

تحلیل ضربه عمودی در سازه ساندویچی با در نظر گرفتن مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی

سیدسجاد جعفری^{۱*}، سعید فعلی^۲، میلاد رنجبران^۳

۱- دانشجوی دکتری، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، ۲- دانشیار، دانشگاه رازی کرمانشاه، ۳- دانشجوی دکتری،

دانشگاه بوعلی سینا

(دریافت: ۹۴/۱۲/۲۱، پذیرش: ۹۵/۰۳/۲۵)

چکیده

هدف این مقاله ارائه روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه میزان جذب انرژی ورق‌های ساندویچی آلومینیوم- فوم تحت اثر ضربه سرعت بالا است. ورق‌های ساندویچی آلومینیوم- فوم دارای هسته از جنس فوم هستند که بین دو صفحه فلزی آلومینیومی، محصور شده است. ضربه‌زنده به صورت پرتابه صلب استوانه‌ای سر تخت در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل جرم و فنر، جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی در بارگذاری شبه استاتیکی و با در نظر گرفتن مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی محاسبه شده است. همچنین فوم نیز به واسطه خرد شدن بخشی از انرژی پرتابه را جذب می‌کند. نهایتاً 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 و عددی دارد. همچنین اثرات چگالی فوم، جرم و قطر پرتابه در میزان جذب انرژی ساندویچ پانل بررسی شده است.

کلید واژه‌ها: ورق ساندویچی، فوم، آلومینیوم، سوراخ‌شدن، جذب انرژی

Analysis of Normal Impact on Sandwich Panel with Considering Difference Energy Absorption Mechanisms

S. S. Jafari*, S. Feli, M. Ranjbaran

Young Researchers & Elites Club, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

(Received: 12/03/2016; Accepted: 14/06/2016)

Abstract

In this paper, a new analytical model has been presented for energy absorption calculation of aluminum-foam sandwich panels under high velocity impact. The panels consist of foam core sandwiched between two aluminum skins. In analytical model, cylindrical rigid projectile with flat ended has been considered. In the quasi-static loading, by using the springs-mass model, energy absorption of aluminum skins with considering difference energy absorption mechanisms has been calculated. Also foam absorbed a partial of projectile energy by crushing. Energy absorption of aluminum-foam sandwich panel was 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 presented good agreement with experimental and numerical results. Also the effects of foam density, projectile mass and diameter in energy absorption of sandwich panel has been investigated.

Keywords: Sandwich Panel, Foam, Aluminum, Perforation, Energy Absorption.

*Corresponding Author E-mail: sjd.jafari@iauh.ac.ir

۱. مقدمه

اهداف را بالا می‌برد. رادمهر و همکاران [۹] با استفاده از تئوری انتشار امواج پلاستیک و بر مبنای معادلات مومنتم، برخورد مایل پرتابه سر تخت را در اهداف چندلایه فلزی به صورت تحلیلی بررسی کردند. این فرآیند در نه مرحله بررسی شده است.

صبری و لیاقت [۱۰] فرمول‌بندی جدیدی برای محاسبه انرژی کرنشی و پاسخ استاتیکی و دینامیکی لایه‌های فلز - کامپوزیت ارائه نمودند.

بررسی سازه‌های ساندویچی جهت جذب انرژی بیشتر و کاربرد در شرایط مختلف رشد چشمگیری داشته است. این سازه‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی بسیار بالا مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. سازه‌های ساندویچی معمولاً دارای یک هسته هستند که بین دو لایه محصور شده‌اند. از جمله سازه‌های ساندویچی می‌توان به سازه‌های کامپوزیت- فوم، کامپوزیت- هانی کامب و آلومینیوم- فوم اشاره نمود.

هوفت و سیرولو [۱۱] با استفاده از مدل انتشار امواج تنش، سرعت باقی‌مانده پرتابه با دماغه کروی، در برخورد به پانل ساندویچی کامپوزیت- فوم را تعیین کردند. همچنین، فرآیند برخورد سرعت‌بالا به پانل ساندویچی را در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی نمودند.

فعلی و نامداری‌پور [۱۲] یک مدل تحلیلی جدید برای سوراخ‌شدن پانل ساندویچی کامپوزیت- هانی کامب ارائه دادند. آن‌ها سوراخ‌شدن پانل را در سه مرحله، شامل سوراخ‌شدن صفحه بالایی، سوراخ‌شدن هانی کامب و سوراخ‌شدن صفحه پایینی در نظر گرفتند. در این مدل تحلیلی کامپوزیت به صورت الیاف بافته‌شده تار و پود، در نظر گرفته شده است.

ژائو و همکاران [۱۳] برخورد شبه‌استاتیکی پرتابه سرکروی به ساندویچ پانل‌های آلومینیوم- فوم را به صورت تجربی بررسی و روند تغییرات نیرو بر حسب جابجایی را ثبت کردند. هانسن و همکاران [۱۴] برخورد پرتابه به پانل آلومینیوم- فوم را به صورت تجربی و عددی بررسی نمودند. تحلیل عددی به کمک نرم‌افزار ال‌اس‌داین‌ا انجام شده است. فعلی و جعفری [۱۵] ضربه بالستیک و سرعت بال را بر روس یازده‌ه‌ای ساندویچی کامپوزیت- فوم به صورت تحلیلی و عددی بررسی نمودند.

خدارحمی و همکاران [۱۶] نفوذ پرتابه صلب سر تخت در اهداف ساندویچی آلومینیوم- فوم را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. مطابق آزمایش‌ها و شبیه‌سازی صورت‌گرفته توسط آن‌ها، با افزایش چگالی و ضخامت فوم و سرعت اولیه پرتابه، جذب انرژی سازه ساندویچی نیز افزایش می‌یابد.

مبحث برخورد و نفوذ پرتابه‌ها یکی از مباحث مهم در صنایع نظامی و غیرنظامی است. در دهه‌های اخیر مطالعات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. اکثر کارهای انجام‌شده 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 انرژی دارد و اکثر مطالعات صورت‌گرفته 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 اکثر تحقیقات تجربی و تحلیلی انجام‌شده 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 فرآیند را به دست آوردند و اثرات شکل دماغه پرتابه استوانه‌ای را در فرآیند نفوذ و سوراخ‌شدن 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 انجام شده است. اولون و همکاران [۶] اثرات شکل دماغه پرتابه را بر انرژی جذب‌شده توسط لمینیت‌های کربن/ اپوکسی به صورت تجربی، بررسی کردند. آن‌ها از پرتابه با دماغه‌های مختلف از جمله دماغه کروی، مخروطی و مسطح استفاده نمودند.

ممیوند و لیاقت [۷] مدل تحلیلی برای حد بالستیک دوبرعدی کامپوزیت‌های بافته‌شده ارائه کردند. اثرات ابعاد هدف در عملکرد بالستیکی مجموعه نیز بررسی شده است.

پل و همکاران [۸] برخورد بالستیک پرتابه سر تخت به مواد مرکب شیشه/ اپوکسی با بافت دوبرعدی را به صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها در این تحلیل، از روش انرژی و تقسیم مدت زمان نفوذ به جزءهای زمانی کوچک استفاده کردند.

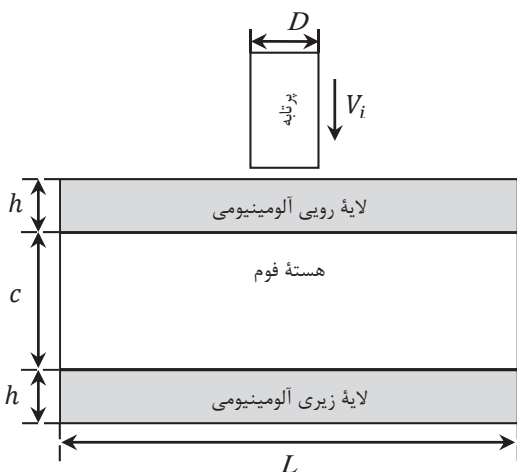
با تقویت اهداف به وسیله مواد دیگر، تحقیقات وارد مرحله جدیدی شد. چندلایه کردن اهداف فلزی، میزان جذب انرژی

می‌یابد. شکل (۱) یک پانل ساندویچی با لایه‌های آلومینیومی و هسته فوم که تحت برخورد پرتابه صلب سرتخت است را نشان می‌دهد. منظور از لایه آلومینیومی رویی، لایه‌ای است که در معرض برخورد با پرتابه می‌باشد (شکل ۱). لازم به ذکر است که در پانل ساندویچی ضخامت و جنس لایه‌های رویی و زیری یکسان در نظر گرفته شده است.

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

۲-۱. نفوذ پرتابه در لایه آلومینیومی

در برخورد پرتابه به پانل ساندویچی، قسمتی از انرژی جنبشی پرتابه توسط لایه‌های پانل جذب می‌شود. در این قسمت ابتدا جذب انرژی لایه آلومینیومی در اثر تغییر شکل (جذب انرژی ناشی از تغییر شکل موضعی و تغییر شکل کلی) و تغییر شکل گلبرگی در بارگذاری استاتیکی محاسبه و سپس با استفاده از ضریب افزایش دینامیکی، جذب انرژی این لایه در بارگذاری ضربه‌ای به دست می‌آید.



شکل ۱. برخورد پرتابه سرتخت به پانل ساندویچی.

سیستم معادل بارگذاری شبه‌استاتیکی بر روی پانل‌های ساندویچی آلومینیوم-فوم در شکل (۲) نشان داده شده است، به طوری که K_c سختی تماسی، K_{il} سختی بشقابی شدن، K_b سختی خمشی و K_s سختی برشی هستند.

همچنین، پل و همکاران [۱۷] خواص بالستیکی فوم‌های آلومینیومی را به صورت تجربی بررسی نمودند.

فعلی و جعفری [۱۸] سوراخ شدن سازه‌های ساندویچی آلومینیوم-فوم توسط پرتابه‌های سرکروی و سرتخت را بر اساس تئوری موج تنش غالب بررسی کردند. نتایج بررسی انجام شده مطابقت مناسبی با داده‌های تجربی دارد. همچنین آن‌ها نشان دادند که سرعت حد بالستیک پرتابه سرتخت از پرتابه سرکروی بیشتر است.

بررسی و تحلیل نفوذ بالستیک پرتابه‌ها در ورق‌های ساندویچی فلز-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 است.

در این مقاله مدل تحلیلی جدیدی برای بررسی فرآیند نفوذ و سوراخ شده صفحات ساندویچی آلومینیوم-فوم تحت اثر برخورد پرتابه سرتخت ارائه شده است، به طوری که هسته پانل از جنس فوم و لایه‌های بالایی و پایینی از جنس آلومینیوم می‌باشند. جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی و فوم به صورت مجزا محاسبه و در نهایت جذب انرژی پانل به دست آمده است.

در محاسبه جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی علاوه بر در نظر گرفتن اتلاف انرژی موضعی در محل برخورد پرتابه، مکانیزم‌های مختلف اتلاف انرژی از جمله بشقابی شدن^۱، تغییر شکل گلبرگی^۲، خمش و برش نیز در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، فوم نیز به واسطه خرد شدن بخشی از انرژی پرتابه را جذب می‌کند. با تعیین انرژی‌های جذب شده توسط پانل ساندویچی، طی فرآیند نفوذ پرتابه و استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک و سرعت باقی مانده پرتابه محاسبه شده است. از ویژگی‌های مدل تحلیلی، در نظر گرفتن مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی توسط پانل و روش حل مسئله می‌باشد، به نحوی که با سادگی معادلات نتایج مدل همخوانی مناسبی با نتایج تجربی و عددی مرجع [۱۶] 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

¹Dishing

²Petaling

که C_{ij} ثوابت الاستیک هستند. این ثوابت با استفاده از تئوری الاستیسیته توسط روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned} C_{11} &= E / (1 - \nu^2) \\ C_{44} &= G \\ C_{13} &= \nu E / (1 - \nu^2) \end{aligned} \quad (۲-۱)$$

در رابطه فوق E ، G و ν به ترتیب نشان‌دهنده مدول یانگ، مدول برشی و ضریب پواسون هستند.

بنابراین جذب انرژی لایه آلومینیومی در اثر تغییر شکل موضعی که آن را انرژی تماسی (E_{ct}) می‌نامیم، برابر است با:

$$E_{ct} = \int_0^{\alpha} p d\alpha = \frac{1}{2} K_c \alpha^2 \quad (۲)$$

ب- تغییر شکل کلی: در ادامه، تئوری‌های خمش، بشقابی شدن و خمش-بشقابی شدن بررسی می‌شود. فرض می‌شود که در تئوری‌های خمش و خمش-بشقابی شدن، برش نیز رخ می‌دهد.

تئوری خمش: رابطه بین نیرو و جابجایی، بدون در نظر گرفتن فرورفتگی موضعی به صورت زیر است [۲۲]:

$$P = K_{bs} W \quad (۳)$$

در رابطه بالا، W خیز عرضی صفحه میانی آلومینیوم و K_{bs} سختی موثر ناشی از خمش و برش است. با در نظر گرفتن شکل ۲، سختی موثر خمشی و برشی برابر است با:

$$K_{bs} = \frac{K_b K_s}{K_b + K_s} \quad (۴)$$

که K_b و K_s به ترتیب نشان‌دهنده سختی خمشی و سختی برشی هستند. سختی خمشی برای ورق مربعی از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$K_b = \frac{86.2 E h^3}{12(1 - \nu^2) L^2} \quad (۵)$$

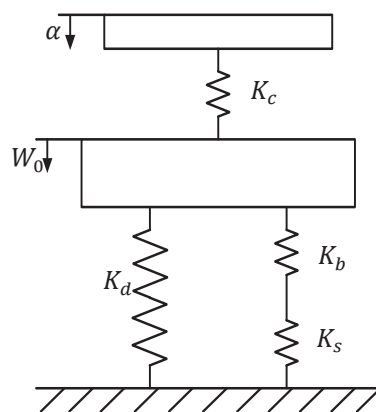
که L اندازه موثر پانل می‌باشد. همچنین سختی موثر برشی به کمک رابطه زیر به دست می‌آید [۲۲ و ۲۴]:

$$K_s = \frac{4\pi}{3} Gh \left(\frac{E}{E - 4\nu G} \right) \left(\frac{4}{3} + \log \frac{L}{2R} \right)^{-1} \quad (۶)$$

تئوری بشقابی شدن: در این تئوری بدون در نظر گرفتن تغییر شکل خمشی و برشی و همچنین صرف نظر کردن از فرورفتگی موضعی، رابطه نیرو و جابجایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = K_d W^3 \quad (۷)$$

که، K_d نشان‌دهنده سختی بشقابی بوده و از رابطه زیر



شکل ۲. شبیه‌سازی برخورد پرتابه با پانل ساندویچی با مدل فنر.

در این مقاله شرایط مرزی در لبه‌های پانل به صورت گیردار می‌باشد، به طوری که اطراف پانل کاملاً مقید است. همچنین فرض شده است که پرتابه صلب به صورت عمودی در هدف نفوذ کند. به دلیل کوچک بودن قطر پرتابه در مقایسه با اندازه پانل ساندویچی، بار اعمالی از سوی پرتابه به پانل، به صورت متمرکز در نظر گرفته شده است [۱۹]. با توجه به نسبت اندازه صفحه به ضخامت لایه آلومینیومی، پانل ممکن است توسط برش، خمش، بشقابی شدن و یا ترکیب خمش و بشقابی شدن کشیده شود. در ادامه، نیروی تماسی بین پرتابه و پانل با استفاده از تئوری‌های مختلف بررسی می‌شود.

۱-۱-۲. جذب انرژی در اثر تغییر شکل

نیروی تماسی بین پرتابه و لایه آلومینیومی باعث ایجاد دو نوع تغییر شکل موضعی و کلی می‌شود. در ادامه جذب انرژی لایه آلومینیومی در اثر نیروی تماسی که باعث تغییر شکل هدف می‌شود بررسی می‌گردد.

الف- تغییر شکل موضعی: رابطه نیروی تماسی شبه‌استاتیکی (P) و فرورفتگی موضعی پانل (α)، به صورت زیر است [۲۰]:

$$P = K_c \alpha \quad (۱)$$

که در معادله فوق K_c سختی تماسی پانل بوده و مقدار آن برابر $2R / \pi H_0$ است، به طوری که R نشان‌دهنده شعاع پرتابه است. ون و همکارانش [۲۱] مقدار H_0 برای ورق‌های کامپوزیتی به دست آوردند. H_0 برای ماده ایزوتروپ برابر است با:

$$H_0 = \frac{(\gamma_1 + \gamma_2) C_{11}}{2\pi(C_{11}^2 - C_{13}^2)} \quad (۱-۱)$$

$$\gamma_{1,2}^2 = Q \pm \sqrt{Q^2 - 1}$$

$$Q = (C_{11}^2 - C_{13}^2 - 2C_{13}C_{44}) / 2C_{11}C_{44}$$

به دست می‌آید [۲۱]:

$$K_d = \frac{191\pi Eh}{162L^2} \quad (۸)$$

تئوری خمش - بشقابی شدن: در این تئوری رابطه بین نیرو و جابجایی، با صرف نظر کردن از فرورفتگی موضعی و با در نظر گرفتن کلیه تغییر شکل‌های برشی، خمشی و بشقابی شدن، به صورت زیر است:

$$P = K_{bs}W + K_dW^3 \quad (۹)$$

در واقع این تئوری ترکیب تئوری خمش با تئوری بشقابی شدن است. بنابراین انرژی تغییر شکل کلی، در کلی ترین حالت (تئوری خمش - بشقابی شدن) به کمک رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_{gd} = \int_0^W p dW = \frac{1}{2}K_{bs}W^2 + \frac{1}{4}K_dW^4 \quad (۱۰)$$

بنابراین کل انرژی جذب شده در اثر تغییر شکل (E_{def}) برابر مجموع دو رابطه (۲) و (۱۰) است، یعنی؛

$$E_{def} = \frac{1}{2}(K_c\alpha^2 + K_{bs}W^2 + \frac{1}{2}K_dW^4) \quad (۱۱)$$

با جایگذاری رابطه (۹) در عبارت مربوط به انرژی تماسی می‌توان نوشت:

$$E_{def} = \frac{(K_{bs}W_0 + K_dW_0^3)^2}{2K_c} + \frac{1}{2}K_{bs}W_0^2 + \frac{1}{4}K_dW_0^4 \quad (۱۲)$$

با برابر قراردادن W_{of} (خیز عمودی بحرانی) با W_0 در رابطه فوق:

$$E_{def} = \frac{(K_{bs}W_{of} + K_dW_{of}^3)^2}{2K_c} + \frac{1}{2}K_{bs}W_{of}^2 + \frac{1}{4}K_dW_{of}^4 \quad (۱۳)$$

در واقع وقتی خیز ورق به خیز بحرانی برسد، واماندگی لمینیت رخ می‌دهد. رابطه بین خیز عمودی بحرانی و استحکام برشی (τ) به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$P = K_{bs}W_{of} + K_dW_{of}^3 = 2\pi R h K \tau \quad (۱۴)$$

به دلیل تغییر شکل اطراف ناحیه تورفتگی، میانگین استحکام برشی عرضی از مقدار واقعی آن بیشتر می‌شود. بنابراین به منظور اتردادن این افزایش، از ضریب K استفاده می‌شود که K برای فلزات برابر با $2/8$ در نظر گرفته شده است [۲۵].

۲-۱-۲. جذب انرژی در اثر تغییر شکل گلبرگی

بعد از اینکه پرتابه لایه آلومینیومی را به طور کامل سوراخ می‌کند، اطراف سوراخ ایجاد شده در سطح پشت هدف به سمت داخل خم می‌شوند که به این تغییر شکل گلبرگی شدن می‌گویند. با در نظر گرفتن زاویه 90° برای قسمت‌های خم شده، انرژی جذب شده در اثر گلبرگ شدن (E_p) به دست می‌آید [۲۶]:

$$E_p = \frac{\pi^2 h R^2 \sigma_0}{4} \quad (۱۵)$$

به طوری که σ_0 تنش تسلیم فلز است.

جذب انرژی لایه آلومینیومی در بار گذاری شبه‌استاتیکی (E_{sAL}) از مجموع جذب انرژی در اثر تغییر شکل‌های ذکر شده به دست می‌آید:

$$E_{sAL} = E_p + E_{def} \quad (۱۶)$$

در بارگذاری دینامیکی انرژی سوراخ شدن پانل افزایش می‌یابد. رابطه تجربی که جهت محاسبه انرژی سوراخ شدن ورق آلومینیومی (E_{dAL}) در بار ضربه‌ای به کار می‌رود، عبارت است از:

$$E_{dAL} = \varphi_{AL} E_{sAL} \quad (۱۷)$$

در رابطه فوق، φ ضریب افزایش دینامیکی است که در این ضریب تجربی اثرات سرعت اولیه پرتابه V_i لحاظ شده است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]:

$$\varphi_{AL} = 1 + 0.0065V_i \quad (۱۸)$$

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 سرتخت از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$E_{FS} = \pi K R^2 c \sigma_c \varepsilon_d \quad (۱۹)$$

در رابطه بالا، ε_d کرنش تراکمی فوم، σ_c استحکام فشاری فوم، c ضخامت فوم و K یک ثابت تجربی است که مقدار آن برای فوم آلومینیومی برابر $2/5$ در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. در واقع به کمک این ضریب، میزان افزایش استحکام نهایی هدف که ناشی از تغییر شکل ناحیه اطراف محل اصابت پرتابه است، اعمال شده است.

انرژی که صرف سوراخ‌شدن هدف می‌شود و انرژی جنبشی پرتابه هنگام خروج از هدف. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2}MV_i^2 = E_{kbs} + \frac{1}{2}MV_{rs}^2 \quad (25)$$

با جایگذاری $E_{kbs} = 0.5MV_{bs}^2$ در رابطه فوق، سرعت باقی‌مانده پرتابه (V_{rs}) به دست می‌آید [۲۱]:

$$V_{rs} = (V_i^2 - V_{bs}^2)^{0.5} \quad (26)$$

۳. نتایج و بحث

هدف اصلی مدل تحلیلی ارائه‌شده، تعیین سرعت حد بالستیک و سرعت باقی‌مانده در برخورد پرتابه سرتخت و سرکروی به پانل‌های ساندویچی آلومینیوم-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 ارائه‌شده، نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های تجربی و عددی مرجع [۱۶] مقایسه شده است. خواص مکانیکی پرتابه فولادی، لایه‌های آلومینیومی و فوم در جدول‌های (۱) و (۲) ذکر شده‌اند. لایه‌های آلومینیومی از نوع 1100-H14 و فوم از نوع Al(A356-SiCp) هستند.

جدول ۱. مشخصات پرتابه فولادی [۱۶].

پارامتر	مقدار
ρ (Kg/m ³)	۷۸۰۰
E (GPa)	۲۱۰
ν	۰/۳
M (g)	۱۲/۲

جدول ۲. خواص مکانیکی ورق آلومینیومی [۱۶].

پارامتر	مقدار
ρ (Kg/m ³)	۲۷۰۰
E (GPa)	۷۰
ν	۰/۳۳
σ_0 (MPa)	۱۱۷
τ (MPa)	۷۶

جدول ۳. خواص مکانیکی فوم آلومینیومی [۱۶].

پارامتر		مقدار
نسبت چگالی	۱۴٪	۲۰٪
E (GPa)	۱۱۰۰	۱۵۰۰
σ_c (MPa)	۱/۵	۳/۸
ϵ_D	۰/۴۵	۰/۵
ν	۰/۳	۰/۳

ضریب افزایش دینامیکی برای فوم از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۰]:

$$\varphi_{foam} = \begin{cases} 1 + B\left(\frac{V_i}{V_c}\right) & (V_i < V_c) \\ 1 + B & (V_i > V_c) \end{cases} \quad (20)$$

به طوری که V_c نشان‌دهنده سرعت بحرانی فون کارمن و V_i سرعت اولیه پرتابه می‌باشد. همچنین B نیز یک ثابت تجربی است که مقدار آن برای پرتابه سرتخت ۱/۵ در نظر گرفته شده است [۲۷]. سرعت بحرانی فون کارمن نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_c = C_1 \varepsilon_f = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \varepsilon_f \quad (21)$$

در رابطه فوق، C_1 سرعت انتشار موج، ρ چگالی لمینیت، ε_f کرنش واماندگی کششی استاتیکی و E مدول یانگ فوم هستند. بنابراین انرژی جذب شده توسط فوم در بارگذاری دینامیکی (E_{FD})، برابر است با:

$$E_{FD} = \varphi_{foam} E_{FS} \quad (22)$$

۳-۲. انرژی جذب‌شده توسط پانل ساندویچی آلومینیوم-فوم

در قسمت‌های قبلی انرژی جذب‌شده توسط لایه آلومینیومی و فوم محاسبه گردید. جذب انرژی لایه‌های رویی و زیری متفاوت است. این تفاوت به کمک ضریب φ_{Al} (معادله ۱۸) اعمال می‌شود، به طوری که V_i برای لایه رویی سرعت اولیه و برای لایه زیری، برابر سرعت خروجی پرتابه از لایه رویی و هسته‌های کمب می‌باشد. در صورتی که E_{dAl}^f و E_{dAl}^b به ترتیب نشان‌دهنده انرژی جذب‌شده لایه رویی و انرژی جذب‌شده لایه زیری باشند، بنابراین انرژی جذب‌شده توسط پانل از مجموع معادلات (۱۷) و (۲۰) به دست می‌آید:

$$E_T = E_{dAl}^f + E_{dAl}^b + E_{FD} \quad (23)$$

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

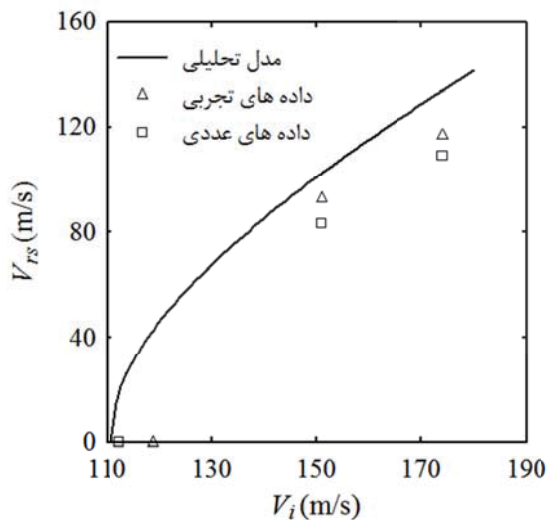
$$V_{bs} = \sqrt{\frac{2E_T}{M}} \quad (24)$$

به طوری که M جرم پرتابه است. در برخورد با سرعت‌های بالاتر از سرعت حد بالستیک، پرتابه پس از سوراخ‌کردن هدف، با سرعت باقی‌مانده (V_{rs}) از آن خارج می‌شود. با در نظر گرفتن موازنه انرژی، انرژی جنبشی اولیه پرتابه برابر است با مجموع

جدول ۵. مقایسه سرعت باقی‌مانده مدل تحلیلی با داده‌های تجربی و عددی مرجع [۱۶].

سرعت اولیه (m/s)	سرعت باقیمانده (m/s)		
	تجزیی	عددی	تحلیلی
۱۷۴	۱۱۷	۱۰۸/۹۷	۱۲۵/۷۹
۱۵۱	۹۳	۸۳/۲۶	۹۵/۶۵

همچنین منحنی تغییرات سرعت باقی‌مانده بر حسب سرعت اولیه و مقایسه با داده‌های تجربی و عددی در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش سرعت اولیه سرعت باقی‌مانده نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت اولیه، ضریب افزایش دینامیکی، زیاد می‌شود و این باعث افزایش میزان جذب انرژی پانل می‌گردد. از این رو می‌توان گفت که در نرخ کرنش‌های بالاتر، مقاومت پانل ساندویچی نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۳. منحنی تغییرات سرعت باقی‌مانده پرتابه سرتخت بر حسب سرعت اولیه و مقایسه آن با داده‌های تجربی و عددی مرجع [۱۶].

نتایج حاصل از مدل تحلیلی در محاسبه جذب انرژی سازه ساندویچی در جدول (۶) ارائه و با نتایج تجربی و عددی مرجع [۱۶] مقایسه گردیده است. این نتایج برای سازه ساندویچی با مشخصات $L = 130 \text{ mm}$ ، $h = 1 \text{ mm}$ ، هسته فوم با چگالی نسبی ۲۰٪ و $c = 20 \text{ mm}$ ارائه شده است. در سرعت اولیه m/s ۱۷۴، خطای مدل تحلیلی در مقایسه با داده‌های تجربی و عددی به ترتیب ۹/۹٪ و ۱۸/۸٪ است. همچنین در سرعت اولیه m/s ۱۵۱، خطای مدل تحلیلی در مقایسه با داده‌های تجربی و عددی به ترتیب ۳/۵٪ و ۱۹/۰۷٪ است. همان‌طور مقایسه نتایج نشان می‌دهد، مطابقت خوبی بین نتایج حاصل از مدل تحلیلی و داده‌های تجربی وجود دارد.

معمولاً نتایج حاصل از مدل تحلیلی و داده‌های تجربی در حد بالستیک دارای بیشترین خطا خواهد بود. خداحرمی و همکاران [۱۶] با توجه به هزینه‌بر بودن آزمایش‌های تجربی برای پیداکردن سرعت حد بالستیک واقعی، ابتدا از دقت شبیه‌سازی عددی اطمینان حاصل نمودند و سپس سرعت حد بالستیک را به کمک شبیه‌سازی عددی محاسبه کردند. آن‌ها همچنین مقدار تجربی سرعت حد بالستیک را با استفاده از اصل موازنه انرژی تخمین زدند.

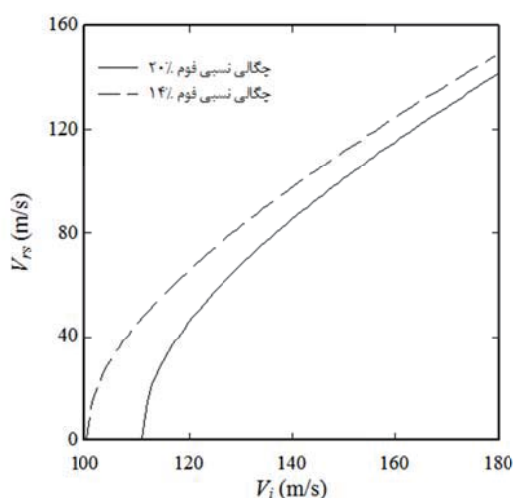
به منظور صحت‌گذاری بر مدل تحلیلی نتایج این مدل در محاسبه سرعت حد بالستیک برای پرتابه سرتخت در جدول (۴) ارائه و با داده‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی مرجع [۱۶] مقایسه شده است. این نتایج برای پانل با لایه‌های آلومینیومی به ضخامت 1 mm ، هسته فوم با چگالی نسبی ۱۴٪ و ۲۰٪ و به ضخامت 20 mm ارائه شده است. همچنین اندازه سازه ساندویچی 130 mm است. مقدار مطلق خطای مدل تحلیلی نسبت به داده‌های تجربی و عددی برای هسته فوم با چگالی نسبی ۱۴٪ به ترتیب برابر ۴/۳٪ و ۲/۴٪ است و برای هسته فوم با چگالی نسبی ۲۰٪ به ترتیب برابر ۶/۷٪ و ۱/۳٪ است. همان‌طور که مقایسه نتایج نشان می‌دهد، مدل ارائه شده با دقت بسیار خوبی سرعت حد بالستیک را پیش‌بینی می‌کند.

جدول ۴. مقایسه سرعت حد بالستیک مدل تحلیلی با داده‌های تجربی و عددی مرجع [۱۶].

سرعت حد بالستیک (m/s)			چگالی نسبی فوم
تجزیی	عددی	تجزیی	
۱۰۰/۳۸	۹۸	۱۰۴/۸۹	۱۴٪
۱۱۰/۹۶	۱۱۲/۵	۱۱۸/۹۶	۲۰٪

مقایسه سرعت باقی‌مانده محاسبه شده به روش تحلیلی با نتایج تجربی و عددی مرجع [۱۶] برای سرعت اولیه‌های مختلف در جدول (۵) صورت گرفته است. این نتایج برای پانل با لایه‌های آلومینیومی به ضخامت 1 mm ، هسته فوم با چگالی نسبی ۲۰٪ و به ضخامت 20 mm ارائه شده است. همچنین اندازه سازه ساندویچی 130 mm است. مقدار مطلق خطای مدل تحلیلی نسبت به داده‌های تجربی و عددی در سرعت اولیه m/s ۱۷۴ به ترتیب برابر ۷٪ و ۱۳/۳۷٪ بوده و برای سرعت اولیه m/s ۱۵۱ برابر ۲/۷٪ و ۱۲/۹٪ است. بنابراین می‌توان ادعا کرد که مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی، عددی و نتایج مدل تحلیلی وجود دارد.

منحنی تغییرات سرعت باقی مانده برحسب سرعت اولیه برای پانل ساندویچی با چگالی های نسبی ۱۴٪ و ۲۰٪ هسته فوم در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل $g = 12/2$ مطابق شکل (۷) سرعت باقی مانده پرتابه در برخورد با پانل ساندویچی با فوم ۱۴٪ از پانل با فوم ۲۰٪ بیشتر است. که این موضوع نشان دهنده جذب انرژی فوم با چگالی ۲۰٪ نسبت به فوم با چگالی ۱۴٪ است. همان طور که ذکر شد، با افزایش چگالی نسبی فوم، جذب انرژی آن نیز افزایش می یابد و این موضوع باعث کاهش سرعت باقی مانده می شود.



شکل ۴. منحنی تغییرات سرعت باقی مانده پرتابه برحسب سرعت اولیه برای پانل با چگالی نسبی مختلف فوم بر اساس مدل تحلیلی.

به منظور بررسی سرعت اولیه و چگالی نسبی فوم منحنی تغییرات در صد تفاوت سرعت باقی مانده برحسب سرعت اولیه و برای چگالی های نسبی مختلف فوم (۱۴٪ و ۲۰٪) در شکل (۵) ارائه شده است. مشخصات پانل و پرتابه همان مشخصات مربوط به شکل (۵) است. مطابق این شکل با افزایش سرعت اولیه، درصد تفاوت سرعت باقی مانده نیز کاهش می یابد. به طوری که در سرعت ۱۱۱ m/s درصد تفاوت ۹۴/۱۵ و در سرعت ۱۷۹ m/s درصد تفاوت ۵/۲۲ است. بنابراین می توان ادعا کرد که با افزایش سرعت اولیه از اثرات چگالی نسبی فوم در جذب انرژی پانل کاسته می شود.

شکل (۶) منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک برحسب تغییرات قطر پرتابه سرکروی و برای جرم های مختلف پرتابه را نشان می دهد. در این شکل $h = 1$ mm و $c = 20$ mm و چگالی نسبی فوم ۲۰٪ هستند. مطابق شکل ۶ با افزایش قطر پرتابه و با ثابت در نظر گرفتن جرم آن، حد بالستیک نیز افزایش می یابد. همچنین با در نظر گرفتن قطر ثابت با افزایش جرم

جدول ۶. مقایسه نتایج مدل تحلیلی در محاسبه جذب انرژی هدف با داده های تجربی و عددی مرجع [۱۶].

سرعت اولیه (m/s)	جذب انرژی (J)		
	تجزیی	عددی	تحلیلی
۱۷۴	۱۰۱/۱۸	۱۱۲/۲۴	۹۱/۱۴
۱۵۱	۸۶/۳۲	۶۹/۹۳	۸۳/۲۷

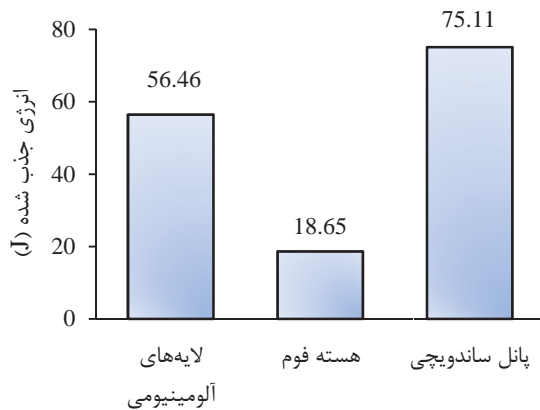
نتایج مدل تحلیلی در پیش بینی سرعت باقی مانده و جذب انرژی پانل برای چگالی های نسبی مختلف هسته با داده های تجربی و عددی مرجع [۱۶] مقایسه شده اند. این نتایج برای سازه ساندویچی با لایه آلومینیومی به ضخامت ۱ mm، و اندازه ۱۳۰ mm ارائه شده است. مقدار مطلق خطای مدل تحلیلی در پیش بینی سرعت باقی مانده، نسبت به داده های تجربی و عددی برای هسته فوم با چگالی نسبی ۱۴٪ به ترتیب برابر ۲/۹٪ و ۳/۱٪ است و برای هسته فوم با چگالی نسبی ۲۰٪ به ترتیب برابر ۲/۸٪ و ۱۴٪ است. همچنین مقدار مطلق خطای مدل تحلیلی در پیش بینی سرعت باقی مانده، نسبت به داده های تجربی و عددی برای هسته فوم با چگالی نسبی ۱۴٪ به ترتیب برابر ۶٪ و ۵/۷٪ است و برای هسته فوم با چگالی نسبی ۲۰٪ به ترتیب برابر ۳/۵٪ و ۱۶٪ است. همان طور که مقایسه نتایج نشان می دهد، مدل ارائه شده با دقت بسیار خوبی سرعت حد بالستیک را پیش بینی می کند. مقایسه درصد های خطا نشان می دهد که با افزایش چگالی فوم، دقت مدل تحلیلی نیز کمی کاهش می یابد.

همچنین نتایج جدول (۷) نشان می دهد که با افزایش چگالی هسته، جذب انرژی سازه نیز افزایش می یابد. دلیل این موضوع به رفتار فوم ها در جذب انرژی و نمودار تنش- کرنش آن ها بر می گردد، به طوری که با افزایش چگالی نسبی فوم، رفتار فوم های آلومینیومی به سمت رفتار مواد صلب سوق پیدا می کند [۱۶ و ۱۷].

جدول ۷. مقایسه سرعت باقی مانده مدل تحلیلی با داده های تجربی و عددی مرجع [۱۶].

چگالی نسبی فوم		سرعت اولیه (m/s)	
۲۰٪	۱۴٪	۱۵۱	۱۵۲
سرعت باقی مانده (m/s)		۹۳	۱۱۰
تجزیی		۸۳/۲۶	۱۰۳/۵۴
عددی		۹۵/۶۵	۱۰۶/۷۲
تحلیلی		۸۶/۳۲	۶۷/۱۲
تجزیی		۶۹/۹۳	۷۵/۵۳
عددی		۸۳/۲۷	۷۱/۴۵
تحلیلی			

همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهد لایه‌های آلومینیومی سهم بیشتری را نسبت به هسته فوم، در جذب انرژی سازه ساندویچی دارند. به طوری که سهم لایه‌های آلومینیومی در جذب انرژی پانل $75/16\%$ و سهم هسته فوم $24/84\%$ است.



شکل ۷. نمودار جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی، فوم و پانل ساندویچی.

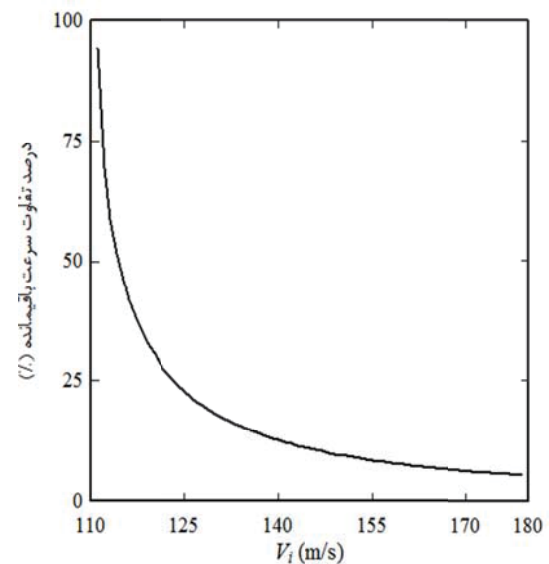
در ادامه با توجه به مطابقت مناسب نتایج مدل تحلیلی با داده‌های تجربی، اثرات آلیاژهای مختلف آلومینیوم بر روی سرعت حد بالستیک بررسی می‌شود. در این بخش آلیاژهای 6061-T651، 2024-O، 5083-H131 و 1100-H14 بررسی می‌شوند. خواص سه آلیاژ اول در جدول ۸ و خواص 1100-H14 هم در جدول (۲) ارائه شده است. مقادیر جدول (۸) از مراجع [۴]، [۱۵] و [۲۸] جمع‌آوری شده‌اند.

جدول ۸. خواص مکانیکی لایه‌های زیری و رویی آلومینیومی [۴]، [۱۵] و [۲۸].

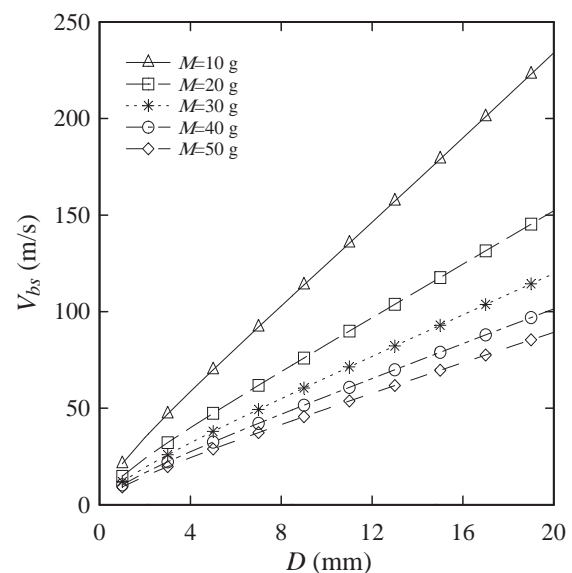
نوع ماده	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	τ (MPa)	σ_0 (MPa)
6061-T651	۲۷۱۰	۶۹	۲۰۷	۳۸۰
5083-H131	۲۶۶۰	۷۰/۳	۱۹۰	۲۷۶
2024-O	۲۸۰۰	۷۳	۱۲۴	۱۶۵/۵

تغییرات سرعت حد بالستیک برحسب قطر پرتابه و برای آلیاژهای مختلف لایه‌های آلومینیومی در شکل (۸) نشان داده شده است. در این شکل $M = 20$ g، $h = 1$ mm، $c = 20$ mm و چگالی نسبی فوم 20% هستند. مطابق این شکل حد بالستیک آلیاژ 6061-T651 از آلیاژهای 5083-H131 و 2024-O و 1100-H14 بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده جذب انرژی این آلیاژ نسبت به سه آلیاژ دیگر است.

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 ۵. منحنی تغییرات در صد تفاوت سرعت باقی‌مانده پرتابه در سوراخ شدن پانل با چگالی نسبی مختلف فوم برحسب سرعت اولیه.

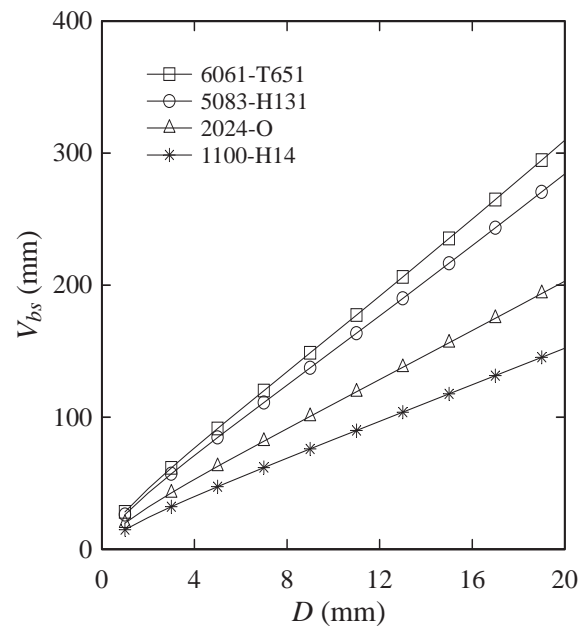


شکل ۶. منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک پرتابه سر تخت برحسب قطر پرتابه.

انرژی جذب‌شده توسط پانل ساندویچی، فوم و لایه‌های آلومینیومی در برخورد بالستیک پرتابه سر تخت به قطر mm ۱۰ و جرم ۱۲/۲ g به سازه ساندویچی که ضخامت لایه‌های آلومینیومی آن ۱ mm و ضخامت فوم آن با چگالی نسبی 20% برابر ۲۰ mm می‌باشد در شکل (۷) ارائه شده است.

۵. مراجع

- [1] Backman, M. E.; Goldsmith, W. "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets"; Int. J. Eng. Sci. 1978, 16, 1-99.
- [2] Corbett, G. G.; Reid, S. R.; Johnson, W. "Impact Loading of Plates and Shells by Free-flying Projectiles: A Review"; Int. J. Imp. Eng. 1996, 18, 141-230.
- [3] Forrestal, M. J.; Okajima, K.; Luk, V. K. "Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets with Rigid Long Rods"; Appl. Mech. 1988, 55, 755-760.
- [4] Forrestal, M. J.; Luk, V. K.; Brar, N. S. "Perforation of Aluminum Armor Plates with Conical-Nose Projectiles"; Mech. Mat. 1990, 10, 97-105.
- [5] Forrestal, M. J.; Tzou, D. Y.; Askari, E.; Longcope, D. B. "Penetration into Ductile Metal Targets with Rigid Spherical-Nose Rods"; Int. J. Imp. Eng. 1995, 16, 699-710.
- [6] Ulven, C.; Vaidya, U. K.; Hosur, M. V. "Effect of Projectile Shape during Ballistic Perforation of VARTM Carbon/epoxy Composite Panels"; Compos. Str. 2003, 61, 143-150.
- [7] Mamivand, M.; Liaghat, G. H. "A Model for Ballistic Impact on Multi-layer Fabric Targets"; Int. J. Imp. Eng. 2010, 37, 806-812.
- [8] Pol, M. H.; Liaghat, G. H.; Sedighi, M. "Analytical Modeling of Perforation of Projectiles into Glass/epoxy Composite"; Journal of Modares Mechanical Engineering 2012, 12, 11-19 (In Persian).
- [9] Radmehr, D.; Liaghat, G. H.; Feli, S. "Analytical Solution for Penetration of Deformable Blunt Projectiles into the Multilayer Metallic Targets"; Energetic Material 2010, 11, 21-31 (In Persian).
- [10] Sabouri, H.; Liaghat, G. H. "Comments on the Article: Ballistic Impact of GLARE™ Fiber-Metal Laminates by Michelle, S.; Hoo, F.; Chunfu, L.; Duane, M.; Revilock, Jr. D.; Hopkins, A. Compos. Struct. 2003, 61, 73-88"; Compos. Struct. 2010, 92, 600-601.
- [11] Hoo Fatt, M. S.; Sirivolu, D. "A Wave Propagation Model for the High Velocity Impact Response of a Composite Sandwich Panel"; Int. J. Imp. Eng. 2010, 37, 117-130.
- [12] Feli, S.; Namdaripour, M. H. "An Analytical Model for Composite Sandwich Panels with Honeycomb Core Subjected to High-velocity Impact"; Compos. Part B: Eng. 2012, 43, 2439-2447.
- [13] Zhao, H.; Elnasri, I.; Girard, Y. "Perforation of Aluminum Foam Core Sandwich Panels under Impact Loading—An Experimental Study"; Int. J. Imp. Eng. 2007, 34, 1246-1257.
- [14] Hanssen, A. G.; Girard, Y.; Olovsson, L.; Berstad, T.; Langseth, M. "A Numerical Model for Bird Strike of Aluminum Foam-based Sandwich Panels"; Int. J. Imp. Eng. 2006, 32, 1127-1144.
- [15] Feli, S.; Jafari, S. S. "Analytical Modelling for Perforation of Foam-Composite Sandwich Panels Under High Velocity Impact"; Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, In Press, 2016.
- [16] Ziya Shamami, M.; Khoda Rahmi, H.; Vahedi, Kh.; Pol, M. H. "Experimental and Numerical Investigation of a Blunt Rigid Projectile Penetrating into a Sandwich Panel Having Aluminum Foam Core"; Journal of Modares Mechanical Engineering 2013, 13, 1-13 (In Persian).
- [17] Ziya Shamami, M.; Pol, M. H.; Khoda Rahmi, H. "Experimental Investigation of Ballistic Properties of



شکل ۸. منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک برحسب قطر پرتابه برای پانل آلومینیوم- هانی کمب با جنس های مختلف رویه ها.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه سرعت حد بالستیک، سرعت باقی مانده و انرژی جذب شده توسط لایه های مختلف صفحات ساندویچی آلومینیوم- فوم ارائه شده است. در مدل تحلیلی، مکانیزم های مختلف جذب انرژی برای لایه های رویی و زیری (تغییر شکل موضعی، خمش، برش، بشقابی شدن و تغییر شکل گلبریگی) در نظر گرفته شده است. مقادیر سرعت حد بالستیک و سرعت باقی مانده محاسبه شده به روش تحلیلی همخوانی مناسبی با نتایج تجربی و عددی محققان دیگر دارد. از ویژگی های مدل تحلیلی، سادگی معادلات حاکم و نحوه حل آن ها است. در برخورد پرتابه سر تخت، بیشترین جذب انرژی توسط لایه های آلومینیومی صورت می گیرد و فوم تأثیر کمی در جذب انرژی دارد. چگالی فوم در جذب انرژی پانل موثر است، به طوری که با افزایش چگالی فوم جذب انرژی آن نیز افزایش می یابد. نتایج به دست آمده توسط مدل تحلیلی نشان داد که با افزایش سرعت اولیه تأثیر چگالی فوم در میزان جذب انرژی کم می شود. به عبارت دیگر در نرخ کرنش های بالا، رفتار فوم ها با چگالی نسبی های مختلف از لحاظ میزان جذب انرژی بهم نزدیک می شود. حد بالستیک آلیاژ 6061-T651 از آلیاژهای 5083-H131، 2024-O و 1100-H14 بیشتر است. این موضوع نشان دهنده جذب انرژی این آلیاژ نسبت به دو آلیاژ دیگر است.

- [23] Timoshenko, S.; Woinowsky-Krieger, S.; Woinowsky, S. "Theory of Plates and Shells"; McGraw-Hill: New York, 1959.
- [24] Lukaszewicz, S. A. "Introduction of Concentrated Loads in Plates and Shells"; Prog. Aero. Sci. 1976, 17, 109-146.
- [25] Woodward, R. L.; De Morton, M. E. "Penetration of Targets by Flat-ended Projectiles"; Int. J. Mech. Sci. 1976, 18, 119-127.
- [26] Hoo Fatt, M. S.; Lin, Ch.; Revilock, J. R.; Duane, M.; Hopkins, D. A. "Ballistic Impact of GLARE™ Fiber-Metal Laminates"; Compos. Struct. 2003, 61, 73-88.
- [27] Reid, S. R.; Zhou, G., "Impact Behavior of Fiber-Reinforced Composite Materials and Structures"; CRC Press: New York, 2000.
- [28] Forrestal, M. J.; Okajima, K.; Luk, V. K. "Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets with Rigid Long Rods"; J. Appl. Mech. 1988, 55, 755-760.
- Aluminum Foam Structure"; Journal of Modares Mechanical Engineering 2013, 13, 22-27 (In Persian).
- [18] Feli, S.; Jafari, S. S. "Analytical Investigation of Perforation of Aluminum-foam Sandwich Panels under Ballistic Impact"; Journal of Modares Mechanical Engineering 2013, 13, 52-59 (In Persian).
- [19] Lin, C.; Hoo Fatt, M. S. "Perforation of Composite Plates and Sandwich Panels under Quasi-Static and Projectile Loading"; J. Compos. Mat. 2006, 40, 1801-1840.
- [20] Wen, H. M.; Reddy, T. Y.; Reid, S. R.; Soden, P. D. "Indentation, Penetration and Perforation of Composite Laminate and Sandwich Panels Under Quasi-Static and Projectile Loading"; Key. Eng. Mat. 1997, 141, 501-552.
- [21] Wu, Q. G.; Wen, H. M.; Qin, Y.; Xin, S. H. "Perforation of FRP Laminates Under Impact by Flat-Nosed Projectiles"; Compos. Part B: Eng. 2012, 43, 221-227.
- [22] Shivakumar, K. N.; Elber, W.; IIG, W. "Prediction of Impact Force and Duration Due to Low Velocity Impact on Circular Composite Laminates"; Appl. Mech. 1985, 52, 674-680.