



بررسی تحلیلی سوراخ شدن ورق‌های ساندویچی آلومینیوم- فوم تحت اثر ضربه بالستیک

سعید فعلی^{۱*}، سید سجاد جعفری^۲

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

* کرمانشاه، کد پستی ۶۷۱۴۹، felisaeid@razi.ac.ir

چکیده- هدف این مقاله ارائه روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه میزان جذب انرژی ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-فوم تحت اثر ضربه بالستیک پرتابه می‌باشد. ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-فوم دارای هسته از جنس فوم است که بین دو صفحه فلزی آلومینیومی، محصور شده است. ضربه زننده به دو صورت پرتابه استوانه‌ای سر تخت و سر کروی در نظر گرفته شده است. در مدل تحلیلی فرض شده است که لایه‌های فلزی بر اثر فشار مقاومتی متوسط دچار واماندگی شوند. همچنین فوم نیز به واسطه خرد شدن بخشی از انرژی پرتابه را جذب می‌کند. جذب انرژی توسط ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-فوم 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 جرم و قطر پرتابه در میزان جذب انرژی ساندویچ پانل بررسی شده است.

کلیدواژه‌گان: ورق ساندویچی، فوم، آلومینیوم، سوراخ شدن.

Analytical investigation of perforation of aluminum-foam sandwich panels under ballistic impact

S. Feli^{1*}, S. S. Jafari²

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran

2- MSc. Student, Mech. Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran

* P. O. B. 67149 Kermanshah, Iran. felisaeid@razi.ac.ir

Abstract- In this paper, a new analytical model has been presented for energy absorption of aluminum-foam sandwich panels under ballistic impact. The panels consist of foam core sandwiched between two aluminum skins. In analytical model two types of sticker including cylindrical projectile with flat and hemispherical ended have been considered. It is supposed that aluminum skins failure by mean resistive pressure. Also foam absorbed a partial of projectile energy by crushing. Energy absorption of aluminum-foam sandwich panel is calculated and energy balancing equation has been employed for determination the ballistic limit and residual velocity of projectiles. The results of ballistic limit and residual velocity computed by new model have good agreement with experimental results. Also the effects of projectile mass and diameter in energy absorption of sandwich panel has been investigated.

Keywords: Sandwich Panel, Foam, Aluminum, Perforation.

صورت گرفته است. بیشتر کارهای انجام شده در این زمینه،
تجربی بوده و با توجه به پیچیدگی معادلات حاکم، کارهای

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر مطالعات بسیاری بر روی برخورد و نفوذ پرتابه

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- هانی‌کامب و آلومینیوم- فوم اشاره نمود.

هوفت و سیرولو [۱۴] با استفاده از مدل انتشار امواج تنش، سرعت باقیمانده پرتابه با دماغه کروی، در برخورد به پانل ساندویچی کامپوزیت- فوم را تعیین کردند. همچنین، فرایند برخورد سرعت بالا به پانل ساندویچی را در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی نمودند.

ایوانز و همکاران [۱۵] برخورد پرتابه کروی به پانل‌های ساندویچی کامپوزیت- فوم، را در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی کردند. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش سرعت اولیه، سرعت باقیمانده پرتابه نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت اولیه، انرژی جذب شده توسط فوم کاهش می‌یابد. فعلی و نامداری‌پور [۱۶] یک مدل تحلیلی جدید برای سوراخ شدن پانل ساندویچی کامپوزیت- هانی‌کامب ارائه دادند. آنها سوراخ شدن پانل را در سه مرحله، شامل سوراخ شدن صفحه بالایی، سوراخ شدن هانی‌کامب 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.

صبوری و لیاقت [۱۷] فرمول‌بندی جدیدی برای محاسبه انرژی کرنشی و پاسخ استاتیکی و دینامیکی لایه‌های فلز- کامپوزیت ارائه کردند. ممیوند و لیاقت [۱۸] مدل تحلیلی برای حد بالستیک دو بعدی کامپوزیت‌های بافته شده ارائه کردند. اثرات ابعاد هدف در عملکرد بالستیک مجموعه نیز بررسی شده است. ژائو و همکاران [۱۹] برخورد شبه‌استاتیکی پرتابه سر کروی به ساندویچ پانل‌های آلومینیوم- فوم را به صورت تجربی بررسی و روند تغییرات نیرو بر حسب جابجایی را ثبت کردند. هانسن و همکاران [۲۰] برخورد پرتابه به پانل آلومینیوم- فوم را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. تحلیل عددی به کمک نرم‌افزار ال‌اس داینال انجام شده است. هو و همکاران [۲۱] برخورد سرعت بالا به پانل آلومینیوم- فوم را به صورت تجربی بررسی کردند. آنها اثرات شکل پرتابه را نیز بررسی نمودند. بررسی و تحلیل نفوذ بالستیک پرتابه‌ها در ورق‌های

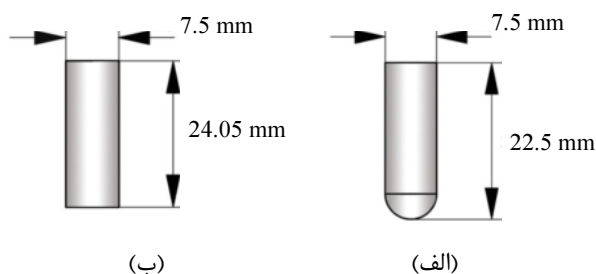
تحلیلی کمی در این زمینه ارائه شده است. جنس هدف تأثیر زیادی در جذب انرژی دارد و اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه در مورد اهداف فلزی و کامپوزیتی است. در زمینه اهداف فلزی، بکمن و گلداسمیت [۱] و کوریت و همکاران [۲] بررسی کاملی از مکانیک نفوذ پرتابه‌ها ارائه نموده و بیشتر تحقیقات تجربی و تحلیلی انجام شده در این زمینه را جمع‌آوری کرده و مورد بحث و بررسی قرار دادند.

فورستال و همکاران [۳] نفوذ پرتابه در آلیاژهای آلومینیوم را به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. آنها با استفاده از معادلات حرکت، معادلات حاکم در این فرایند را به دست آوردند و اثرات شکل دماغه پرتابه استوانه‌ای را در فرایند نفوذ و سوراخ شدن اهداف فلزی بررسی کردند. فورستال و همکاران [۴] برخورد بالستیک پرتابه دماغه مخروطی را در اهداف فلزی با ضخامت‌های مختلف به صورت تجربی بررسی کردند. همچنین فورستال و همکاران [۵] نفوذ پرتابه با دماغه کروی در اهداف فلزی را با در نظر گرفتن اصطکاک، به صورت تحلیلی بررسی کردند. بررسی اهداف کامپوزیتی نیز به دلیل وزن پایین و مقاومت زیاد، توسط محققان مختلف [۶-۱۰] انجام شده است. پاتل و همکاران [۱۱] نفوذ پرتابه با دماغه مخروطی در لمینیت‌های کولار/اپوکسی را با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کردند. معادلات حاکم بر اساس تئوری برشی مرتبه اول (FSDT) در نظر گرفته شده است. نتایج این بررسی نشان داد که سرعت حد بالستیک با ضخامت لمینیت رابطه خطی دارد.

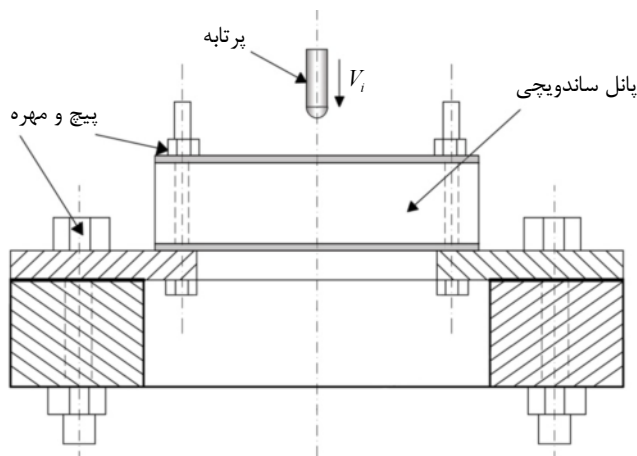
یل و همکاران [۱۲] برخورد بالستیک مواد مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی را به صورت تحلیلی بررسی کردند. آنها در این تحلیل، از روش انرژی و تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای زمانی کوچک استفاده کردند. همچنین پرتابه به صورت سر تخت در نظر گرفته شده است. با تقویت اهداف به وسیله مواد دیگر، تحقیقات وارد مرحله جدیدی شد. چند لایه کردن اهداف فلزی، میزان جذب انرژی اهداف را بالا می‌برد. رادمهر و همکاران [۱۳] 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 فرایند در نه مرحله بررسی شده است.

بررسی سازه‌های ساندویچی برای جذب انرژی بیشتر و

شکل ۲ ابعاد پرتابه‌های فولادی استفاده شده در تحلیل را نشان می‌دهد. همچنین برخورد پرتابه سر کروی به پانل ساندویچی در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۱].



شکل ۲ ابعاد هندسی پرتابه الف- سر کروی ب- سر تخت



شکل ۳ برخورد پرتابه سر کروی به پانل ساندویچی

۲-۱- فشار مقاومتی

فشار متوسطی (σ) که ورق رویی با ضخامت محدود، برای مقابله با نفوذ پرتابه و سوراخ شدن به پرتابه اعمال می‌کند شامل دو بخش است: فشار مقاومتی الاستاتیکی (σ_s) که ناشی از تغییر شکل‌های الاستیک-پلاستیک هدف می‌باشد و فشار مقاومتی دینامیکی (σ_d) که اثرات سرعت را در نظر می‌گیرد.

بنابراین:

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

با در نظر گرفتن $\sigma_s = \gamma \sigma_t$ و $\sigma_d = \lambda (\rho_t / \sigma_t)^{0.5} V_i$ رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۲]:

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

ساندویچی فلز-فوم موضوع جدیدی است که تاکنون به روش تحلیلی بررسی نشده است و بیشتر کارهای انجام شده در این خصوص به صورت تجربی و عددی می‌باشد.

در این مقاله فرآیند نفوذ و سوراخ شدن صفحات ساندویچی آلومینیوم- فوم تحت اثر برخورد پرتابه‌های سر تخت و سر کروی می‌باشند، به صورت تحلیلی بررسی شده است. به طوری که هسته فوم از جنس فوم و لایه‌های بالایی و پایینی از جنس آلومینیوم می‌باشند. با تعیین انرژی‌های جذب شده توسط پانل ساندویچی، طی فرآیند نفوذ پرتابه و استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه محاسبه می‌شود. از ویژگی‌های مدل تحلیلی، بررسی اثرات شکل پرتابه و سادگی معادلات حاکم و روش حل مسأله می‌باشد، به نحوی که با سادگی معادلات نتایج مدل هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد.

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 صرف تغییر شکل هدف شده و انرژی کرنشی هدف افزایش می‌یابد. شکل ۱ نحوه قرارگیری آلومینیوم و فوم و برخورد پرتابه سر تخت به پانل آلومینیوم- فوم نشان می‌دهد. فرضیات زیر برای ارائه مدل تحلیلی در نظر گرفته شده‌اند:

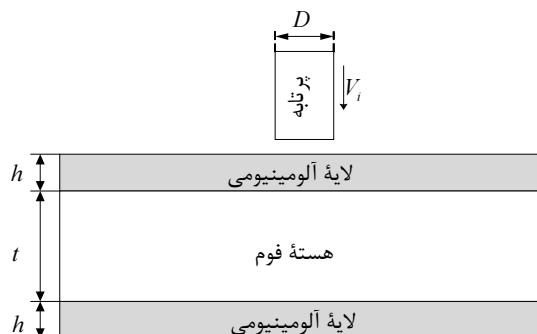
۱- پرتابه صلب است و در طی فرآیند نفوذ بدون تغییر

شکل باقی می‌ماند.

۲- در مورد پرتابه سر کروی، دماغه پرتابه کاملاً در هدف

نفوذ کرده است.

۳- مرزهای پانل در تمام جهتها مقید شده است.



شکل ۱ برخورد پرتابه‌ی سر تخت به پانل ساندویچی

در این رابطه R شعاع پرتابه است. بنابراین انرژی جذب شده توسط ورق آلومینیومی برابر است با:

$$E_{abs} = \int_0^\alpha F d\alpha = \pi \sigma_y R^2 \left[\gamma + \lambda \sqrt{(\rho_l / \sigma_y)} V_i \right] \quad (5)$$

α میزان فرورفتگی پرتابه در آلومینیوم است. 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 می‌شود.

در سرعت حد بالستیک، تمام انرژی جنبشی اولیه پرتابه توسط هدف جذب می‌شود و پرتابه ورق آلومینیومی را به طور کامل سوراخ می‌کند. در واقع میزان فرورفتگی پرتابه برابر با ضخامت ورق (h) می‌باشد. بنابراین انرژی جذب شده توسط ورق آلومینیومی (E_{AL}) برابر است با:

$$E_{AL} = \pi \sigma_y R^2 \left[\gamma + \lambda \sqrt{(\rho_l / \sigma_y)} V_b \right] \quad (6)$$

که V_b سرعت حد بالستیک در برخورد پرتابه به اهداف آلومینیومی است. با جایگذاری $E_k = GV_b^2 / 2$ در رابطه فوق، مقدار سرعت حد بالستیک به دست می‌آید:

$$V_b = \frac{\pi \lambda \sqrt{\rho_l \sigma_y} D^2 h}{4G} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{8\gamma G}{\pi \lambda^2 \rho_l D^2 h}} \right] \quad (7)$$

در رابطه فوق G جرم پرتابه می‌باشد.

۲-۲-۲-۲- نفوذ پرتابه در فوم

در اثر برخورد پرتابه به پانل ساندویچی، بخشی از انرژی جنبشی پرتابه توسط فوم جذب می‌شود. در واقع انرژی جنبشی پرتابه توسط خرد شدن فوم جذب می‌شود. انرژی جذب شده توسط فوم در بارگذاری شبه‌استاتیکی (E_{FS}) توسط پرتابه سر تخت از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$E_{FS} = \pi KR^2 t \sigma_c \varepsilon_d \quad (8)$$

در رابطه (۸)، ε_d کرنش تراکمی فوم، σ_c استحکام فشاری فوم، t ضخامت فوم و K ثابت تجربی است که در این مقاله برابر ۲/۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۴]. در واقع به کمک این ضریب، میزان افزایش استحکام نهایی هدف که ناشی از تغییر شکل ناحیه اطراف محل اصابت پرتابه می‌باشد، اعمال شده است.

لین و هوفت [۲۵] برای پرتابه سر کروی شعاع معادلی به صورت $R_e = 0.4 R$ تعریف کردند. با جایگذاری این شعاع

که ρ_l و σ_l به ترتیب استحکام شبه‌استاتیکی و چگالی هدف می‌باشند. همچنین V_i سرعت اولیه پرتابه می‌باشد. γ و λ 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.

برای فلزات، استحکام شبه‌استاتیکی برابر تنش تسلیم (σ_y) در نظر گرفته می‌شود. رابطه بین γ و خواص مکانیکی هدف و همچنین مقدار λ در جدول ۱ ذکر شده است. E و ν به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون هدف می‌باشند.

۲-۲-۲-۲- نفوذ پرتابه در هدف

در برخوردهای سرعت بالا، پرتابه در هدف نفوذ می‌کند، به طوری که میزان نفوذ پرتابه به پارامترهای مختلفی مانند سرعت اولیه پرتابه و جنس هدف بستگی دارد. با توجه به این که پانل‌های ساندویچی از دو بخش لایه و هسته تشکیل شده‌اند، نفوذ پرتابه در هر یک از این بخش‌ها به صورت جداگانه بررسی می‌شود.

۲-۲-۲-۱- نفوذ پرتابه در لایه آلومینیومی

در برخورد پرتابه به پانل ساندویچی، قسمتی از انرژی جنبشی پرتابه توسط لایه‌های پانل جذب می‌شود. نیروی مقاوم لایه آلومینیومی در برابر نفوذ پرتابه برابر است با:

$$F = \sigma A \quad (3)$$

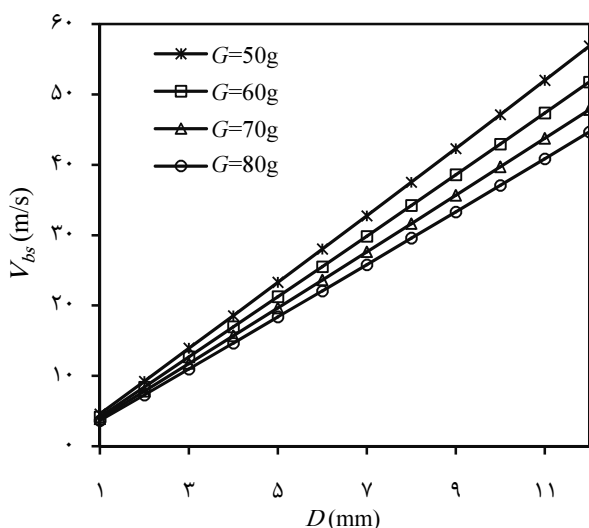
که σ فشار متوسط اعمالی به پرتابه می‌باشد و از رابطه (۲) به دست می‌آید. همچنین A سطح مقطع جانبی پرتابه است باشد و با توجه به فرض ۲، می‌توان نوشت:

$$A = \pi R^2 \quad (4)$$

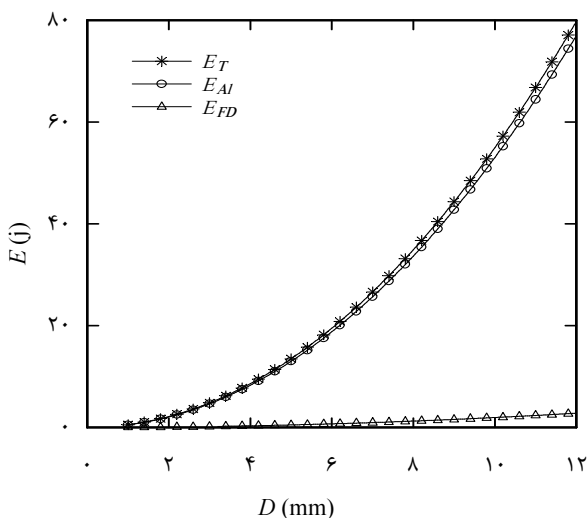
جدول ۱ مقادیر γ و λ برای اهداف فلزی [۲۲]

نوع پرتابه	γ	λ
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

شکل ۵ منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب تغییرات قطر پرتابه سر کروی و برای جرم‌های مختلف پرتابه را نشان می‌دهد. در این شکل $h = 0.16 \text{ mm}$ و $t = 2.5 \text{ mm}$ می‌باشند. مطابق شکل ۵ با افزایش قطر پرتابه و با ثابت در نظر گرفتن جرم آن، حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. همچنین با در نظر گرفتن قطر ثابت با افزایش جرم پرتابه، سرعت حد بالستیک کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش جرم پرتابه، انرژی جنبشی اولیه پرتابه نیز افزایش می‌یابد در نتیجه پانل ساندویچی سریع‌تر دچار شکست می‌شود و انرژی کمتری را جذب می‌کند. شکل ۶ منحنی تغییرات انرژی جذب شده توسط پانل را بر حسب تغییرات قطر پرتابه سر کروی نشان می‌دهد.



شکل ۵ منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک پرتابه‌ی سر کروی بر حسب قطر پرتابه



شکل ۶ منحنی تغییرات انرژی جذب شده توسط پانل بر حسب قطر پرتابه

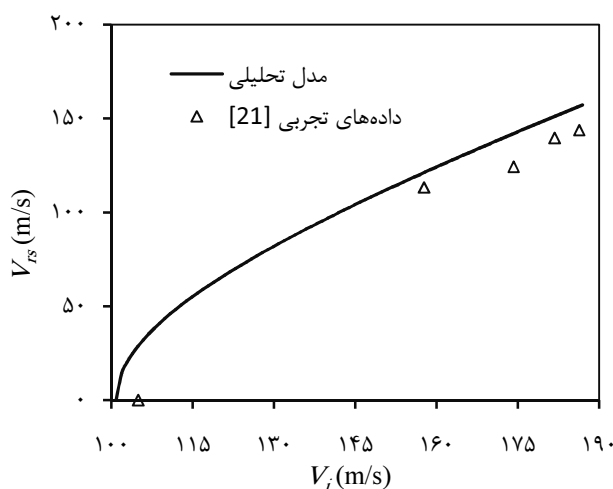
جدول ۴ مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های تجربی محققان دیگر [۲۱]

نوع پرتابه	حد بالستیک تجربی (m/s)	حد بالستیک تحلیلی (m/s)
سر تخت	۱۰۶/۲۸	۱۰۱/۸۲
سر کروی	۱۰۰/۵۴	۱۰۱/۴۷

جدول ۵ مقایسه سرعت حد بالستیک مدل تحلیلی با داده‌های تجربی [۲۱] در ضخامت‌های مختلف لایه‌های آلومینیومی و در برخورد پرتابه سر کروی

ضخامت لایه آلومینیومی (mm)	حد بالستیک تجربی (m/s)	حد بالستیک تحلیلی (m/s)
۲	۱۹۲/۰۵	۱۹۶
۱	۱۳۳/۹۲	۱۳۵/۰۸
۰/۶	۱۰۰/۵۴	۱۰۱/۴۷

شکل ۴ منحنی تغییرات سرعت باقی‌مانده پرتابه را بر حسب سرعت اولیه برخورد نشان داده و با نتایج تجربی مرجع [۲۱] مقایسه می‌کند. در این شکل $h = 0.16 \text{ mm}$ و $t = 2.5 \text{ mm}$ و پرتابه به صورت سر کروی ($D = 7/5 \text{ mm}$) 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 (۵)، انرژی جذب شده توسط پانل نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴ منحنی تغییرات سرعت باقی‌مانده پرتابه سر کروی بر حسب سرعت اولیه و مقایسه آن با داده‌های تجربی [۲۱]

شود، هدف دچار شکست می‌شود. برای بررسی صحت نتایج مدل تحلیلی ارائه شده، نتایج حاصل از مدل با داده‌های تجربی مرجع [۲۱] مقایسه شده است. خواص مکانیکی لایه‌های آلومینیومی و فوم در جدول‌های ۲ و ۳ ذکر شده‌اند.

جدول ۲ خواص مکانیکی لایه‌های زیری و رویی آلومینیومی [۲۱]

نام ماده	h (mm)	E (GPa)	σ_Y (MPa)
	۰/۶	۶۵/۰۴	۱۲۲/۴۷
AL-5005H34	۱	۶۲/۵۷	۱۳۰/۵۱
	۲	۶۶/۶۹	۱۲۹/۴۳

جدول ۳ خواص مکانیکی فوم [۲۱]

نام ماده	σ_c (MPa)	ϵ_d
Al-Si (7-9%)-Mg (0.5-1%)	۲/۸۲	۰/۳۵

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 محاسبه سرعت حد بالستیک برای پرتابه‌های سر تخت و سر کروی در جدول ۴ ارائه و با داده‌های تجربی مقایسه شده است. این نتایج برای پانل با لایه‌های آلومینیومی به ضخامت ۰/۶ mm هسته فوم به ضخامت ۲۵ mm و پرتابه فولادی به قطر ۷/۵ mm ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است، مدل ارائه شده با دقت خوبی سرعت حد بالستیک را پیش‌بینی می‌کند. همچنین نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که سرعت حد بالستیک برای پرتابه سر تخت بیشتر از پرتابه سر کروی است.

مقایسه سرعت حد بالستیک محاسبه شده به روش تحلیلی با نتایج تجربی مرجع [۲۱] برای ضخامت‌های مختلف لایه آلومینیومی در جدول ۵ صورت گرفته است. این نتایج برای پرتابه فولادی سر کروی به قطر ۷/۵ mm، پانل ساندویچی با هسته فوم به ضخامت ۲۵ mm ارائه شده است. مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج مدل وجود دارد. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه‌های آلومینیومی، سرعت حد بالستیک افزایش یافته است.

معادل در رابطه (۸)، انرژی جذب شده توسط فوم در بارگذاری شبه‌استاتیکی (E_{FS}) که تحت برخورد پرتابه سر کروی می‌باشد، به دست می‌آید.

مطابق مشاهدات تجربی [۲۲]، انرژی جذب شده توسط فوم در بارگذاری دینامیکی (E_{FD})، برابر بارگذاری شبه‌استاتیکی است (رابطه (۹)).

$$E_{FD} = 2.5E_{FS} \quad (9)$$

۲-۲-۳- انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی آلومینیوم-فوم

در قسمت‌های قبلی انرژی جذب شده توسط لایه آلومینیومی و فوم محاسبه شد. بنابراین انرژی جذب شده توسط پانل از مجموع معادلات (۶) و (۹) به دست می‌آید:

$$E_T = 2E_{Al} + E_{FD} \quad (10)$$

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

$$V_{bs} = \sqrt{\frac{2E_T}{G}} \quad (11)$$

در صورتی که سرعت اولیه پرتابه از حد بالستیک بیشتر باشد، قسمتی از انرژی پرتابه توسط هدف جذب شده و پرتابه با سرعت کمتری نسبت به سرعت اولیه از هدف خارج می‌شود. با نظر گرفتن موازنه انرژی، سرعت باقیمانده پرتابه (V_{rs})، از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

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

در واقع، اثرات شکل دماغه پرتابه (سر کروی و سر تخت) بر سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده، با در نظر گرفتن ثابت تجربی λ در محاسبه جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی و شعاع معادل $R_e = 0.4R$ برای پرتابه سر کروی در محاسبه جذب انرژی هسته فوم، اعمال شده است.

۳- نتایج

هدف اصلی مدل تحلیلی ارائه شده، تعیین سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده در برخورد پرتابه سر تخت و سر کروی به پانل‌های ساندویچی آلومینیوم-فوم است. انرژی جنبشی پرتابه بعد از نفوذ به پانل کاهش می‌یابد و این در حالی است که انرژی کرنشی پانل در حال افزایش است. هنگامی که انرژی جذب شده توسط پانل بیشتر از کاهش انرژی جنبشی پرتابه

۵- مراجع

- [1] Backman M.E., Goldsmith W., "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 16, No. 1, 1978, pp. 1-99.
- [2] Corbett G.G., Reid S.R., Johnson, W., "Impact Loading of Plates and Shells by Free-flying Projectiles: A review", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 141-230.
- [3] Forrestal M.J., Okajima K., Luk V.K., "Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets with Rigid Long Rods", *Applied Mechanics*, Vol. 55, No. 4, 1988, pp. 755-760.
- [4] Forrestal M.J., Luk V.K., Brar N.S., "Perforation of Aluminum Armor Plates with Conical-nose Projectiles", *Mechanics of Materials*, Vol. 10, No. 1-2, 1990, pp. 97-105.
- [5] Forrestal M.J., Tzou D.Y., Askari E., Longcope D.B., "Penetration into Ductile Metal Targets with Rigid Spherical-nose Rods", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16, No. 5-6, 1995, pp. 699-710.
- [6] Hoo Fatt M.S., Lin C., "Perforation of Clamped, Woven E-glass/polyester Panels", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 35, No. 5, 2004, pp. 359-378.
- [7] Naik N.K., Doshi A.V., "Ballistic Impact Behaviour of Thick Composites: Parametric Studies". *Composite Structures*, Vol. 82, No. 3, 2008, pp. 447-464.
- [8] Naik N.K., Shirao P., Reddy B.C.K., "Ballistic Impact Behaviour of Woven Fabric Composites: Parametric Studies", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 412, No. 1-2, 2005, pp. 104-116.
- [9] Nemes J.A., Eskandari H., Rakitch L., "Effect of Laminate Parameters on Penetration of Graphite/epoxy Composites", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 1-2, 1998, pp. 97-112.
- [10] Wu Q.G., Wen H.M., Qin Y., Xin S.H., "Perforation of FRP Laminates under Impact by Flat-nosed Projectiles", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 2, 2012, pp. 221-227.
- [11] Patel B., Bhola S., Ganapathi M., Makhecha D., "Penetration of Projectiles in Composite Laminates", *Defence Science Journal*, Vol. 54, No. 2, 2004, pp. 151-159.

[۱۲] پل محمد حسین، لیاقت غلامحسین، صدیقی مجتبی، "تحلیل تئوری فرایند نفوذ پرتابه‌های سر تخت در مواد مرکب شیشه/اپوکسی"، مهندسی مکانیک مدرس، ۱۲(۲)، ۱۳۹۱، ۱۱-۱۹.

در این شکل $G=80g$ و $t=25\text{ mm}$ ، $h=0/6\text{ mm}$ می‌باشند. در این شکل E_{FD} و E_{AL} ، E_T به ترتیب نشان‌دهنده انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی، لایه آلومینیومی و فوم می‌باشند. مطابق شکل ۶، با افزایش قطر پرتابه و با ثابت در نظر گرفتن جرم آن، انرژی جذب شده توسط پانل نیز افزایش می‌یابد. همچنین لایه‌های آلومینیومی انرژی بیشتری نسبت به فوم جذب می‌کنند. چنان که از شکل ۶ مشخص است، با افزایش قطر پرتابه هسته انرژی بیشتری را جذب می‌کند. در واقع، انرژی جذب شده توسط فوم مطابق رابطه (۸) با توان دوم شعاع پرتابه و ضخامت فوم رابطه مستقیم دارد، لذا با افزایش قطر پرتابه انرژی جذب شده توسط فوم افزایش می‌یابد، اما میزان افزایش جذب انرژی در مقایسه با انرژی جذب شده توسط لایه‌های رویی و زیری آلومینیوم کم می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه سرعت حد بالستیک، سرعت باقی‌مانده و انرژی جذب شده توسط لایه‌های مختلف صفحات ساندویچی آلومینیوم-فوم ارائه شده است. در مدل تحلیلی، واماندگی لایه‌های رویی و زیری آلومینیومی بر اساس موج تنش غالب در نظر گرفته شده است. مقادیر سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده محاسبه شده به روش تحلیلی هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد. از ویژگی‌های مدل تحلیلی، سادگی معادلات حاکم و نحوه حل آنها می‌باشد. مطابق نتایج مدل تحلیلی، سرعت حد بالستیک برای پرتابه‌های سر تخت از پرتابه‌های سر کروی بیشتر است. بررسی قطر پرتابه سر کروی بر روی حد بالستیک نشان داد که با افزایش قطر پرتابه و با ثابت بودن جرم آن، حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. همچنین با ثابت بودن قطر، افزایش جرم پرتابه باعث کاهش حد بالستیک می‌شود. در برخورد پرتابه سر کروی، بیشترین جذب انرژی توسط لایه‌های آلومینیومی صورت می‌گیرد و فوم تأثیر کمی در جذب انرژی دارد. با افزایش قطر پرتابه، سهم فوم در جذب انرژی نیز افزایش می‌یابد.

- [19] Zhao H., Elnasri I., Girard Y., "Perforation of Aluminium Foam Core Sandwich Panels under Impact Loading An Experimental Study", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 7, 2007, pp. 1246-1257.
- [20] Hanssen A.G., Girard Y., Olovsson L., Berstad T., Langseth M., "A Numerical Model for Bird Strike of Aluminium Foam-based Sandwich Panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, No. 7, 2006, pp. 1127-1144.
- [21] Hou W., Zhu F., Lu G., Fang D.N., "Ballistic Impact Experiments of Metallic Sandwich Panels with Aluminium Foam Core", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 10, 2010, pp. 1045-1055.
- [22] Wen H.M., "Predicting the Penetration and Perforation of Targets Struck by Projectiles at Normal Incidence*", *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 30, No. 4, 2002, pp. 543-577.
- [23] Reid S.R., Zhou G., "Impact Behaviour of Fibre-Reinforced Composite Materials and Structures", New York, CRC, 2000, pp. 239-280.
- [24] Wen H.M., Reddy T., Reid S., Soden P., "Indentation, Penetration and Perforation of Composite Laminate and Sandwich Panels under Quasi-static and Projectile Loading", *Key Engineering Materials*, Vol. 141-143, No. 2, 1997, pp. 501-552.
- [25] Lin C., Hoo Fatt M.S., "Perforation of Composite Plates and Sandwich Panels under Quasi-static and Projectile Loading", *Journal of composite materials*, Vol. 40, No. 20, 2006, pp. 1801-1840.
- [۱۳] رادمهر داود، لیاقت غلامحسین، فعلی سعید "تحلیل فرایند نفوذ مایل پرتابه‌های تغییر شکل پذیر در اهداف فلزی چند لایه"، *مواد پراورزی*، (۱)۱۱، ۱۳۹۰، ۳۱-۲۱.
- [14] Hoo Fatt M.S., Sirivolu D., "A Wave Propagation Model for the High Velocity Impact Response of a Composite Sandwich Panel", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 2, 2010, pp. 117-130.
- [15] Ivañez I., Santiuste C., Barbero E., Sanchez-Saez S., "Numerical Modelling of Foam-cored Sandwich Plates under High-velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 93, No. 9, 2011, pp. 2392-2399.
- [16] Feli S., Namdari Pour M.H., "An Analytical Model for Composite Sandwich Panels with Honeycomb Core Subjected to High-velocity Impact", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 5, 2012, pp. 2439-2447.
- [17] Sabouri H., Liaghat G.H., "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, No. 2, 2010, pp. 600-601.
- [18] Mamivand M., Liaghat G.H., "A Model for Ballistic Impact on Multi-layer Fabric Targets", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 7, 2010, pp. 806-812.