

## بررسی تحلیلی برخورد پرتابه استوانه‌ای با دماغه‌های مختلف به ورق‌های ساندویچی

سید سجاد جعفری<sup>۱</sup> و سعید فعلی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> ورق ساندویچی، فوم، کامپوزیت، آلومینیم، پرتابه‌های مختلف.</p>	<p>در این مقاله میزان جذب انرژی ورق‌های ساندویچی تحت اثر ضربه بالستیک پرتابه، به صورت تحلیلی بررسی شده است. ورق‌های ساندویچی کامپوزیت-فوم و آلومینیم-فوم در این مقاله بررسی شده‌اند. پرتابه‌ها نیز به صورت پرتابه استوانه‌ای سر تخت، سر کروی و سر مخروطی در نظر گرفته شده‌اند. در مدل تحلیلی فرض شده است که لایه‌های رویی و زیری و هسته فوم بر اثر فشار مقاومتی متوسط دچار واماندگی شوند. جذب انرژی ورق ساندویچی برابر است با مجموع انرژی جذب شده توسط لایه‌ها و فوم. جذب انرژی توسط ورق‌های ساندویچی محاسبه و با استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه محاسبه شده است. مقادیر سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده محاسبه شده با روش تحلیلی هم‌خوانی مناسبی با مقادیر تجربی دارد. همچنین اثرات دماغه پرتابه در میزان جذب انرژی ساندویچ پانل بررسی شده است.</p>

### ۱- مقدمه

انرژی دارد و اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه در مورد اهداف فلزی و کامپوزیتی می‌باشد.

در زمینه‌ی اهداف فلزی، بکمن و گلداسمیت [۱] و کوربت و همکاران [۲] بررسی کاملی از مکانیک نفوذ پرتابه‌ها ارائه نموده و اکثر تحقیقات تجربی و تحلیلی انجام شده در این زمینه را جمع‌آوری کرده و مورد بحث و بررسی قرار دادند.

فورستال و همکاران [۳] نفوذ پرتابه در آلیاژهای آلومینیم را به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از معادلات حرکت، معادلات حاکم در این فرآیند را بدست آوردند و اثرات شکل دماغه پرتابه‌ی استوانه‌ای را در فرآیند نفوذ و سوراخ شدن اهداف فلزی بررسی کردند. فورستال و همکاران [۴] برخورد بالستیک پرتابه‌ی دماغه مخروطی را در اهداف فلزی با ضخامت‌های مختلف به صورت تجربی بررسی کردند.

موضوع نفوذ و برخورد با توجه به کاربردهای نظامی و غیر نظامی گسترده‌ای که دارد مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته است. در برخوردهای سرعت بالا (برخوردهایی که پرتابه دارای سرعت اولیه می‌باشد و هدف را کاملاً سوراخ کرده و با سرعت باقیمانده از هدف خارج می‌شود) جنس و نوع هدف و پرتابه از عوامل تاثیرگذار در میزان جذب انرژی هدف می‌باشند. اکثر کارهای انجام شده در این زمینه، تجربی بوده و با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم، کارهای تحلیلی کمی در این زمینه ارائه شده است. جنس هدف تأثیر بسزایی در جذب

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: felisaeid@razi.ac.ir

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی

است. مطابق این بررسی، سازه‌ی که در ساخت لایه‌های کامپوزیتی آن از الیاف کولار استفاده شده است، انرژی بیشتری را نسبت به سازه با لایه‌ی کامپوزیتی که از الیاف شیشه ساخته شده است جذب می‌کند.

هوفت و همکارش [۱۴] مدلی تحلیلی برای بررسی ضربه سرعت بالا روی سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته فوم ارائه دادند. آن‌ها معادلات حرکت پرتابه و جرم مؤثر صفحات رویی و هسته هنگامی که موج ضربه از سازه ساندویچی عبور می‌کند را مشخص کرده و در نهایت سرعت باقیمانده‌ی پرتابه را در هنگام خروج از ساندویچ سازه محاسبه کردند. مطابقت خوبی بین نتایج این مدل و نتایج تجربی وجود دارد.

جعفری و فعلی [۱۵] برخورد پرتابه‌ی سر تخت در سازه‌های ساندویچی فوم-کامپوزیت را به صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها روابط جدیدی براساس تئوری‌های مختلف واماندگی برای محاسبه‌ی نیروی لازم جهت واماندگی نیروی لایه‌ی کامپوزیتی بالایی در بارگذاری شبه‌استاتیکی، ارائه و جذب انرژی‌ناشی از واماندگی لایه‌ی کامپوزیتی بالایی توسط سازه ساندویچی را با در نظر گرفتن تئوری‌های مختلف (خمش، غشایی شدن و خمش-غشایی شدن) محاسبه نمودند. آن‌ها همچنین با تعیین انرژی‌های جذب شده توسط سازه ساندویچی، طی فرآیند نفوذ پرتابه و با استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه بدست آوردند. هم‌خوانی مناسبی بین نتایج مدل ارائه‌شده داده‌های تجربی وجود دارد.

فعلی و نامداری‌پور [۱۶] یک مدل تحلیلی جدید برای سوراخ شدن پانل ساندویچی کامپوزیت-لانه‌زنبوری ارائه دادند. آن‌ها سوراخ شدن پانل را در سه مرحله، شامل سوراخ شدن صفحه بالایی، سوراخ شدن لانه‌زنبوری و سوراخ شدن صفحه پایینی در نظر گرفته‌اند. در این مدل تحلیلی کامپوزیت به صورت الیاف بافته شده تار و پود، در نظر گرفته شده است. مطابقت مناسبی بین مدل ارائه شده و داده‌های موجود مشاهده شده است.

بررسی اهداف کامپوزیتی نیز به دلیل وزن پایین و مقاومت زیاد، توسط محققان مختلف [۵-۹] انجام شده است. لیاقت و همکارانش [۱۰] مدل جدیدی برای نفوذ پرتابه‌ی سر مخروطی در کامپوزیت‌های پلیمری (FRP) ارائه کردند. این مدل بر اساس انتشار موج تنش ضربه در هدف می‌باشد و مکانیزم تغییر شکل در دو قسمت موضعی و کلی بررسی شده است. از ویژگی‌های مدل ارائه‌شده، قابلیت تعمیم آن برای اشکال هندسی مختلف سر پرتابه با اصلاح روابط مربوط به کرنش موضعی می‌باشد.

پل و همکاران [۱۱] برخورد بالستیک مواد مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی را به صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها در این تحلیل، از روش انرژی و تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای زمانی کوچک استفاده کردند. همچنین پرتابه به صورت سر تخت در نظر گرفته شده است.

با تقویت اهداف به وسیله مواد دیگر، تحقیقات وارد مرحله جدیدی شد. چند لایه کردن اهداف فلزی، میزان جذب انرژی اهداف را بالا می‌برد. رادمهر و همکاران [۱۲] با استفاده از تئوری انتشار امواج پلاستیک و بر مبنای معادلات مومنتم، برخورد مایل پرتابه سر تخت را در اهداف چند لایه فلزی به صورت تحلیلی بررسی کردند. این فرآیند در نه مرحله بررسی شده است.

بررسی سازه‌های ساندویچی جهت جذب انرژی بیشتر و کاربرد در شرایط مختلف رشد چشمگیری داشته است. سازه‌های ساندویچی معمولاً دارای یک هسته هستند که بین دو لایه محصور شده‌اند. از جمله سازه‌های ساندویچی می‌توان به سازه‌های کامپوزیت-فوم، کامپوزیت-لانه-زنبوری و آلومینیم-فوم اشاره نمود.

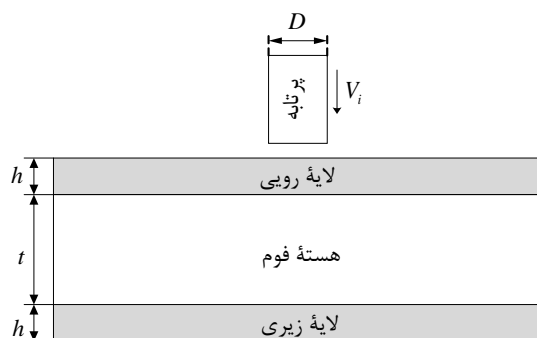
ویدیا و همکاران [۱۳] تأثیر جنس لایه‌ی کامپوزیتی را در جذب انرژی سازه ساندویچی تحت برخورد پرتابه‌ی سر تخت، به صورت تجربی بررسی کردند. در سازه‌های آزمایش‌شده از الیاف‌های شیشه و کولار در لایه‌های کامپوزیتی و از فوم آلومینیمی در هسته استفاده شده

و سرعت باقیمانده پرتابه محاسبه می‌گردد. از ویژگی‌های مدل تحلیلی، بررسی اثرات شکل پرتابه و سادگی معادلات حاکم و روش حل مسئله می‌باشد، به نحوی که با سادگی معادلات نتایج مدل هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد. مطابق نتایج مدل تحلیلی، با در نظر گرفتن قطر برابر برای پرتابه‌ها، بیشترین سرعت حد بالستیک و جذب انرژی، به ترتیب به پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی تعلق دارد. همچنین در شرایط یکسان، سرعت حد بالستیک پانل آلومینیم-فوم بیشتر از کامپوزیت-فوم می‌باشد. بنابراین جذب انرژی پانل آلومینیم-فوم از پانل کامپوزیت-فوم بیشتر است.

## ۲- مدل تحلیلی

در طی فرآیند نفوذ پرتابه در هدف، با توجه به جنس هدف و پارامترهای هندسی پرتابه، قسمتی از انرژی جنبشی اولیه پرتابه توسط هدف جذب می‌شود. در واقع کاهش انرژی جنبشی پرتابه (با فرض صلب بودن پرتابه) صرف تغییر شکل هدف شده و انرژی کرنشی هدف افزایش می‌یابد.

پانل ساندویچی دارای هسته فوم بوده که بین دو لایه رویی و زیری محصور شده است. شکل ۱ نحوه قرارگیری لایه‌های رویی و زیری و فوم را در برخورد پرتابه سر تخت به پانل نشان می‌دهد. لایه‌های رویی و زیری در پانل کامپوزیت-فوم از جنس کامپوزیت و در پانل آلومینیم-فوم از جنس آلومینیم می‌باشند.



شکل ۱- برخورد پرتابه‌ی سر تخت به پانل ساندویچی

ون و همکارانش [۱۷] سوراخ شدن صفحات ساندویچی کامپوزیت-فوم، توسط پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها همچنین انرژی جذب شده توسط سازه در اثر برخورد پرتابه سر کروی را به صورت تحلیلی بررسی کردند. صبوری و لیاقت [۱۸] فرمول‌بندی جدیدی برای محاسبه انرژی کرنشی و پاسخ استاتیکی و دینامیکی لایه‌های فلز-کامپوزیت ارائه نمودند. ممیوند و لیاقت [۱۹] مدل تحلیلی برای حد بالستیک دو بعدی کامپوزیت‌های بافته شده ارائه کردند. اثرات ابعاد هدف در عملکرد بالستیکی مجموعه نیز بررسی شده است.

ژائو و همکاران [۲۰] برخورد شبه‌استاتیکی پرتابه سر کروی به ساندویچ پانل‌های آلومینیم-فوم را به صورت تجربی بررسی و روند تغییرات نیرو بر حسب جابجایی را ثبت کردند. هانسن و همکاران [۲۱] برخورد پرتابه به پانل آلومینیم-فوم را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. تحلیل عددی به کمک نرم افزار LS-DYNA انجام شده است. هو و همکاران [۲۲] برخورد سرعت بالا به پانل آلومینیم-فوم را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها اثرات شکل پرتابه را نیز بررسی نمودند.

بررسی و تحلیل نفوذ بالستیک پرتابه‌ها در ورق‌های ساندویچی فلز-فوم و کامپوزیت-فوم موضوع جدیدی است که کمتر به روش تحلیلی بررسی شده است و اکثر کارهای انجام شده در این خصوص به صورت تجربی و عددی می‌باشد.

در این مقاله فرآیند نفوذ و سوراخ شدن صفحات ساندویچی کامپوزیت-فوم و آلومینیم-فوم تحت اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای مختلف (سر تخت، سر کروی و سر مخروطی) به صورت تحلیلی بررسی شده است. در پانل کامپوزیت-فوم، فوم PVC بین دو لایه کامپوزیتی محصور است. همچنین در پانل آلومینیم-فوم، فوم آلومینیمی بین دو لایه آلومینیمی قرار دارد. با تعیین انرژی‌های جذب شده توسط پانل ساندویچی، طی فرآیند نفوذ پرتابه و استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d \quad (1)$$

با در نظر گرفتن  $\sigma_s = \alpha \sigma_t$  و

رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۳]:

$$\sigma = \left[ \alpha + \beta \sqrt{(\rho_t / \sigma_t)} V_i \right] \sigma_t \quad (2)$$

که  $\rho_t$  و  $\sigma_t$  به ترتیب استحکام شبه‌استاتیکی و چگالی هدف و همچنین  $V_i$  سرعت اولیه پرتابه می‌باشد. منظور از سرعت اولیه پرتابه، سرعت پرتابه هنگام برخورد به هدف می‌باشد.  $\alpha$  و  $\beta$  ثابت‌های تجربی هستند که به جنس هدف و شکل پرتابه بستگی دارند. معمولاً فشار مقاومتی یک تابع چند جمله‌ای از سرعت نفوذ می‌باشد [۱]. در معادله (۲)، فشار مقاومتی متوسط به صورت یک تابع خطی از سرعت اولیه در نظر گرفته شده است.

استحکام شبه‌استاتیکی برای فلزات و فوم‌ها برابر تنش تسلیم ( $\sigma_y$ ) و برای کامپوزیت‌ها برابر حد الاستیک خطی شبه‌استاتیکی در راستای ضخامت ( $\sigma_e$ )، در نظر گرفته می‌شود. رابطه بین  $\alpha$  و خواص مکانیکی هدف و همچنین مقدار  $\beta$  برای اهداف و پرتابه‌های مختلف در جدول‌های ۱-۳ ذکر شده است.

جدول ۱- مقادیر  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\xi$  برای اهداف فلزی [۲۳]

نوع پرتابه	$\alpha$	$\beta$	$\xi$
سر تخت	$\frac{1}{2} \left[ 1 + \ln \frac{2E}{(5-4\nu)\sigma_y} \right]$	۲	۰
سر کروی	$\frac{2}{3} \left[ 1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)\sigma_y} \right]$	۱/۵	۰
سر مخروطی	$\frac{1}{2} \left[ 1 + \ln \frac{2E}{(5-4\nu)\sigma_y} \right]$	$2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	۰

جدول ۲- مقادیر  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\xi$  برای لمینیت‌های FRP [۲۴]

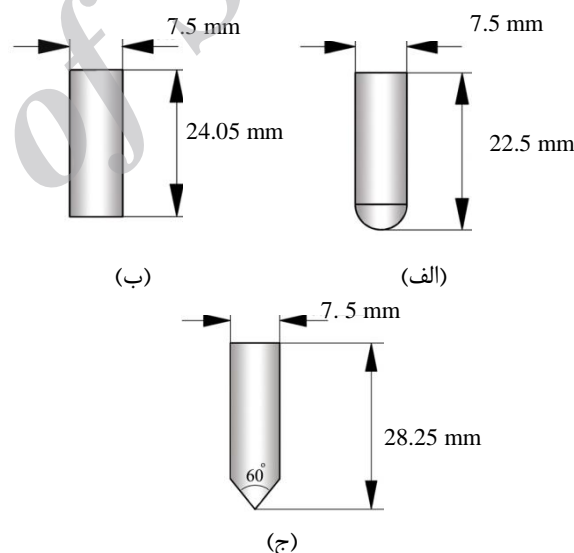
نوع پرتابه	$\alpha$	$\beta$	$\xi$
سر تخت	۱	۲	۰
سر کروی	۱	۱/۵	۰
سر مخروطی	۱	$2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	۰

فرضیات در نظر گرفته شده برای ارائه مدل تحلیلی عبارتند از:

۱. پرتابه صلب است و در طی فرآیند نفوذ بدون تغییر شکل باقی می‌ماند.

۲. در مورد پرتابه سر کروی و سر مخروطی، دماغه پرتابه کاملاً در هدف نفوذ کرده است.

شکل ۲ ابعاد و انواع پرتابه‌های فولادی استفاده شده در تحلیل پانل آلومینیم-فوم را نشان می‌دهد [۲۲]. در مدل تحلیلی انرژی جذب شده توسط لایه‌های رویی و زیری و هسته فوم به صورت جداگانه و بر اساس فشار مقاومتی که هدف به پرتابه وارد می‌کند محاسبه می‌شود. در ادامه فشار مقاومتی که اساس مدل تحلیلی ارائه شده را تشکیل می‌دهد، ارائه می‌گردد.



شکل ۲- ابعاد هندسی پرتابه (الف) سر کروی (ب) سر تخت (ج) سر مخروطی

## ۲-۱- فشار مقاومتی

فشار متوسطی ( $\sigma$ ) که هدف با ضخامت محدود، به منظور مقابله با نفوذ پرتابه و سوراخ شدن به پرتابه اعمال می‌کند شامل دو بخش است: فشار مقاومتی استاتیکی ( $\sigma_s$ ) که ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک هدف می‌باشد و فشار مقاومتی دینامیکی ( $\sigma_d$ ) که اثرات سرعت را در نظر می‌گیرد. بنابراین:

$$F = \sigma A \quad (۴)$$

که  $\sigma$  فشار متوسط اعمالی به پرتابه می‌باشد و از رابطه (۲) بدست می‌آید.

همچنین  $A$  سطح مقطع جانبی پرتابه می‌باشد و با توجه به فرض ۲، می‌توان نوشت:

$$A = \pi R^2 \quad (۵)$$

که  $R$  شعاع پرتابه است. در مورد اهداف سر کروی و سر مخروطی نفوذ پرتابه و هدف شامل سه مرحله است؛ ابتدا دماغه پرتابه وارد هدف می‌شود، سپس دماغه به صورت کامل وارد هدف شده و در نهایت دماغه از هدف خارج می‌شود.

با توجه به روابط فوق، انرژی جذب شده توسط هدف برابر است با:

$$E_{abs} = \int_0^\delta F d\delta = \pi \delta \sigma_y R^2 \left[ \alpha + \beta \sqrt{(\rho_t / \sigma_y) V_i} \right] \quad (۶)$$

بطوریکه  $\delta$  میزان فرورفتگی پرتابه در هدف می‌باشد. میزان فرورفتگی پرتابه در هدف به پارامترهای مختلفی از جمله جنس هدف و سرعت پرتابه بستگی دارد. هنگامی که انرژی جذب شده توسط هدف با انرژی جنبشی اولیه پرتابه ( $E_k$ ) برابر باشد، پرتابه در هدف متوقف می‌گردد.

در سرعت حد بالستیک، تمام انرژی جنبشی اولیه پرتابه توسط هدف جذب می‌شود و پرتابه هدف را به طور کامل سوراخ می‌کند. در واقع میزان فرورفتگی پرتابه برابر با ضخامت ورق ( $h$ ) می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن ضخامت موثر برای هدف، انرژی جذب شده توسط هدف در برخورد بالستیک ( $E_b$ ) برابر است با:

$$E_b = \pi h_e \sigma_t R^2 \left[ \alpha + \beta \sqrt{(\rho_t / \sigma_t) V_b} \right] \quad (۷)$$

که  $V_b$  سرعت حد بالستیک در برخورد پرتابه به هدف می‌باشد. با جایگذاری  $E_b = \frac{GV_b^2}{2}$  در رابطه فوق، مقدار سرعت حد بالستیک بدست می‌آید:

$$V_b = \frac{\pi \beta \sqrt{\rho_t \sigma_t} D^2 h_e}{4G} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{8\alpha G}{\pi \beta^2 \rho_t D^2 h_e}} \right] \quad (۸)$$

در رابطه فوق  $G$  جرم پرتابه است.

جدول ۳- مقادیر  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\xi$  برای هدف‌های فومی [۲۳]

نوع پرتابه	$\alpha$	$\beta$	$\xi$
سر تخت	$\frac{1}{2} \left[ 1 + \ln \frac{2E}{(5-4\nu)\sigma_y} \right]$	۲	-
سر کروی	$\frac{2}{3} \left[ 1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)\sigma_y} \right]$	۱/۵	۲
سر مخروطی	$\frac{1}{2} \left[ 1 + \ln \frac{2E}{(5-4\nu)\sigma_y} \right]$	$2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$	۰

بطوریکه  $E$  و  $\nu$  به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون هدف و همچنین  $\theta$  زاویه راس مخروط در پرتابه سر مخروطی است.

## ۲-۲- سوراخ شدن ورق با ضخامت محدود

در برخوردهای سرعت بالا، پرتابه در هدف نفوذ می‌کند، بطوریکه میزان نفوذ پرتابه به پارامترهای مختلفی از جمله سرعت اولیه، شکل پرتابه و جنس هدف بستگی دارد. به طور کلی، شکست و واماندگی هدف که ناشی از خرد شدن، تشکیل پلاگ<sup>۱</sup> و یا لایه لایه شدگی می‌باشد به خواص مواد و شرایط انجام تست بستگی دارد. در واقع، ضخامت موثر هدف ( $h_e$ ) کمتر از ضخامت واقعی آن می‌باشد:

$$h_e = H - \xi D \quad (۳)$$

بطوریکه  $D$  و  $H$  به ترتیب قطر پرتابه و ضخامت هدف می‌باشند. همچنین  $\xi \geq 0$  و به صورت تجربی مشخص می‌شود. مقادیر  $\xi$  برای اهداف و پرتابه‌های مختلف در جدول‌های ۱-۳ ذکر شده است.

همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است مقدار  $\xi$  برای پرتابه سر تخت در مراجع موجود ذکر نگردیده است. با استفاده از داده‌های تجربی موجود، مقدار  $\xi$  برای فوم-های آلومینیمی ۱/۵ و برای فوم‌های PVC برابر ۰ در نظر گرفته شده است.

نیروی مقاوم هدف در برابر نفوذ پرتابه برابر است با:

<sup>1</sup> Plugging

## ۳-۲- سوراخ شدن پانل ساندویچی

در برخورد بالستیک و با توجه به ساختار پانل ساندویچی، بخشی از انرژی جنبشی اولیه پرتابه توسط لایه‌هایی رویی و زیری و بخش دیگری توسط هسته جذب می‌شود. بنابراین انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی ( $E_{bs}$ ) برابر است با مجموع انرژی جذب شده توسط لایه‌ها ( $E_{skin}$ ) و هسته ( $E_{core}$ ):

$$E_{bs} = E_{skin} + E_{core} \quad (9)$$

با استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک پرتابه در برخورد با پانل ساندویچی ( $V_{bs}$ ) بدست می‌آید:

$$V_{bs} = \sqrt{\frac{2E_{bs}}{G}} \quad (10)$$

در برخورد با سرعت‌های بالاتر از سرعت حد بالستیک، پرتابه پس از سوراخ کردن هدف، با سرعت باقیمانده ( $V_{rs}$ ) از آن خارج می‌شود. با نظر گرفتن موازنه انرژی، انرژی جنبشی اولیه پرتابه برابر است با مجموع انرژی که صرف سوراخ شدن هدف می‌شود و انرژی جنبشی پرتابه هنگام خروج از هدف. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2}GV_i^2 = E_{bs} + \frac{1}{2}GV_{rs}^2 \quad (11)$$

با جایگذاری  $E_{bs} = 0.5GV_{bs}^2$  در رابطه فوق، سرعت باقیمانده پرتابه بدست می‌آید [۹]:

$$V_{rs} = (V_i^2 - V_{bs}^2)^{0.5} \quad (12)$$

در واقع، اثرات شکل دماغه پرتابه (سر تخت، سر کروی و سر مخروطی) بر سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده، با در نظر گرفتن ثابت تجربی  $\beta$  و اثرات جنس هدف (فوم، لایه‌های کامپوزیت یا آلومینیمی) با در نظر گرفتن ثابت تجربی  $\alpha$  در محاسبه جذب انرژی پانل اعمال شده است.

## ۳- نتایج

هدف اصلی مدل تحلیلی ارائه شده، تعیین سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده در برخورد پرتابه‌های مختلف (سر تخت، سر کروی و سر مخروطی) به پانل‌های ساندویچی آلومینیم-فوم و کامپوزیت-فوم می‌باشد. انرژی جنبشی پرتابه بعد از نفوذ به پانل کاهش می‌یابد و این در حالی است که انرژی کرنشی پانل در حال افزایش است. برای بررسی صحت نتایج مدل تحلیلی ارائه شده، نتایج حاصل از مدل برای پانل ساندویچی کامپوزیت-فوم با داده‌های تجربی مرجع [۱۷] و برای پانل آلومینیم-فوم با داده‌های تجربی مرجع [۲۲] مقایسه شده است. پس از صحت‌گذاری بر نتایج مدل ارائه شده، تاثیر پارامترهای مختلف در جذب انرژی پانل‌ها بررسی می‌شود.

## ۳-۱- ورق ساندویچی کامپوزیت-فوم

خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی و هسته فوم در جدول‌های ۴ و ۵ ذکر شده‌اند.  $E_{s1}$  مدول یانگ لمینیت کامپوزیتی در راستای الیاف می‌باشد. فوم PVC استفاده شده در پانل کامپوزیت-فوم از نوع Divinycell H130 می‌باشد.

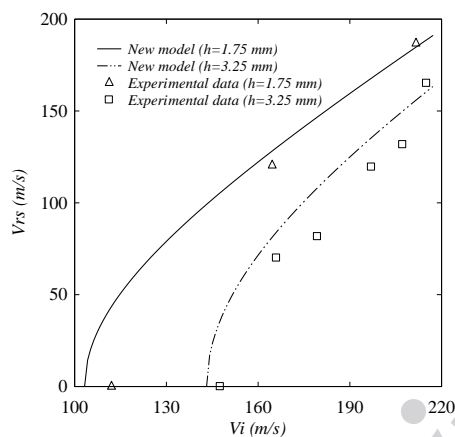
جدول ۴- خواص مکانیکی لایه‌های کامپوزیتی [۱۷]

نام ماده	$h$ (mm)	$E_{s1}$ (GPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_e$ (MPa)
E-glass/Vinyl ester	۱/۷۵	۲۴	۱۶۵۰	۲۲۵
	۳/۲۵			
	۷			

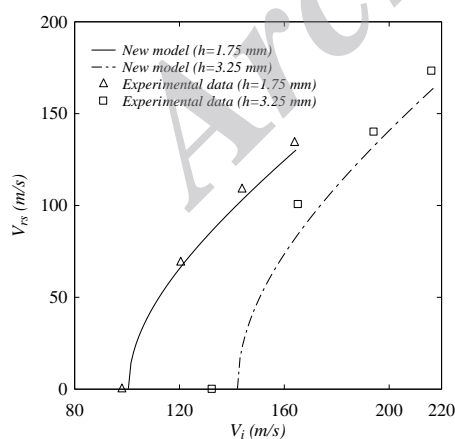
جدول ۵- خواص مکانیکی فوم PVC [۱۷]

نام ماده	$c$ (mm)	$E$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_Y$ (MPa)
Divinycell H130	۲۵	۱۷۵	۱۳۰	۲/۵

باشد [۱۷]. همانطور که از شکل‌های ۳-۵ مشخص است، مطابقت خوبی بین نتایج تحلیلی و داده‌های تجربی وجود دارد؛ اما با افزایش ضخامت لایه‌های کامپوزیتی و در برخورد پرتابه‌های سر تخت و سر کروی خطای مدل ارائه شده نیز افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۳-۵، با افزایش سرعت اولیه برخورد، سرعت باقیمانده نیز افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش ضخامت لایه‌های کامپوزیتی و با در نظر گرفتن سرعت اولیه یکسان برای لایه کامپوزیتی، سرعت باقیمانده‌ی پرتابه افزایش می‌یابد.



شکل ۳- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده‌ی پرتابه‌ی سر تخت بر حسب سرعت اولیه و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی [۱۷]



شکل ۴- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده‌ی پرتابه‌ی سر کروی بر حسب سرعت اولیه و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی [۱۷]

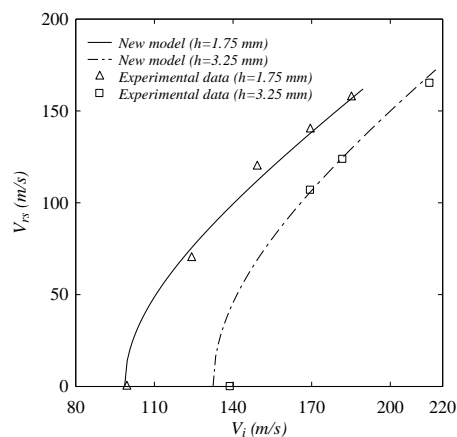
معمولاً نتایج حاصل از مدل تحلیلی و داده‌های تجربی در حد بالستیک دارای بیشترین خطا خواهد بود. بنابراین، به منظور صحت‌گذاری بر مدل تحلیلی نتایج این مدل در محاسبه‌ی سرعت حد بالستیک پانل کامپوزیت-فوم برای پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی در جدول ۷ ارائه و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. این نتایج برای پانل دارای لایه‌های کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف، هسته فوم به ضخامت ۲۵ mm و پرتابه فولادی به قطر ۱۰/۵ mm ارائه شده است. جرم پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی به ترتیب ۲۰/۴ g، ۱۷/۹ g و ۱۸/۷ g می‌باشد. همچنین زاویه‌ی راس پرتابه مخروطی برابر ۴۵° است. همان طور که در جدول ۶ مشخص است، مدل ارائه شده با دقت خوبی سرعت حد بالستیک را پیش‌بینی می‌کند، بطوریکه مقدار خطای مدل زیر ۸٪ است.

جدول ۶- مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های تجربی محققان دیگر [۱۷]

ردیف	h (mm)	حد بالستیک		خطا (%)
		تجربی (m/s)	تحلیلی (m/s)	
۱	۱/۷۵	۱۱۲/۰۵	۱۰۳/۲۴	۷/۸
	۳/۲۵	۱۴۷/۶	۱۴۳/۱۴	۳/۰۲
۲	۱/۷۵	۹۸/۰۴	۱۰۰/۴۷	۲/۴۷
	۳/۲۵	۱۳۲/۴۵	۱۴۲	۷/۲۱
۳	۱/۷۵	۹۹/۵	۹۸/۶۲	-۰/۸۸
	۳/۲۵	۱۳۸/۸۹	۱۳۲/۳۶	-۴/۷

همچنین تغییرات سرعت باقیمانده‌ی پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی بر حسب سرعت اولیه برخورد به پانل فوم-کامپوزیت، به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها، ضخامت هسته ۲۵ mm، قطر پرتابه ۱۰/۵ mm و ضخامت لایه‌ی کامپوزیتی متغیر می‌باشد. در داده‌های تجربی ضخامت لایه‌های کامپوزیتی به ترتیب برابر ۱/۷۵ mm و ۳/۲۵ mm می-

همچنین نتایج این مدل در محاسبه سرعت حد بالستیک پانل آلومینیم-فوم برای پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی در جدول ۹ ارائه و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. این نتایج برای پانل با لایه‌های آلومینیمی به ضخامت  $0.6 \text{ mm}$ ، هسته فوم به ضخامت  $25 \text{ mm}$  و پرتابه فولادی به قطر  $7.5 \text{ mm}$  ارائه شده است. زاویه‌ی راس پرتابه‌ی مخروطی برابر  $60^\circ$  است. همان طور که در جدول ۹ مشخص است، مدل ارائه شده با دقت خوبی سرعت حد بالستیک را پیش‌بینی می‌کند. همچنین نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که سرعت حد بالستیک برای پرتابه سر تخت بیشتر از پرتابه‌های سر کروی و سر مخروطی می‌باشد.



شکل ۵- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده‌ی پرتابه‌ی سر مخروطی بر حسب سرعت اولیه و مقایسه‌ی آن با داده‌های تجربی [۱۷]

### ۳-۲- ورق ساندویچی آلومینیم-فوم

خواص مکانیکی لایه‌های آلومینیمی و هسته فوم در جدول‌های ۷ و ۸ ذکر شده‌اند. از فوم آلومینیمی CYMAT™ با چگالی نسبی ۰.۱۸ (Al-Si(7-9%)-Mg(0.5-1%)) در ورق ساندویچی آلومینیم-فوم استفاده شده است.

جدول ۷- خواص مکانیکی لایه‌های آلومینیمی [۲۲]

نام ماده	$h$ (mm)	$E$ (GPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_Y$ (MPa)
AL-5005H34	۰/۶	۶۵/۰۴	۲۷۰۰	۱۲۳/۴۷
	۱	۶۲/۵۷	۲۷۰۰	۱۳۰/۵۱
	۲	۶۶/۶۹	۲۷۰۰	۱۲۹/۴۳

جدول ۸- خواص مکانیکی فوم آلومینیمی [۲۲]

نام ماده	$c$ (mm)	$E$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_Y$ (MPa)
Al-Si (7-9%)-Mg (0.5-1%)	۲۵	۵۰	۴۸۶	۴/۷۹

جدول ۹- مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های

تجربی محققان دیگر [۲۲]

نوع پرتابه	حد بالستیک		خطا (%)
	تجربی (m/s)	تحلیلی (m/s)	
سر تخت	۱۰۶/۲۸	۱۰۳/۰۴	-۳/۰۴
سر کروی	۱۰۰/۵۴	۱۰۲/۱۴	۱/۵۹
سر مخروطی	۹۴/۳۲	۱۰۰	۶/۰۲

مقایسه سرعت حد بالستیک محاسبه شده به روش تحلیلی با نتایج تجربی مرجع [۲۲] برای ضخامت‌های مختلف لایه آلومینیمی در جدول ۱۰ صورت گرفته است. این نتایج برای پرتابه‌ی فولادی سر کروی به قطر  $7.5 \text{ mm}$ ، پانل ساندویچی با هسته فوم به ضخامت  $25 \text{ mm}$  ارائه شده است. مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج مدل وجود دارد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه‌های آلومینیمی، سرعت حد بالستیک افزایش یافته است.



مختلف برای فوم آلومینیمی، به ترتیب در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ با داده‌های تجربی [۲۲] مقایسه شده‌اند. همانطور که مقایسه نتایج نشان می‌دهد مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج مدل تحلیلی وجود دارد. مطابق جدول ۱۰، با افزایش چگالی نسبی فوم آلومینیمی، سرعت حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱۱- مقایسه سرعت حد بالستیک مدل تحلیلی با داده‌های تجربی [۲۲] در چگالی نسبی‌های مختلف هسته فوم آلومینیمی

خطا	حد بالستیک تحلیلی (m/s)	حد بالستیک تجربی (m/s)	چگالی نسبی فوم آلومینیمی (%)
۱/۵۹	۱۰۲/۱۴	۱۰۰/۵۴	۰/۱۸
۲/۵	۱۰۱/۲۱	۹۸/۷۴	۰/۱۵

جدول ۱۲- مقایسه سرعت باقیمانده مدل تحلیلی با داده‌های تجربی [۲۲] در چگالی نسبی‌های مختلف هسته فوم آلومینیمی

خطا	سرعت باقیمانده تحلیلی (m/s)	سرعت باقیمانده تجربی (m/s)	سرعت اولیه (m/s)	چگالی نسبی فوم آلومینیمی (%)
۶/۳۱	۱۲۰/۴۶	۱۱۳/۳	۱۵۷/۷۳	۰/۱۸
-۸/۵	۵۰/۳۳	۵۵/۰۳	۱۱۳/۰۴	۰/۱۵

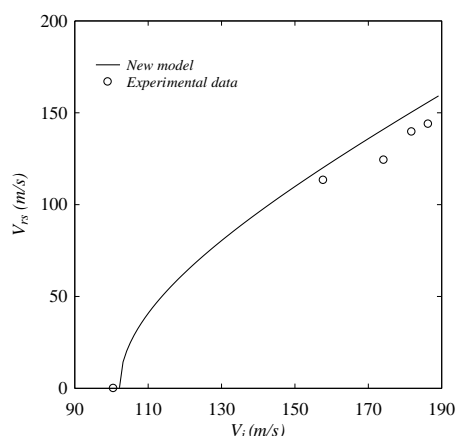
### ۳-۳- بررسی اثر نوع پرتابه و هدف

در این بخش، اثر نوع پرتابه و هدف در رفتار بالستیکی هدف به کمک مدل ارائه شده، بررسی می‌شود. تغییرات سرعت حد بالستیک و جذب انرژی پانل ساندویچی کامپوزیت-فوم بر حسب قطر پرتابه به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. همچنین در این شکل‌ها انواع پرتابه‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند، بطوریکه ضخامت لایه‌های کامپوزیتی ۲ mm، ضخامت هسته فوم ۲۵ mm و جرم پرتابه ۲۰ g در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۷ با افزایش قطر پرتابه و با ثابت در نظر گرفتن جرم آن،

جدول ۱۰- مقایسه سرعت حد بالستیک مدل تحلیلی با داده‌های تجربی [۲۲] در ضخامت‌های مختلف لایه‌های آلومینیمی

خطا	حد بالستیک تحلیلی (m/s)	حد بالستیک تجربی (m/s)	ضخامت لایه آلومینیمی (mm)
۲/۲۴	۱۹۶/۳۵	۱۹۲/۰۵	۲
۱/۲۴	۱۳۵/۵۹	۱۳۳/۹۲	۱
۱/۵۹	۱۰۲/۱۴	۱۰۰/۵۴	۰/۶

شکل ۶ منحنی تغییرات سرعت باقیمانده پرتابه در برخورد با پانل آلومینیم-فوم را بر حسب سرعت اولیه برخورد نشان داده و با نتایج تجربی مرجع [۲۲] مقایسه می‌کند. در این شکل ضخامت لایه‌های آلومینیمی mm ۰/۶، ضخامت فوم mm ۲۵ و پرتابه به صورت سر کروی ( $D=7/5$  mm) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج حاصل از مدل وجود دارد. همچنین مطابق این شکل با افزایش سرعت اولیه، سرعت باقیمانده پرتابه افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت اولیه پرتابه و مطابق رابطه (۶)، انرژی جذب شده توسط پانل نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۶- منحنی تغییرات سرعت باقیمانده پرتابه سر کروی بر حسب سرعت اولیه و مقایسه آن با داده‌های تجربی [۲۲]

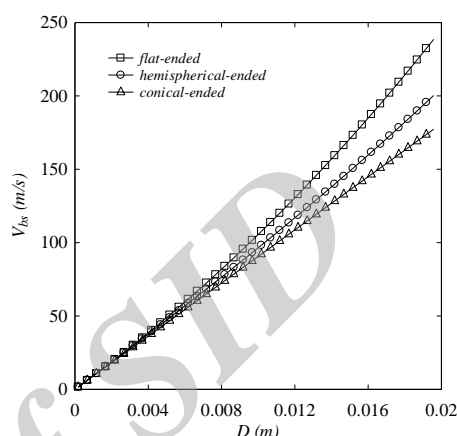
نتایج حاصل از مدل تحلیلی در محاسبه سرعت حد بالستیک و باقیمانده پرتابه، در برخورد پرتابه سر کروی به پانل آلومینیم-فوم با در نظر گرفتن چگالی نسبی‌های

با ثابت در نظر گرفتن جرم آن، انرژی جذب شده توسط پانل نیز افزایش می‌یابد. همچنین لایه‌های کامپوزیتی انرژی بیشتری نسبت به فوم جذب می‌کنند. چنانکه از شکل ۹ مشخص است، با افزایش زاویه مخروط پرتابه، هسته انرژی بیشتری را جذب می‌کند، ولیکن میزان افزایش جذب انرژی در مقایسه با انرژی جذب شده توسط لایه‌های رویی و زیری کامپوزیتی کم می‌باشد. مقدار جذب انرژی لایه‌ها، هسته و پانل کامپوزیت-فوم در برخورد پرتابه مخروطی و برای زوایای مخروط ۳۰ و ۶۰ درجه در جدول ۱۲ ارائه شده است. مطابق این جدول، در زاویه ۳۰ درجه، سهم فوم و لایه‌های کامپوزیتی از جذب انرژی پانل به ترتیب ۱۵/۳۲٪ و ۸۴/۶۸٪ می‌باشد. همچنین در زاویه ۶۰ درجه، فوم و لایه‌های کامپوزیتی به ترتیب ۱۴/۸٪ و ۸۵/۲٪ از میزان جذب انرژی پانل را جذب می‌کنند. بنابراین مطابق شکل ۹ و جدول ۱۳ مشخص است، با افزایش زاویه مخروط پرتابه، هسته انرژی بیشتری را جذب می‌کند، اما سهم آن در جذب انرژی پانل کم می‌شود. همچنین، با افزایش زاویه مخروط پرتابه، لایه‌ها انرژی بیشتری را جذب می‌کنند و سهم آن نیز در جذب انرژی پانل افزایش می‌یابد.

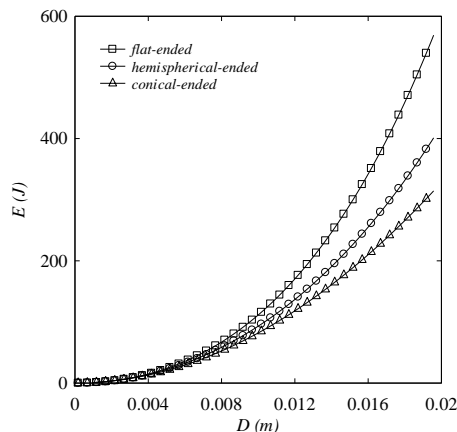
جدول ۱۳- بررسی جذب انرژی لایه‌ها، هسته و پانل کامپوزیت-فوم در برخورد پرتابه سر مخروطی.

زاویه مخروط (درجه)	انرژی جذب لایه‌ها (J)	انرژی جذب هسته (J)	انرژی جذب شده توسط پانل (J)
۳۰	۱۸/۵۶	۳/۳۶	۲۱/۹۳
۶۰	۹۹/۰۳	۱۷/۲۱	۱۱۶/۲۴

سرعت حد بالستیک و انرژی جذب شده توسط پانل نیز افزایش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن قطر برابر برای پرتابه‌ها، بیشترین سرعت حد بالستیک و جذب انرژی، به ترتیب به پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی تعلق دارد.



شکل ۷- منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب قطر پرتابه برای کامپوزیت-فوم و مقایسه پرتابه‌ها با یکدیگر



شکل ۸- منحنی تغییرات جذب انرژی پانل کامپوزیت-فوم بر حسب قطر پرتابه و مقایسه پرتابه‌ها با یکدیگر

شکل ۹ منحنی تغییرات انرژی جذب شده توسط پانل کامپوزیت-فوم را بر حسب زاویه مخروط پرتابه سر مخروطی نشان می‌دهد. در این شکل ضخامت لایه‌های رویی و زیری برابر ۱/۷۵ mm، ضخامت هسته ۲۵ mm، جرم پرتابه ۱۸ g و ارتفاع قسمت مخروطی ۱۰ mm می‌باشند. مطابق این شکل، با افزایش زاویه مخروط پرتابه و

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه‌ی سرعت حد بالستیک، سرعت باقیمانده و انرژی جذب شده توسط لایه‌های مختلف صفحات ساندویچی کامپوزیت-فوم و آلومینیم-فوم ارائه شده است. در مدل تحلیلی، واماندگی لایه‌های رویی و زیری و هسته فوم بر اساس فشار مقاومتی در نظر گرفته شده است.

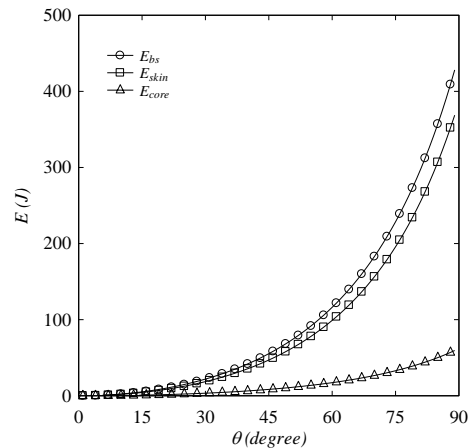
مقادیر سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده‌ی محاسبه شده به روش تحلیلی هم در پانل کامپوزیت-فوم و هم در پانل آلومینیم-فوم، هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد. از ویژگی‌های مدل تحلیلی، سادگی معادلات حاکم و نحوه‌ی حل آن‌ها می‌باشد.

در پانل آلومینیم-فوم، با افزایش چگالی نسبی فوم آلومینیمی، سرعت حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد.

هم در پانل کامپوزیت-فوم و هم در پانل آلومینیم-فوم، با در نظر گرفتن قطر برابر برای پرتابه‌ها، بیشترین سرعت حد بالستیک و جذب انرژی، به ترتیب به پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی تعلق دارد.

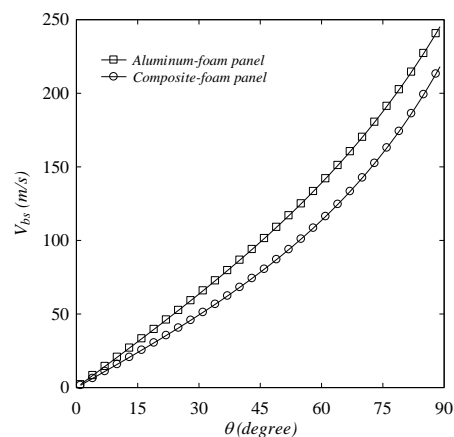
در برخورد بالستیک به پانل کامپوزیت-فوم با افزایش قطر پرتابه و با ثابت بودن جرم پرتابه، شکل دماغه پرتابه نیز در جذب پانل مؤثرتر می‌شود. بطوریکه در قطرهای کم، جذب انرژی پانل در برخورد پرتابه‌های سر تخت، سر کروی و سر مخروطی تقریباً به هم نزدیک است؛ اما با افزایش قطر پرتابه اختلاف جذب انرژی پانل در برخورد پرتابه‌ها نیز افزایش می‌یابد.

در برخورد پرتابه سر مخروطی به پانل کامپوزیت-فوم، با افزایش زاویه مخروط پرتابه و با ثابت در نظر گرفتن جرم آن، انرژی جذب شده توسط پانل نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش زاویه مخروط پرتابه، هسته انرژی بیشتری را جذب می‌کند، اما میزان افزایش جذب انرژی در مقایسه با انرژی جذب شده توسط لایه‌های رویی و زیری کامپوزیتی کم می‌باشد.



شکل ۹- منحنی تغییرات جذب انرژی پانل کامپوزیت-فوم بر حسب زاویه راس مخروط پرتابه سر مخروطی

شکل ۱۰ تغییرات سرعت حد بالستیک را بر حسب تغییرات زاویه‌ی مخروط برای پانل‌های آلومینیم-فوم و کامپوزیت-فوم نشان می‌دهد. در این شکل ضخامت لایه‌های رویی و زیری برابر  $1/75$  mm، ضخامت هسته  $25$  mm، جرم پرتابه  $18$  g و ارتفاع قسمت مخروطی  $10$  mm می‌باشند. مطابق این شکل، با افزایش زاویه‌ی راس سر مخروطی پرتابه و با فرض ثابت بودن جرم و ارتفاع قسمت مخروطی پرتابه، هم در پانل آلومینیم-فوم و هم کامپوزیت-فوم، سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. همچنین مطابق این شکل در شرایط یکسان، سرعت حد بالستیک پانل آلومینیم-فوم بیشتر از کامپوزیت-فوم می‌باشد. در واقع پانل آلومینیم-فوم انرژی بیشتری را نسبت به پانل کامپوزیت-فوم جذب می‌کند.



شکل ۱۰- منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب زاویه راس مخروط برای پانل‌های آلومینیم-فوم و کامپوزیت-فوم

- در برخورد پرتابه سر مخروطی به ورق‌های ساندویچی آلومینیم-فوم و هم کامپوزیت-فوم، با افزایش زاویه‌ی راس سرمخروطی پرتابه و با فرض ثابت بودن جرم و ارتفاع قسمت مخروطی پرتابه، سرعت حد بالستیک افزایش می‌یابد. همچنین در شرایط یکسان، سرعت حد بالستیک پانل آلومینیم-فوم بیشتر از کامپوزیت-فوم می‌باشد. در واقع پانل آلومینیم-فوم انرژی بیشتری را نسبت به پانل کامپوزیت-فوم جذب می‌کند.

## ۵- مراجع

- [1] Backman, M.E., Goldsmith, W. (1978). "The mechanics of penetration of projectiles into targets". *International Journal of Engineering Science*, Vol. 16, pp. 1-99.
- [2] Corbett, G.G., Reid, S.R., Johnson, W. (1996). "Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, pp. 141-230.
- [3] Forrestal, M.J., Okajima, K., Luk, V.K. (1988). "Penetration of 6061-T651 aluminum targets with rigid long rods". *Applied Mechanics*, Vol. 55, pp. 755-760.
- [4] Forrestal, M.J., Luk, V.K., Brar, N.S. (1990). "Perforation of aluminum armor plates with conical-nose projectiles". *Mechanics of Materials*, Vol. 10, pp. 97-105.
- [5] Hoo Fatt, M.S., Lin, C. (2004). "Perforation of clamped, woven E-glass/polyester panels". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 35, pp. 359-378.
- [6] Naik, N.K., Doshi, A.V. (2008). "Ballistic impact behaviour of thick composites: Parametric studies". *Composite Structures*, Vol. 82, pp. 447-464.
- [7] Naik, N.K., Shrirao, P., Reddy, B.C.K. (2005). "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Parametric studies". *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 412, pp. 104-116.
- [8] Nemes, J.A., Eskandari, H., Rakitch, L. (1998). "Effect of laminate parameters on penetration of graphite/epoxy composites". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, pp. 97-112.
- [9] Wu, Q.G., Wen, H.M., Qin, Y., Xin, S.H. (2012). "Perforation of FRP laminates under impact by flat-nosed projectiles". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, pp. 221-227.
- [۱۰] لیاقت، غ.م.، هدایت رسا، س.، شانظری، ه. (۱۳۸۳)، تحلیل نفوذ پرتابه در پانلهای کامپوزیتی پلیمری (FRP) و ارائه مدل جدید، نشریه علمی و پژوهشی امیر کبیر، سال ۱۵، شماره (ب-۶۰).
- [۱۱] پل، م.ح.، لیاقت، غ.م.، صدیقی، م. (۱۳۹۱)، تحلیل تئوری فرآیند نفوذ پرتابه‌های سر تخت در مواد مرکب شیشه/اپوکسی، نشریه علمی و پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، سال ۱۲، شماره ۲.
- [۱۲] رادمهر، د.، لیاقت، غ.م.، فعلی، س. (۱۳۹۰)، تحلیل فرآیند نفوذ مایل پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی چند لایه، نشریه علمی و پژوهشی مواد پراورزی، سال ۶، شماره ۱.
- [13] Vaidya, U.K., Pillay, S., Bartus, S., Ulven, C.A., Grow, D.T., Mathew, B. (2006). "Impact and post-impact vibration response of protective metal foam composite sandwich plates". *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 428, pp. 59-66.
- [14] Hoo Fatt, M.S., Sirivolu, D. (2010). "A wave propagation model for the high velocity impact response of a composite sandwich panel". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 117-130.
- [۱۶] جعفری، س.س.، فعلی، س. (۱۳۹۱)، تحلیل سوراخ شدن ورق‌های ساندویچی کامپوزیت-فوم تحت برخورد پرتابه با دماغه مسطح، نشریه علمی و پژوهشی مواد پراورزی، سال ۷، شماره ۳.
- [16] Feli, S., Namdari Pour, M.H. (2012). "An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact". *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, pp. 2439-2447.

- [17] Wen, H., Reddy, T., Reid, S., Soden, P. (1997). "Indentation, penetration and perforation of composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading". *Key Engineering Materials*, Vol. 141, pp. 501-552.
- [18] Sabouri, H., Liaghat, G.H. (2010). "Comments on the article: "Ballistic impact of GLARE™ fiber-metal laminates", by Michelle S. Hoo Fatt, Chunfu Lin, Duane M. Revilock Jr., Dale A. Hopkins [*Composite Structures* 61 (2003) 73–88]". *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 600-601.
- [19] Mamivand, M., Liaghat, G.H. (2010). "A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 806-812.
- [20] Zhao, H., Elnasri, I., Girard, Y. (2007). "Perforation of aluminium foam core sandwich panels under impact loading—An experimental study". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 1246-1257.
- [21] Hanssen, A.G., Girard, Y., Olovsson, L., Berstad, T., Langseth, M. (2006). "A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, pp. 1127-1144.
- [22] Hou, W., Zhu, F., Lu, G., Fang, D. N. (2010) "Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 1045-1055.
- [23] Wen, H.M. (2002). "Predicting the penetration and perforation of targets struck by projectiles at normal incidence\*". *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 30, pp. 543-577.
- [24] Wen, H.M. (2000). "Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes". *Composite Structures*, Vol. 49, pp. 321-329.