۳۷	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۴	ضریب پواسون
۳۱/۷	استحکام تسلیم (MPa)

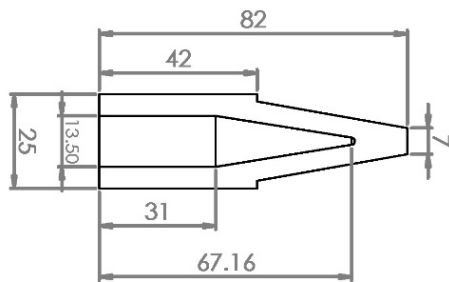


Fig. 3. Projectile dimensions (in mm) [17]

شکل ۳: ابعاد پرتابه (میلی‌متر) [۱۷]

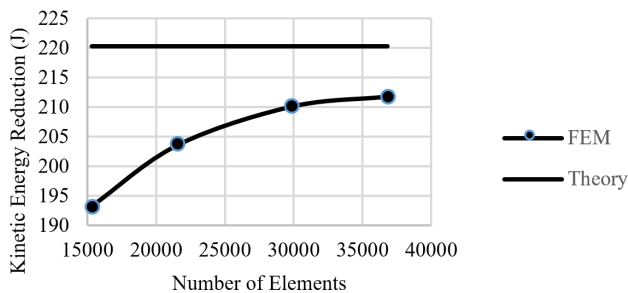


Fig. 4. Mesh sensitivity of projectile

شکل ۴: حساسیت به مش پرتابه

### جدول ۳: خواص چسبانندگی اپوکسی [۱۹]

Table 3. Cohesive properties of Epoxy [19]

مقدار	خواص چسبانندگی	مقدار	خواص چسبانندگی
$570 \times 10^{12}$	سفتی پنالتی مود دوم $K_{II}$ ( $N/m^2$ )	$570 \times 10^{12}$	سفتی پنالتی مود اول $K_I$ ( $N/m^2$ )
۵۷	استحکام مود اول چسب (MPa)	$570 \times 10^{12}$	سفتی پنالتی مود سوم $K_{III}$ ( $N/m^2$ )
۵۷	استحکام مود سوم چسب (MPa)	۵۷	استحکام مود دوم چسب (MPa)
۲۸۰	انرژی شکست مود دوم $E_{II}$ ( $J/m^2$ )	۲۸۰	انرژی شکست مود اول $E_I$ ( $J/m^2$ )
		۲۸۰	انرژی شکست مود سوم $E_{III}$ ( $J/m^2$ )

### جدول ۴: خواص مکانیکی تنگستن [۱۷]

Table 4. Mechanical properties of Tungsten [17]

مقدار	خواص مکانیکی
۱۷۵۰۰	چگالی ( $kg/m^3$ )
۳۲۴	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۲۸	ضریب پواسون
۵۱۷	استحکام تسلیم (MPa)
۷۵۸	استحکام نهایی (MPa)
۲	درصد تغییر طول

گلاس می‌باشد. در مطالعات صورت گرفته، آلومینیوم ۲۰۲۴-تی-۳ یک ماده ایزوتروپیک در نظر گرفته شده و خواص مکانیکی آن در جدول ۱ ارائه گردیده است [۱۸]. الیاف اس-۲ گلاس نیز یک ورق کامپوزیت تک لایه و تک جهته سه بعدی فرض شده و خواص مکانیکی مرتبط با این کامپوزیت سه بعدی طبق جدول ۲ می‌باشد [۱۸]. رزین یا چسب مجموعه هدف نیز اپوکسی بوده که علاوه بر نگه‌داشتن الیاف در کنار هم، باعث چسبیدن لایه الیاف به لایه آلومینیوم می‌شود و خواص آن نیز در جدول ۳ قابل مشاهده است [۱۹].

### ۲-۳-۲- مدل‌سازی گلوله

پرتابه ام-۷۹۱ هسته تنگستنی و روکش پلی اتیلن دارد. تنگستن یک فلز ایزوتروپیک است و خواص مکانیکی آن در جدول ۴ به نمایش درآمده است [۱۷]. همچنین خواص مکانیکی پلی اتیلن که فقط رفتار الاستیک خطی

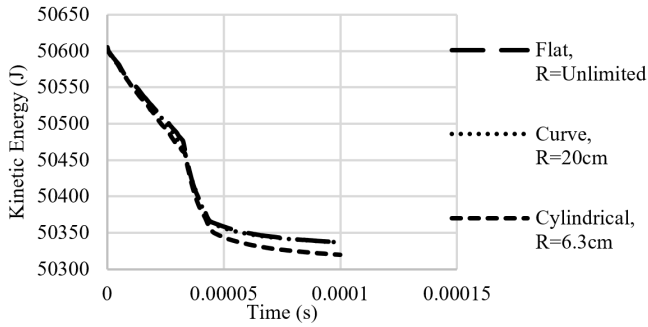


Fig. 7. Kinetic energy history of projectile with impact angle of zero degree  
شکل ۷: تاریخچه انرژی جنبشی گلوله با زاویه برخورد صفر درجه

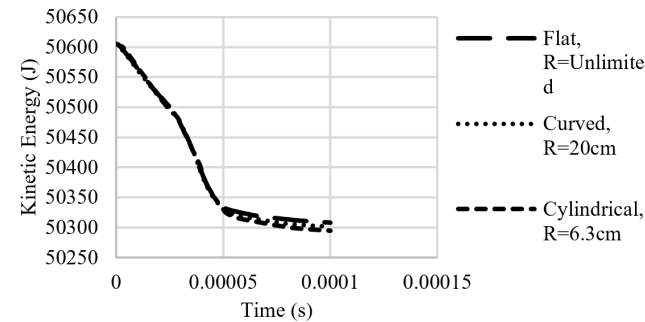


Fig. 8. Kinetic energy history of projectile with impact angle of 30 degree  
شکل ۸: تاریخچه انرژی جنبشی گلوله با زاویه برخورد ۳۰ درجه

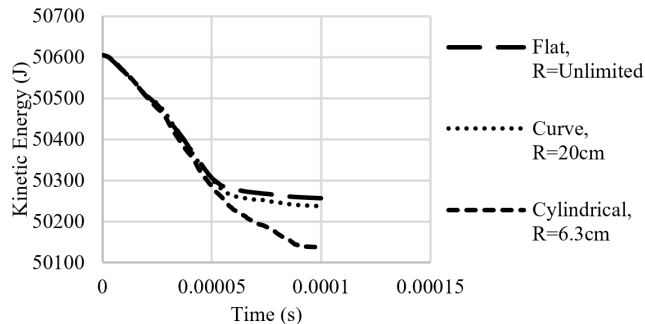


Fig. 9. Kinetic energy history of projectile with impact angle of 45 degree  
شکل ۹: تاریخچه انرژی جنبشی گلوله با زاویه برخورد ۴۵ درجه

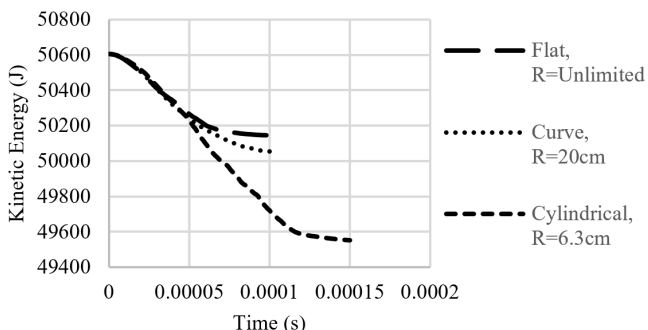


Fig. 10. Kinetic energy history of projectile with impact angle of 60 degree  
شکل ۱۰: تاریخچه انرژی جنبشی گلوله با زاویه برخورد ۶۰ درجه

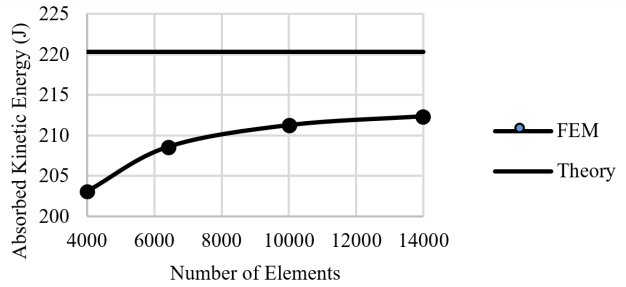


Fig. 5. Mesh sensitivity of target  
شکل ۵: حساسیت به مش هدف



Fig. 6. Final finite element model  
شکل ۶: مدل نهایی المان محدود

(لازم به ذکر است که دلیل وجود شرایط تقارن، این تعداد المان برای نیمی از سطح هدف می‌باشد) و حساسیت به مش پرتابه بررسی گردید و سپس با انتخاب مقدار ۲۹۸۳۲ المان برای پرتابه، حساسیت به مش هدف مورد بررسی قرار گرفت و مقدار ۱۰۰۰۰ برای تعداد المان‌های هدف برگزیده شد (هر لایه ۲۵۰۰ المان). شکل ۴ و ۵ به ترتیب بررسی حساسیت به مش را برای پرتابه و هدف نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۴ و ۵، صحت مدل‌سازی صورت گرفته به اثبات می‌رسد. شکل ۶ یک نمونه از مدل نهایی را با هندسه هدف منحنی و زاویه برخورد ۴۵ درجه نمایش می‌دهد.

### ۲-۴- حالت‌های مختلف شبیه‌سازی شده

پس از صحت‌سنجی مدل، روی هر یک از اهداف گلیر ۵/۲ با هندسه‌های متفاوت مسطح، منحنی با شعاع انحنای ۲۰ سانتی‌متر و منحنی با شعاع انحنای ۶/۳ سانتی‌متر (استوانه‌ای)، ۴ شبیه‌سازی المان محدود صورت گرفته است (در مجموع ۱۲ شبیه‌سازی) که پرتابه سرعت اولیه ۱۲۵۰ متر بر ثانیه داشته و برخورد در زوایای صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه (نسبت به بردار نرمال هدف) رخ می‌دهد. شبیه‌سازی‌های المان محدود به صورت برخورد مایل و در صفحه افقی عمود بر سطح هدف صورت می‌گیرد. همچنین هرگونه حرکت 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، برای همین سرعت برخورد پرتابه با سطح، همواره در راستای محور پرتابه خواهد بود.

### ۳- نتایج و بحث

در شکل‌های ۷ تا ۱۰ تاریخچه‌های انرژی جنبشی پرتابه در اثر برخورد با اهداف دارای هندسه و زاویه برخورد مختلف ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ۷ تا ۱۰ تاریخچه‌های انرژی جنبشی هر کدام از سه بخش تشکیل شده‌اند؛ بخش اول که شیب کمتری دارد که نشان‌دهنده برخورد نوک گلوله تا لبه‌ی میانی آن، بخش دوم که شیب تندتری دارد،

و در نتیجه افت انرژی شدیدتری ایجاد می‌شود. در جدول ۶، میزان کاهش انرژی جنبشی مستخرج از شکل‌های ۷ تا ۱۰ برای تمامی حالات به طور مختصر آورده شده است.

جدول ۶: افت انرژی جنبشی گلوله (ژول)

Table 6. Kinetic energy reduction of projectile (J)

زاویه برخورد (درجه)				
۶۰	۴۵	۳۰	صفر	هندسه هدف
۴۶۱	۳۴۸/۱	۲۹۶/۶	۲۶۸/۳	مسطح
۵۵۰/۱	۳۶۷/۷	۳۰۳/۵	۲۶۸/۴	منحنی
۱۰۵۲	۴۶۷/۷	۳۱۰/۴	۲۸۵	استوان‌های

جدول ۷: طول ناحیه آسیب‌دیده هدف مسطح (سانتی‌متر)

Table 7. Length of damaged area of flat target (cm)

لایه	۰	۰	۳۰	۳۰	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
	عمود	افق	عمود	افق	عمود	افق	عمود	افق
۱	۲/۹	۲/۹	۳/۲	۲/۸	۲/۸	۳	۵/۲	۳
۲	۳/۲	۵	۳/۶	۵	۲/۸	۵/۲	۴/۸	۴/۶
۳	۵/۲	۳/۴	۵/۲	۳/۶	۵/۶	۴	۶/۴	۴
۴	۵/۲	۴	۵/۲	۴/۴	۵/۶	۴/۴	۶/۶	۴/۴
۵	۴/۲	۵/۶	۴/۴	۵/۶	۴/۶	۵/۸	۵/۲	۵/۲
۶	۳/۴	۳/۴	۴	۳/۴	۵/۴	۴/۲	۵/۶	۳/۴

جدول ۸: طول ناحیه آسیب‌دیده هدف منحنی (سانتی‌متر)

Table 8. Length of damaged area of curve target (cm)

لایه	۰	۰	۳۰	۳۰	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
	عمود	افق	عمود	افق	عمود	افق	عمود	افق
۱	۲/۵	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۳	۵/۴	۳/۲
۲	۲/۸	۴/۶	۲/۸	۴/۶	۳/۲	۴/۶	۵	۳/۸
۳	۳/۴	۵/۲	۳/۲	۴/۸	۳/۲	۴/۸	۴/۷	۳/۸
۴	۳/۴	۵/۲	۳/۳	۵/۲	۳/۴	۵/۲	۵/۱	۴/۶
۵	۳/۴	۵/۲	۳/۱	۵/۲	۳/۶	۵	۵/۸	۴/۶
۶	۲/۵	۳	۳/۷	۳/۴	۴/۶	۳/۴	۶/۳	۳/۴

جدول ۹: طول ناحیه آسیب‌دیده هدف استوانه‌ای (سانتی‌متر)

Table 9. Length of damaged area of cylindrical target (cm)

لایه	۰	۰	۳۰	۳۰	۴۵	۴۵	۶۰	۶۰
	عمود	افق	عمود	افق	عمود	افق	عمود	افق
۱	۳/۴	۳	۳/۸	۳	۵/۶	۳	۱۱/۹	۴/۲
۲	۳/۵	۳/۶	۴/۲	۳/۴	۵/۶	۳/۴	۱۱/۹	۴/۴
۳	۴/۲	۳/۶	۴/۴	۳/۶	۵/۶	۳/۴	۱۲/۹	۴/۴
۴	۴/۲	۴	۴/۳	۴	۳/۴	۶/۵	۱۲/۹	۳/۸
۵	۵	۴	۴/۸	۴	۳/۶	۶/۵	۱۱/۹	۳/۸
۶	۴	۳/۶	۵	۳/۴	۶	۳	۱۴	۴/۲

نشان‌دهنده برخورد لبه‌ی میانی گلوله و در نهایت بخش سوم که شیب بسیار کمی دارد، نشان‌دهنده نفوذ کامل و رسیدن به پایداری گلوله می‌باشد. به ازای زاویه برخورد صفر درجه، تاریخچه‌های انرژی جنبشی برای هر سه هندسه بسیار به هم نزدیک هستند و برای هدف منحنی و هدف مسطح تقریباً روی هم قرار دارند؛ اما به ازای هندسه استوان‌های از بخش سوم تاریخچه انرژی جنبشی به میزان بسیار اندک افت انرژی جنبشی افزایش می‌یابد. علت این موضوع را می‌توان به گشتاور خمشی مقاومی که در اثر انحنا به وجود می‌آید نسبت داد. در زاویه برخورد ۳۰ درجه، اختلاف بین سه تاریخچه باز هم از بخش سوم تاریخچه‌ها شروع شده و این بار این اختلاف کمی بیشتر می‌شود و به ترتیب هندسه استوانه‌ای بیشترین افت انرژی هندسه منحنی، افت انرژی متوسط و هندسه مسطح کمترین افت انرژی را دارا هستند. علت این موضوع را می‌توان به افزایش بیشتر سطح درگیر و مدت زمان درگیری گلوله با هدف در هندسه‌های منحنی و انحناهای بزرگتر نسبت داد. به ازای زاویه برخورد ۴۵ درجه، اختلاف بین دو تاریخچه مربوط به هندسه مسطح و منحنی از بخش سوم آغاز می‌شود و باز هم میزان افت انرژی حاصل از هندسه منحنی بیشتر از هندسه مسطح است؛ اما در مورد هندسه استوانه‌ای، این اختلاف از ناحیه دوم آغاز می‌شود؛ چرا که برخورد لبه‌ی میانی گلوله در این حالت تقریباً به صورت مستقیم و غیرمایل با هدف اتفاق می‌افتد و در نتیجه انرژی بیشتری نسبت به دو هندسه قبل اتلاف می‌شود. در مورد زاویه برخورد ۶۰ درجه، این بار این اتفاق برای هندسه منحنی اتفاق می‌افتد و برای همین تاریخچه انرژی جنبشی هندسه منحنی از بخش دوم این تاریخچه نسبت به هندسه مسطح شروع به اختلاف داشتن با تاریخچه هدف مسطح می‌کند؛ اما در مورد تاریخچه هندسه استوانه‌ای اتفاق دیگری رخ می‌دهد؛ دلیل این تفاوت در شکل ۱۱ روشن گردیده است. با توجه به شکل ۱۱ و مقایسه آن با تاریخچه انرژی جنبشی هندسه استوانه‌ای موجود در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که تاریخچه انرژی جنبشی دارای پنج بخش است؛ بخش اول و دوم مانند حالات بررسی شده در گذشته است؛ اما بخش سوم که شیب تندتری نسبت به بخش‌های یک و دو دارد، در اثر برخورد مجدد نوک گلوله، این بار به پشت هدف به وجود می‌آید؛ بخش چهارم که مجدد شیب تندتری نسبت به بخش سوم دارد حاصل برخورد بخش میانی گلوله به پشت هدف دارد و بخش پنجم نمایش دهنده رسیدن به پایداری بعد از نفوذ می‌باشد. در واقع گلوله با زاویه برخورد ۶۰ درجه، دو بار با هدف استوان‌های، یک بار از روبرو و یک بار از پشت، برخورد می‌کند

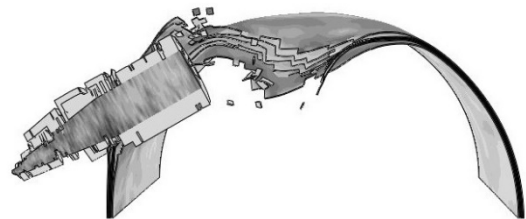
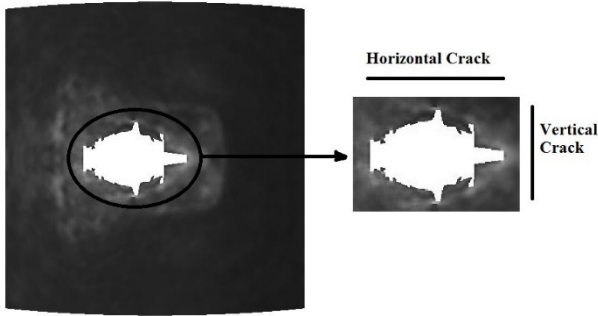


Fig. 11. Secondary impact of projectile

شکل ۱۱: برخورد ثانویه گلوله



**Fig. 13. Typical case of vertical small-cracks formation**  
 شکل ۱۳ نمونه‌ای از تشکیل ریزترک‌های عمودی

ترک‌های لایه اول هستند. علت به وجود آمدن پدیده پتالینگ نامتقارن (که در برخورد‌های مایل رخ می‌دهد)، 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 و 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 ۶۰ درجه، در تمامی حالات، کاهش (یا ثابت باقی ماندن) طول ترک عمودی به ازای افزایش زاویه برخورد از ۴۵ به ۶۰ درجه قابل مشاهده است؛ 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. شکل ۱۳، نمونه‌ای از ایجاد ریزترک‌ها را نمایش می‌دهد.

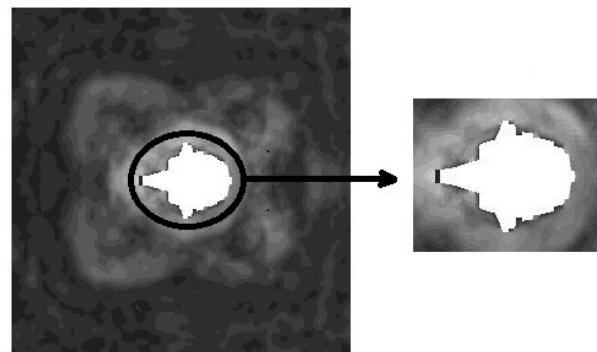
در شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ لایه‌لایه‌شدگی هر سه نوع هندسه به ترتیب به ازای زاویه برخورد صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با یکدیگر مقایسه شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۴ تا ۱۷ مشاهده می‌گردد که به ازای زاویه برخورد صفر درجه، با افزایش انحنای میزان فاصله جدایش بین لایه‌ها در پدیده لایه‌لایه‌شدگی افزایش می‌یابد؛ اما عمق و میزان پارگی‌های پدیده پتالینگ کاهش یافته است. هر دوی این پدیده‌ها ناشی از ممان خمشی مقاوم ایجاد شده در اثر خمیدگی هندسه به وجود آمده‌اند. با افزایش زاویه برخورد، نتایج همچنان در مورد پدیده پتالینگ پابرجاست؛ اما در مورد فاصله جدایش، نتایج کاملاً برعکس است و به ازای این افزایش زاویه برخورد، رفته رفته فاصله جدایش لایه‌ها در هندسه‌های خمیده کاهش یافته و در عوض در هندسه مسطح افزایش می‌یابد. علت این امر درگیر شدن راستای جانبی هدف با نوک گلوله است که منجر به خمیدگی بیشتر هدف نسبت به لایه‌لایه‌شدگی آن 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 ۱۴) می‌شود. علاوه بر این همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، لایه‌لایه‌شدگی بین لایه پنجم و ششم، ناحیه

جدول ۷، ۸ و ۹ طول بزرگترین ترک افقی و عمودی گلیر ۵ را برای تک تک لایه‌ها به ازای زوایای برخورد صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و سرعت برخورد ۱۲۵۰ متربرثانیه به ترتیب برای هندسه مسطح، منحنی و استوان‌های نمایش می‌دهند.

با مقایسه جداول ۷ تا ۹ مشخص می‌گردد که تغییر طول بزرگترین ترک‌ها با تغییر انحنای همواره نتیجه یکسانی به دنبال ندارد. چون که افزایش انحنای، خصوصاً در زوایای برخورد بالاتر، باعث افزایش سطح درگیر هدف با گلوله می‌شود و از اثر افزایش مقاومت هدف (به دلیل وجود گشتاور خمشی در هندسه‌های غیرمسطح) می‌کاهد. مقایسه بزرگترین ترک‌های متناظر در سه هندسه در لایه اول نشان‌دهنده آن است که با تغییر هندسه مسطح به منحنی، طول ترک‌ها کاهش یافته است؛ اما با تغییر هندسه از منحنی به استوان‌های، طول ترک‌ها حتی از حالت مسطح نیز بیشتر شده است. در لایه دوم نیز با افزایش انحنای ابتدا طول ترک‌های افقی کاهش و سپس بسیار افزایش می‌یابد و از حالت مسطح نیز بیشتر می‌شود. اما به دلیل غلبه انحنای الیاف (که منجر به تقویت استحکام هدف می‌شود) بر عوامل دیگر، طول ترک‌های عمودی با افزایش انحنای همواره کمتر می‌شود. در لایه سوم نیز با افزایش انحنای، ابتدا طول ترک‌های افقی کاهش و سپس افزایش می‌یابد اما از حالت مسطح بیشتر نمی‌شود. دلیل این امر غلبه افزایش استحکام بر دیگر عوامل است. در این لایه و در راستای عمودی، افزایش سطح درگیری پدیده غالب است که منجر به افزایش طول ترک عمودی می‌شود اما در استوانه‌ای، پدیده غالب افزایش استحکام است که منجر به کاهش طول ترک عمودی حتی نسبت به حالت مسطح می‌گردد. به دلیل همراستا بودن جهت الیاف، شرایط ترک‌های عمودی و افقی در لایه چهارم مشابه لایه سوم بوده و در لایه پنجم مشابه لایه دوم است. در لایه ششم نیز روند تغییر طول ترک‌های عمودی و افقی مشابه لایه اول است؛ چرا که هر دو لایه اول و ششم از جنس آلومینیوم هستند. اما مقادیر متناظر طول بزرگترین ترک‌ها در لایه ششم نسبت به لایه اول (در تمامی هندسه‌ها) بزرگ‌تر هستند. علت این موضوع در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۲، با رخ دادن پدیده پتالینگ و پتالینگ نامتقارن در لایه ششم، طول بزرگترین ترک‌های متناظر در لایه ششم بزرگتر از بزرگترین



**Fig. 12. Typical case of asymmetric petalling in target**  
 شکل ۱۲: نمونه‌ای از پتالینگ نامتقارن در هدف



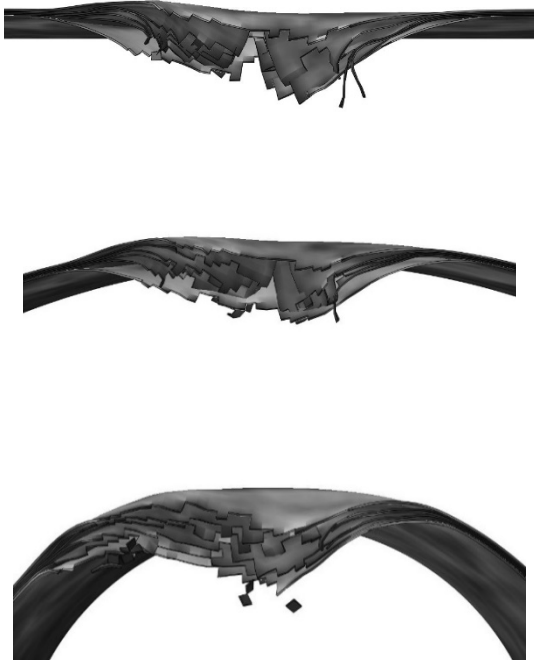


Fig. 16. Delamination of target - impact angle of 45 degree  
 شکل ۱۶: لایه‌لایه‌شدگی هدف - زاویه برخورد ۴۵ درجه

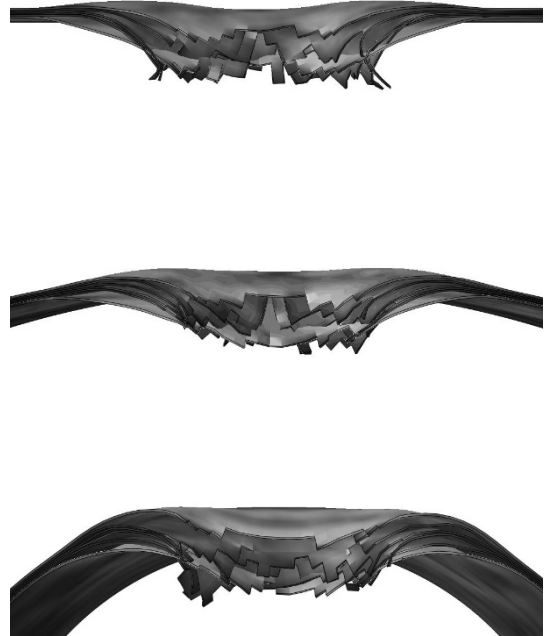


Fig. 14. Delamination of target - impact angle of zero degree  
 شکل ۱۴: لایه‌لایه‌شدگی هدف - زاویه برخورد صفر درجه

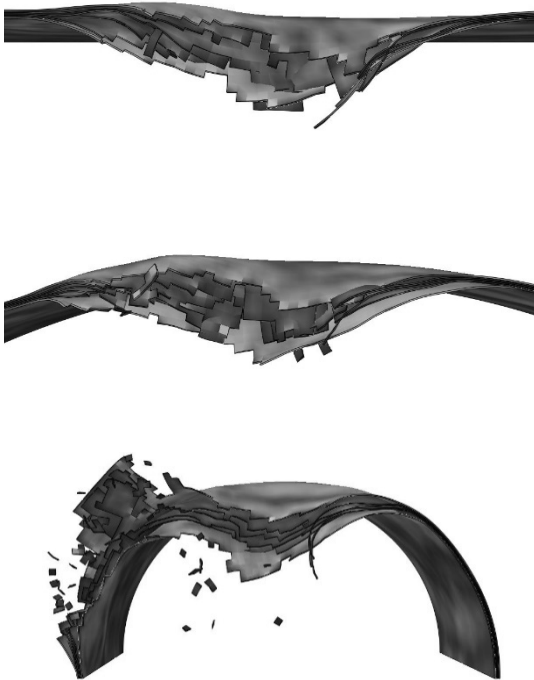


Fig. 17. Delamination of target - impact angle of 60 degree  
 شکل ۱۷: لایه‌لایه‌شدگی هدف - زاویه برخورد ۶۰ درجه

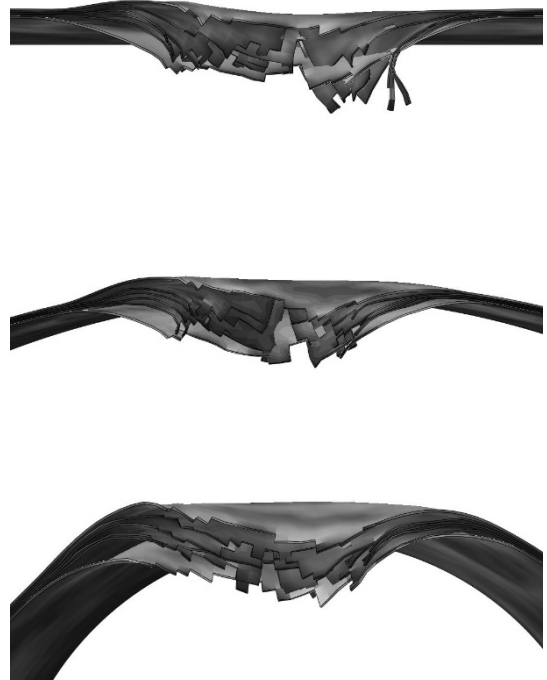


Fig. 15. Delamination of target - impact angle of 30 degree  
 شکل ۱۵: لایه‌لایه‌شدگی هدف - زاویه برخورد ۳۰ درجه

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 جداشده الیاف-الیاف است. با مقایسه شکل ۱۴ با شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ به خوبی نقش بار اعمالی در

وسیع‌تری را نسبت به لایه‌لایه‌شدگی بین لایه‌های دیگر شامل می‌شود. علت این امر رفتار انتهای آزاد موج تنش است که باعث جدایش آن از لایه پنجم 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

### فهرست علائم

کالیبر پرتابه (m)	$d$
میزان آسیب‌دیدگی	$D$
انرژی نفوذ (J)	$E_p$
سفتی پالتی ( $\text{Nm}^{-3}$ )	$K$
سفتی پالتی اولیه ( $\text{Nm}^{-3}$ )	$\tilde{K}$
ضخامت هدف (m)	$T$
سرعت برخورد	$V_i$
استحکام طولی (MPa)	$X$
استحکام عرضی (MPa)	$Y$
تنش برشی (MPa)	$\tau$
تنش (MPa)	$\sigma$
جدایش (m)	$\delta$
ضریب شکل نوک پرتابه	$\Gamma$
چگالی هدف ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$\rho_i$

### مراجع

- [1] T. Sinmazçelik, M. O.Bora, A Review: Fiber Metal Laminates, Background, Bonding Types and Applied Test Methods, *Materials and Design*, 32 (2011) 3671-3685.
- [2] E.C. Botelho, R.A. Silvac, L.C. Pardinia, A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures, *Materials Research*, 9(3) (2006) 247-256.
- [3] F.D. Morinière, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, Modelling of Impact Damage and Dynamics in Fibre-Metal Laminates – Review, *International Journal of Impact Engineering*, 67 (2014) 27-38.
- [4] H. Sabouri, H. Ahmadi, G.H. Liaghat, Ballistic Impact Perforation into GLARE Targets: Experiment, Numerical Modelling and Investigation of Aluminium Stacking Sequence, *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 3(3) (2011) 178-183.
- [5] M. Sadighi, R.C. Alderliesten, R. Benedictus, Impact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review, *International Journal of Impact Engineering*, 40 (2012) 77-90.
- [6] H. Ahmadi, G.H. Liaghat, H. Sabouri, E. Bidkhouri, Investigation on the High Velocity Impact Properties

پدیده لایه‌لایه‌شدگی قابل مشاهده است؛ چرا که به دلیل افزایش فشار روی لایه‌های بالایی که منجر به برآمدگی لایه اول شده است، سطح جداشده بین لایه‌ها در تمام سطوح بین لایه‌ها، به یکدیگر بسیار نزدیک شده‌اند. 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 ۶۰ 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 ۴۵ درجه کمتر شده است که به دلیل کاهش بیش از حد تکانه‌ی گلوله در جهت ضخامت هدف می‌باشد. این کاهش عمق، باعث کاهش طول پارگی‌های ناشی از پتالینگ می‌شود.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به کمک شبیه‌سازی المان محدود پدیده نفوذ مایل پرتابه ضد زره کالیبر ۲۵ میلی‌متر در اهداف از جنس گلیر ۵/۲ و با هندسه‌های مختلف مسطح، منحنی با شعاع انحنای ۲۰ سانتی‌متر و منحنی با شعاع انحنای ۶/۳ سانتی‌متر در نرم‌افزار آباکوس به بررسی ابعاد ناحیه آسیب‌دیده هدف بر اثر نفوذ پرداخته شد. مشاهده گردید که افزایش شعاع انحنای هدف (به عنوان راهکار غیرمستقیم برای مقابله با نفوذ پرتابه‌های پرنرژی کالیبر متوسط ضد زره) همواره نتایج دلخواه به دنبال ندارد و با افزایش بیش از حد شعاع انحنای، حتی ابعاد آسیب‌دیدگی (در حالت بررسی شده‌ی استوانه‌ای) بیشتر از حالت مسطح می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که وجود انحنای هدف، تنها در زوایای کم (زیر ۴۵ درجه) باعث کاهش ابعاد آسیب‌دیدگی نسبت به هندسه مسطح می‌شود و در زوایای بالاتر به دلیل افزایش سطح درگیری گلوله و هدف، منجر به نتایج عکس می‌گردد. علاوه بر این، 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 آسیب‌دیدگی‌ها (خصوصاً در راستای افقی) را کاهش داد.

- [14] J. Zhou, Z.Q. Guan, W.J. Cantwell, Strain-Rate on the Perforation Resistance of Fiber Metal Laminates, *Composite Structures*, 125 (2015) 247–255.
- [15] A.K. Syed, M.E. Fitzpatrick, J.E. Moffatt, J. Doucet, I. Durazo-Cardenas, Effect of Impact Damage on Fatigue Performance of Structures Reinforced with GLARE Bonded Crack Retarders, *International Journal of Fatigue*, 80 (2015) 231–237.
- [16] A. Niknejad, A. Zareei, Ballistic Limit Velocity of Empty Rectangular Metal Columns under A Blunt Projectile Penetration, *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, 13(1) (2015) 119–131.
- [17] Technical Manual, Army Ammunition Data Sheets, Headquarters, *Department of the Army Washington, D.C.* (1994)
- [18] Y. Huang, Y., 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*, 78 (2015) 53–60.
- [19] E.J. Barbero, Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus. CRC Press. (2013)
- [20] S.R. Reid, H.M. Wen, Impact Behavior of Fiber-Reinforced Composite Materials and Structures. Cambridge: Wood-Head Publishing. (2000)
- of Glass-Reinforced Fiber Metal Laminates, *Journal of Composite Material*, 47(13) (2012) 1605-1615.
- [7] F.D. Morinière, R.C. Alderliesten, M. Sadighi, R. Benedictus, An Integrated Study on the Low-Velocity Impact Response of the GLARE Fibre-Metal Laminate, *Composite Structures*, 100 (2013) 89-103.
- [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*, 32 (2014) 142-152.
- [9] E. Sitnikova, Z.W. Guan, G.K. Schleyer, W.J. Cantwell, Modelling of Perforation Failure in Fibre Metal Laminates Subjected to High Impulsive Blast Loading, *International Journal of Solids and Structures*, 51 (2014) 3135–3146.
- [10] A. Masoudi, G.H. Liaghat, M. Pol, Effects of Nanoclay on the Ballistic Behavior of GLARE - Experimental and Numerical Investigation, *Modares Journal of Mechanical Engineering*, 14(7) (2014) 43-51. (In Persian)
- [11] G. Boay Chai, P. Manikandan, Low Velocity Impact Response of Fibre-Metal Laminates – A Review, *Composite Structures*, 107 (2014) 363–381.
- [12] L. Jayaprakash, K. Ranjithkumar, S.L. Pradeep Kumar, Influence of Metal (Aluminium) Layer Thickness in Glare, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4 (2015) 321-323.
- [13] C. Qi, G. Zhidong, L. Zengshan, J. Zhaojie, Z. Yue, Experimental Investigation on Impact Performances of GLARE Laminates, *Chinese Journal of Aeronautics*, 5 (2015) 212-221.

Please cite this article using:

P. Pirali , M. Ghadami, Numerical Investigation of the Target Geometry Influence on the Glare Damage Caused By Medium-Caliber AP-Projectile, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(5) (2018) 53-64.

DOI: 10.22060/mej.2017.12419.5328

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



