

تحلیل ضربه بالستیک ضربه زننده لبه تخت روی پانل‌های آلومینیوم-هانی کمب

سعید فعلی^۲سیدسجاد جعفری^۱

دانشکده فنی و مهندسی

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان

دانشگاه رازی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۴/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۰۱)

چکیده

هدف مقاله حاضر، ارائه روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه میزان جذب انرژی ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-هانی کمب تحت اثر ضربه سرعت بالا می‌باشد. منظور از ضربه سرعت بالا، ضربه‌ای است که در آن پرتابه با سرعت اولیه به طور کامل در هدف نفوذ و آن را کاملاً سوراخ می‌کند و با سرعت باقیمانده از هدف خارج می‌شود. ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-هانی کمب دارای هسته هانی کمب شش‌ضلعی می‌باشد که بین دو صفحه فلزی آلومینیومی، محصور شده است. ضربه زننده به‌صورت استوانه‌ای سر تخت در نظر گرفته شده است. در مدل تحلیلی فرض شده است که لایه‌های فلزی بر اثر تنش ایجاد شده در سطح مشترک برخورد، دچار واماندگی شوند. همچنین جذب انرژی هانی کمب نیز به کمک مدل ویرزبیک می‌گردد. جذب انرژی توسط ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-هانی کمب 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 و اندازه سلول هانی کمب در میزان جذب انرژی ساندویچ پانل بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: پرتابه، ورق ساندویچی، هانی کمب، آلومینیوم، سوراخ شدن

Analysis of Ballistic Impact of Blunt Striker on Aluminum-Honeycomb Panels

S. S. Jafari

S. Feli

Young Researchers & Elite Club

Mechanical Engineering Department

Islamic Azad University, Hamedan Branch

Kermanshah Razi University

(Received: 10 July, 2013; Accepted: 22 December, 2013)

ABSTRACT

In this paper, a new analytical model has been presented for energy absorption of aluminum-honeycomb sandwich panels under high velocity impact. In high velocity impact, striker with initial velocity penetrates into target and perforates it completely and exits by residual velocity. The panels consist of hexagonal honeycomb core sandwiched between two aluminum skins. In analytical model cylindrical projectile with flat ended have been considered. It is supposed that aluminum skins failure by mean resistive pressure. Energy absorption of honeycomb has been determined by wierzbicki model. Energy balancing equation has been employed for determination the ballistic limit and residual velocity of striker. The results of ballistic limit and residual velocity of striker computed by new model have good agreement with experimental results. Also the effects of projectile mass and diameter and cell diameter of honeycomb in energy absorption of sandwich panel has been investigated.

Keywords: Striker, Sandwich Panel, Honeycomb, Aluminum, Perforation

۱- کارشناس ارشد: sjd.jafari@yahoo.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): felisaeid@gmail.com

۱- مقدمه

پانل‌های ساندویچی آلومینیوم- هانی کمب به دلیل استحکام و سختی مناسب، به طور وسیعی در صنایع هوافضا استفاده می‌شوند. از جمله موارد کاربرد این پانل‌ها می‌توان به تیغه روتور بالگردها، بدنه کشتی‌ها، موتور جت و غیره اشاره نمود [۱]. در مواردی ممکن است این پانل‌ها مورد اصابت اجسام مختلف قرار گیرند. بنابراین بررسی رفتار پانل‌ها هنگام برخورد پرتابه امری ضروری است. در دهه‌های اخیر مطالعات بسیاری بر روی برخورد و نفوذ پرتابه صورت گرفته است. 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 انرژی دارد و اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه در مورد اهداف فلزی و کامپوزیتی می‌باشد. در ادامه، ابتدا کارهای انجام شده در زمینه برخورد پرتابه به اهداف فلزی و هانی کمب و تحقیقات انجام شده در زمینه ضربه به پانل‌های ساندویچی بررسی می‌شود.

در زمینه اهداف فلزی، بکمن و گلداسمیت^۱ [۲] و کوربت^۲ و همکاران [۳] 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. قاسمی‌نیا و واحدی [۴] نفوذ پرتابه میله‌ای در اهداف نیمه‌بی‌نهایت فلزی را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل نفوذ واحدی نسبت به سایر مدل‌های موجود در این زمینه، دقیق‌تر و کاربردی‌تر است. همچنین پل و همکاران نفوذ میل پرتابه مخروطی در صفحات نازک فلزی را به صورت تحلیلی بررسی کردند [۵].

در زمینه اهداف هانی کمب، مک فرلاند^۳ با ارائه یک مدل نیمه تجربی، خرد شدن هانی کمب‌هایی با سلول شش ضلعی را بررسی نمود [۶]. ویرزبیکي^۴ با توسعه مدل مک فرلاند، مدلی را ارائه نمود که تغییر شکل‌های خمشی و انبساطی هانی کمب‌ها را نیز در بر می‌گیرد [۷]. مدل ویرزبیکي یکی از بهترین مدل‌های جهت بررسی رفتار سازه‌های هانی کمب می‌باشد، به طوری که بسیاری از دانشمندان از این مدل برای بررسی رفتار هانی کمب‌ها استفاده می‌کنند [۸ و ۹]. وی از بقای انرژی و معادلات حاکم بر

رفتار پلاستیک مواد استفاده نموده است.

گلداسمیت و لویی^۵ [۹] ویژگی‌های تغییر شکل و جذب انرژی هانی کمب‌های آلومینیومی را در حالت بارگذاری استاتیکی و در اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای و کروی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای ۱۰ ترکیب مختلف پرتابه- هدف سرعت حد بالستیک را به دست آوردند. این آزمایش‌ها نشان داد که با وجود شرایط اولیه یکسان، به خاطر تغییر محل تماس اولیه پرتابه با هدف، مقادیر سرعت حد بالستیک متفاوتی به دست می‌آید. محققین داخل کشور نیز کارهای ارزشمندی در زمینه برخورد پرتابه به هانی کمب‌ها انجام داده‌اند. لیاقت و همکاران [۸] پدیده خرد شدن شبه‌استاتیکی سازه‌های هانی کمب را به صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها مودهای تغییر شکل المان زاویه‌ای را تشریح و سپس با استفاده از روش انرژی نیروی لازم برای خرد شدن آن و نیز نصف طول موج تا شدن این المان را بررسی کردند. نتایج این مدل مطابقت مناسبی با داده‌های تجربی دارد. همچنین لیاقت و همکاران [۱۰] سوراخ شدن هانی کمب‌ها را در برخورد بالستیک به صورت تحلیلی بررسی کردند.

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- هانی کمب، آلومینیوم- فوم و آلومینیوم- هانی کمب اشاره نمود.

فعلی و نامداری‌پور [۱۱] مدل تحلیلی جدیدی برای سوراخ شدن پانل ساندویچی کامپوزیت- هانی کمب ارائه دادند. در این مدل تحلیلی، کامپوزیت به صورت الیاف بافته شده تار و پود، در نظر گرفته شده است. همچنین فعلی و جعفری [۱۲] سوراخ شدن پانل ساندویچی فوم- کامپوزیت را به صورت تحلیلی بررسی کردند. از ویژگی‌های مدل ارائه شده، در نظر گرفتن سازوکارهای مختلف جذب انرژی می‌باشد. به طوری که با در نظر گرفتن این سازوکارها، مطابقت خوبی بین داده‌های تجربی و نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده وجود دارد.

هزیزان و کنتول^۶ [۱۳] رفتار سازه‌های ساندویچی با هسته هانی کمب را تحت ضربه سرعت پایین به صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها از قانون تورفتگی میر^۷ به منظور محاسبه نیروی وارده

1-Backman and Goldsmith

2- Corbett

3- Mc Farland

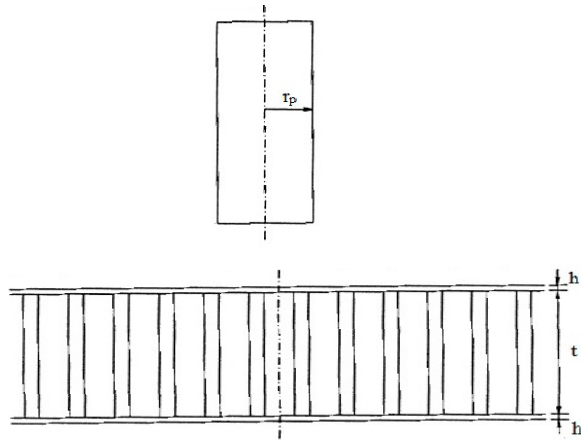
4- Wierzbicki

5- Goldsmith and Louie

6- Hazizan and Cantwell

7- Meyer Indentation Law

توسط هدف جذب می‌شود. در واقع کاهش انرژی جنبشی پرتابه صرف تغییر شکل هدف شده و انرژی کرنشی هدف افزایش می‌یابد. شکل ۱ برخورد پرتابه سرتخت به پانل آلومینیوم- هانی کمب را نشان می‌دهد. به طوری که ضخامت لایه‌های آلومینیومی h و ضخامت هانی کمب t می‌باشد.



شکل (۱): برخورد پرتابه سرتخت به پانل آلومینیوم- هانی کمب.

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. با توجه به صلب بودن پرتابه و ضخامت کم لایه‌های رویی و زیری، مقدار نیروی مقاوم در برابر نفوذ مستقل از مقدار نفوذ در نظر گرفته شده است.
 ۳. مرزهای پانل در همه جهات مقید شده است.
- در مدل تحلیلی جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی و هسته هانی کمب به صورت مجزا محاسبه می‌شود. برای محاسبه جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی از تئوری فشار مقاومتی استفاده شده است. همچنین به کمک مدل ویرزبیکو جذب انرژی هانی کمب در بارگذاری شبه‌استاتیکی محاسبه و با استفاده از ضریب افزایش دینامیکی، جذب انرژی هسته در بارگذاری دینامیکی به دست می‌آید. در نهایت با استفاده از معادله موازنه انرژی سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه به دست می‌آید.

۲-۱- تنش در سطح مشترک برخورد

تنش متوسطی (σ) که ورق رویی با ضخامت محدود، به منظور مقابله با نفوذ پرتابه و سوراخ شدن به پرتابه اعمال می‌کند شامل دو بخش است: فشار مقاومتی استاتیکی (σ_s) که ناشی از تغییر

به پانل استفاده کردند. در مدل ارائه شده سازوکارهای خمش، برش و اثرات تماسی در نظر گرفته شده و مطابقت مناسبی بین نتایج این مدل و داده‌های تجربی وجود دارد.

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

گلداسمیت^۱ و همکاران [۱۴] برخورد پرتابه‌های سرتخت، سرکروی و سر مخروطی به پانل‌های ساندویچی آلومینیوم- هانی کمب به صورت تجربی بررسی کردند. هوفت و پارک^۲ [۱] برخورد بالستیک پرتابه‌های استوانه‌ای سرتخت و سرکروی به پانل آلومینیوم- هانی کمب به صورت تحلیلی بررسی کردند. در این مدل نیز فرآیند نفوذ پرتابه در سه مرحله در نظر گرفته شده است: نفوذ پرتابه در لایه بالایی، نفوذ پرتابه در هانی کمب و در نهایت نفوذ پرتابه در لایه زیری. مدل ارائه شده مطابقت خوبی با داده‌های تجربی دارد اما مهم‌ترین عیب آن پیچیدگی معادلات حاکم و وابسته بودن معادلات هر مرحله به مرحله قبل است.

هدف این مقاله ارائه روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه میزان جذب انرژی ورق‌های ساندویچی آلومینیوم- هانی کمب تحت اثر ضربه سرعت بالا می‌باشد. به طوری که هسته پانل هانی کمب و لایه‌های بالایی و پایینی از جنس آلومینیوم می‌باشند. پرتابه نیز به صورت سرتخت در نظر گرفته شده است. با به دست آوردن معادلات مربوط به جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی و هسته هانی کمب و حل آنها به کمک برنامه رایانه‌ای، میزان انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی طی فرآیند نفوذ پرتابه تعیین و با استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه محاسبه می‌شود. از ویژگی‌های مدل تحلیلی، سادگی معادلات حاکم و روش حل مسئله می‌باشد، به نحوی که با سادگی معادلات، نتایج مدل هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی دارد. در نهایت، اثرات جرم و قطر پرتابه و اندازه سلول هانی کمب در میزان جذب انرژی ساندویچ پانل بررسی شده است.

۲-۲ مدل تحلیلی

در طی فرآیند نفوذ پرتابه در هدف، با توجه به جنس هدف و پارامترهای هندسی پرتابه، قسمتی از انرژی جنبشی اولیه پرتابه

1- Goldsmith

2- Hoo Fatt and Park

(۲) به دست می‌آید. همچنین A سطح مقطع جانبی پرتابه می‌باشد و با توجه به فرض ۲، می‌توان نوشت:

$$A = \pi R_p^2, \quad (۴)$$

به طوری که شعاع پرتابه می‌باشد. بنابراین، انرژی جذب شده توسط ورق آلومینیومی برابر است با:

$$E_{abs} = \int_0^{\delta} F d_{\delta} = \pi \delta \sigma_y R_p^2 \left[\eta + \lambda \sqrt{(\rho_t / \sigma_y)} V_i \right], \quad (۵)$$

به طوری که δ میزان فرورفتگی پرتابه در آلومینیوم می‌باشد و به پارامترهای مختلفی از جمله جنس هدف و سرعت پرتابه بستگی دارد. هنگامی که انرژی جذب شده توسط هدف با انرژی جنبشی اولیه پرتابه ($E_i = \frac{M_p V_i^2}{2}$) برابر باشد، پرتابه در هدف متوقف می‌گردد. 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:

$$E_{AL} = \pi h \sigma_y R_p^2 \left[\eta + \lambda \sqrt{(\rho_t / \sigma_y)} V_b \right], \quad (۶)$$

که در آن، V_b سرعت حد بالستیک در برخورد پرتابه به اهداف آلومینیومی می‌باشد. با جایگذاری $E_k = \frac{M_p V_b^2}{2}$ در رابطه فوق، مقدار سرعت حد بالستیک به دست می‌آید:

$$V_b = \frac{\pi \lambda \sqrt{\rho_t \sigma_y} D_p^2 h}{4 M_p} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{8 \eta M_p}{\pi \lambda^2 \rho_t D^2 h}} \right], \quad (۷)$$

که در آن، M_p و D_p به ترتیب جرم و قطر پرتابه می‌باشد.

نفوذ پرتابه در هانی کعب: در اثر برخورد پرتابه به پانل ساندویچی، بخشی از انرژی جنبشی پرتابه توسط هانی کعب جذب می‌شود. جذب انرژی هانی کعب به کمک مدل ویرزیکی بررسی می‌شود. برای بررسی جذب انرژی هانی کعب فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۸]:

۱. رفتار سازه به صورت صلب-خمیری کامل با تنش سیلان، ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۲. طول موج کمانش طی تشکیل چین خوردگی‌ها ثابت است.

۳. به منظور ایجاد برش، مچالگی و لهشدهگی قطر پرتابه از اندازه سلول هانی کعب تا حدودی بیشتر در نظر گرفته شده است.

شکل‌های الاستیک-پلاستیک هدف می‌باشد و فشار مقاومتی دینامیکی (σ_d) که اثرات سرعت را در نظر می‌گیرد. بنابراین:

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_d. \quad (۱)$$

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 [۱۵]:

$$\sigma = \left[\eta + \lambda \sqrt{(\rho_t / \sigma_t)} V_i \right] \sigma_t, \quad (۲)$$

که در آن، σ_t و ρ_t به ترتیب استحکام شبه‌استاتیکی و چگالی هدف می‌باشند. همچنین V_i سرعت اولیه پرتابه می‌باشد. λ و η ثابت‌های تجربی هستند که به جنس هدف و شکل پرتابه بستگی دارند. معمولاً فشار مقاومتی یک تابع چند جمله‌ای از سرعت نفوذ می‌باشد [۲]. 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 η و خواص مکانیکی هدف و همچنین مقدار λ در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول (۱): مقادیر η و λ برای اهداف فلزی [۱۵].

نوع پرتابه	η	λ
سرتخت	$\frac{1}{2} \left[1 + \ln \frac{2E}{(5-4\nu)\sigma_y} \right]$	۲

به طوری که E و ν به ترتیب مدول یانگ و ضریب پواسون فلز می‌باشند.

۲-۲- نفوذ پرتابه در هدف

در برخورد های سرعت بالا، پرتابه در هدف نفوذ می‌کند، به طوری که میزان نفوذ پرتابه به پارامترهای مختلفی از جمله سرعت اولیه پرتابه و جنس هدف بستگی 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.

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:

$$F = \sigma A, \quad (۳)$$

که در آن، σ فشار متوسط اعمالی به پرتابه می‌باشد و از رابطه

هر المان پایه موردنظر از دو المان زاویه‌ای و هر سلول هانی کمب به‌طور متوسط از چهار المان پایه تشکیل می‌شود. ابتدا انرژی تلف شده در یک المان پایه محاسبه و سپس برای کل سلول هانی کمب توسعه می‌یابد.

طی چین خوردگی، سه نوع تغییر شکل اصلی در هر سلول Y شکل از هانی کمب به‌وجود می‌آید که این سه تغییر شکل شامل ایجاد سطح تروئیدی، خطوط لولای افقی و لولای مایل می‌باشد. جذب انرژی یک المان پایه هانی کمب (E_{sh}) که در شکل ۲ نشان داده شده برابر است با [۷]:

$$E_{sh} = 2[E_1 + 2E_2 + E_3], \quad (۸)$$

که در آن، E_1 انرژی تلف شده در اثر انبساط خمیری (ایجاد سطح تروئیدی)، E_2 انرژی تلف شده در اثر حرکت مفصل خمیری افقی و E_3 انرژی تلف شده در اثر حرکت مفصل خمیری مایل می‌باشند و مقادیر آنها برابر است با:

$$E_1 = 16M_0 \frac{b}{h_c} H I_1(\psi_0), \quad (۹)$$

$$E_2 = \pi D M_0, \quad (۱۰)$$

$$E_3 = \frac{4M_0 H^2}{b} I_3(\psi_0), \quad (۱۱)$$

به‌طوری‌که شعاع کوچک سطح تروئیدی، H نصف طول موج کماتش خمیری، h_c ضخامت دیواره‌های سلول هانی کمب، D طول المان زاویه‌ای، ψ_0 نصف زاویه بین صفحات المان زاویه‌ای و M_0 لنگر کامل خمیری مقطع می‌باشد که با تنش جریان (σ_0) و ضخامت دیواره‌های سلول هانی کمب رابطه دارد [۱۶]:

$$M_0 = \frac{\sigma_0 h_c^2}{4}. \quad (۱۲)$$

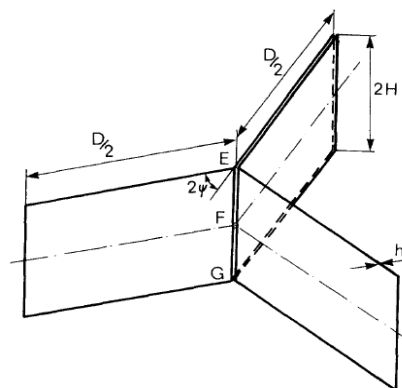
همچنین $I_1(\psi_0)$ و $I_3(\psi_0)$ از روابط زیر به‌دست می‌آید [۷ و ۸]:

$$I_1(\psi_0) = \frac{w}{\tan \psi_0} \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha \left\{ \cos \psi_0 - \cos \left(\psi_0 - \frac{\beta}{w} \right) \right\} d\alpha, \quad (۱۳)$$

$$I_3(\psi_0) = \frac{1}{\tan \psi_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \alpha}{\sin \gamma} d\alpha, \quad (۱۴)$$

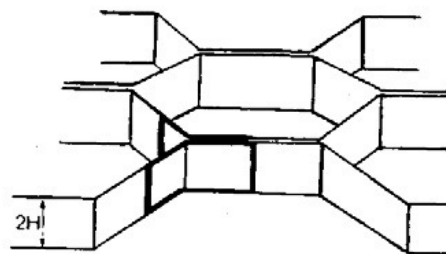
به طوری که α زاویه دوران المان زاویه‌ای، β و γ زوایایی در المان زاویه‌ای پس از تغییر شکل می‌باشند که در شکل ۵ مشخص شده‌اند. همچنین مقدار w برابر است با [۷]:

یک المان Y شکل از یک سلول با زاویه دلخواه مطابق شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود.



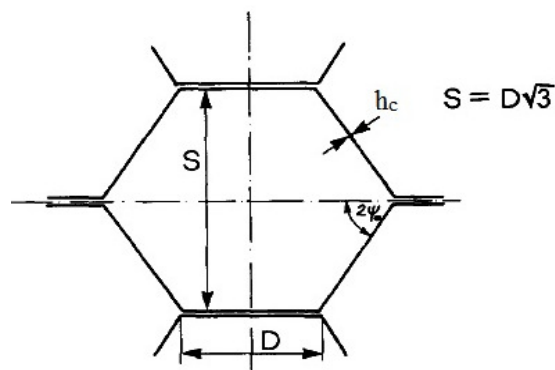
شکل (۲): المان پایه مدل ویرزیکی [۷].

فرض می‌شود که یک سازه هانی کمب از اجتماع این المان‌ها تشکیل شده است (شکل ۳).



شکل (۳): سلول شش‌ضلعی متشکل از المان‌های پایه ویرزیکی [۸].

ابعاد یک سلول هانی کمب شش‌ضلعی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل (۴): ابعاد یک سلول هانی کمب شش‌ضلعی [۷].

(اندازه سلول) می‌باشند.

مطابق مشاهدات تجربی [۱]، انرژی جذب شده توسط هانی کمب در بارگذاری دینامیکی (E_{FD})، $1/3$ برابر بارگذاری استاتیکی است، یعنی:

$$E_{Dh} = 1.3E_{sh} \quad (23)$$

انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی آلومینیوم-هانی کمب: در قسمت‌های قبلی انرژی جذب شده توسط لایه آلومینیومی و هانی کمب محاسبه گردید. بنابراین، انرژی جذب شده توسط پانل از مجموع معادلات (۶ و ۲۳) به دست می‌آید:

$$E_T = 2E_{Al} + E_{Dh} \quad (24)$$

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

$$V_{bs} = \sqrt{\frac{2E_T}{M_p}} \quad (25)$$

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 در نظر گرفتن موازنه انرژی، انرژی جنبشی اولیه پرتابه برابر با مجموع انرژی که صرف سوراخ شدن پانل و همچنین انرژی جنبشی پرتابه هنگام خروج از پانل می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2}M_p V_i^2 = E_T + \frac{1}{2}M_p V_r^2 \quad (26)$$

با در نظر گرفتن موازنه انرژی، سرعت باقیمانده پرتابه (V_{rs}) از رابطه زیر به دست می‌آید:

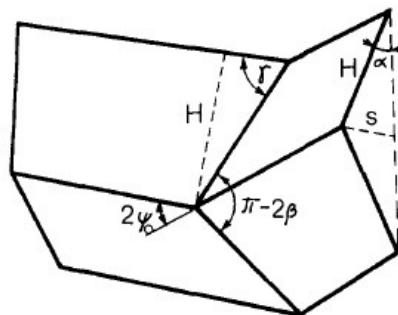
$$V_{rs} = (V_i^2 - V_{bs}^2)^{0.5} \quad (27)$$

در واقع، در مدل تحلیلی جذب انرژی پانل که برابر جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی و هسته هانی کمب می‌باشد محاسبه و سپس با استفاده از موازنه انرژی سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه به دست می‌آید.

۳- نتایج

هدف اصلی مدل تحلیلی ارائه شده، تعیین سرعت حد بالستیک در برخورد پرتابه سرتخت به پانل‌های ساندویچی آلومینیوم-هانی کمب می‌باشد. 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

$$w = \frac{\pi}{\pi - 2\psi_0} \quad (15)$$



شکل (۵): هندسه المان زاویه‌ای پس از تغییر شکل [۷].

با توجه به اینکه سلول‌های هانی کمب به صورت شش ضلعی در نظر گرفته شده‌اند، $2\psi_0 = \frac{\pi}{6}$ مقدار $I_1(\frac{\pi}{6})$ و $I_3(\frac{\pi}{6})$ با توجه به رابطه (۱۳ و ۱۴) به دست می‌آید:

$$I_1(\frac{\pi}{6}) = 1.05, \quad (16)$$

$$I_3(\frac{\pi}{6}) = 2.39. \quad (17)$$

با توجه به شکل ۳ انرژی جذب شده توسط سلول هانی کمب (E'_{sh})، چهار برابر انرژی جذب شده توسط المان پایه می‌باشد یعنی:

$$E'_{sh} = 4E_{sh} \quad (18)$$

کار خارجی انجام شده طی خرد شدن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_{ext} = P_m \cdot 2H, \quad (19)$$

که در آن، P_m متوسط نیروی خرد شدن است. با برابر قرار دادن روابط (۱۸ و ۱۹)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{P_m}{M_0} = \left(B_1 \frac{b}{h_c} + B_2 \frac{D}{H} + B_3 \frac{H}{b} \right) \quad (20)$$

به طوری که

$$B_1 = 64I_1, \quad B_2 = 8\pi, \quad B_3 = 16I_3$$

در نهایت با کمینه‌سازی رابطه (۲۰) یعنی با در نظر گرفتن

$$\frac{\partial P_m}{\partial H} = 0 \quad \text{روابط (۲۱ و ۲۲) به شرح زیر می‌باشند:}$$

$$H = 0.8213 \sqrt[3]{h_c D^2} = 0.5693 \sqrt[3]{h_c S^2} \quad (21)$$

$$P_m = 8.61 \sigma_0 \sqrt[3]{h_c^5 D} = 7.17 \sigma_0 \sqrt[3]{h_c^5 S} \quad (22)$$

در روابط فوق، σ_0 و h_c به ترتیب نشان دهنده ضخامت دیواره سلول، تنش سیال و فاصله دو ضلع روبه‌رو در سلول شش ضلعی

جدول (۵): مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با

داده‌های مدل تحلیلی هوفت و پارک [۱].

مورد	سرعت حد بالستیک (m/s)	
	هوفت و پارک [۱]	مدل ارائه شده
۱	۴۹/۳۲	۵۰/۹۸
۲	۵۱/۸۷	۵۱/۳۹
۳	۸۱/۳	۷۷/۳۱

همان‌طور که در جدول‌های ۴ و ۵ مشخص است، مدل ارائه شده سرعت حد بالستیک را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند. به‌طوری‌که بیشترین خطا که در مورد ۳ رخ داده است، در مقایسه با داده‌های تجربی برابر ۹/۰۵٪ و در مقایسه با داده‌های مدل تحلیلی هوفت و پارک ۴/۹۱٪ می‌باشد و این حاکی از دقت قابل قبول مدل ارائه شده می‌باشد. میزان جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی، هسته هانی کمب و پانل ساندویچی در جدول ۶ ذکر شده است.

جدول (۶): میزان جذب انرژی لایه‌ها، هسته و پانل.

مورد	انرژی جذب شده (J)	
	لایه‌های رویی و زیری	هسته هانی کمب
۱	۴۸/۸۳۷۹	۰/۰۰۱۳
۲	۴۸/۸۳۷۹	۰/۰۰۹۵
۳	۱۳/۹۱۸۳	۰/۰۰۹۵

مقایسه نتایج این جدول نشان می‌دهد که لایه‌های رویی و زیری بیشترین نقش را در جذب انرژی پانل دارند و هسته هانی کمب مقدار کمی از انرژی جنبشی پرتابه را جذب می‌کند. برای بررسی و صحت‌گذاری مدل تحلیلی در پیش‌بینی سرعت باقیمانده منابع و داده‌های محدودی وجود دارد به طوری که با بررسی نویسندگان تنها یک مورد برای مقایسه وجود دارد. در برخورد پرتابه سر تخت با سرعت اولیه ۱۴۵ m/s و شعاع برخورد پرتابه ۶/۳۵ mm و جرم ۳۷ g به پانل آلومینیوم-هانی کمب با مشخصات ضخامت لایه آلومینیومی ۰/۷۹ mm، ضخامت هسته ۱۵/۹ mm، اندازه سلول ۶/۳۵ mm و ضخامت دیواره سلول هانی کمب ۰/۶۳۵ mm مقدار سرعت باقیمانده ۱۳۶ m/s می‌باشد [۱۴]. مدل تحلیلی ارائه شده سرعت باقیمانده را تحت همین شرایط

بیشتر از کاهش انرژی جنبشی پرتابه شود، هدف دچار شکست می‌شود. برای بررسی صحت نتایج مدل تحلیلی ارائه شده، نتایج حاصل از مدل با داده‌های تجربی مرجع [۱۴] و نتایج مدل تحلیلی هوفت و پارک [۱] مقایسه شده است. خواص مکانیکی لایه‌های آلومینیومی و هسته هانی کمب در جدول‌های ۲ و ۳ ذکر شده‌اند.

جدول (۲): خواص مکانیکی لایه‌های زیری و رویی آلومینیومی [۱۷].

نام ماده	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	σ_y (MPa)
AL-2024-O	۲۸۰۰	۷۳	۱۶۵/۵

جدول (۳): خواص مکانیکی هانی کمب [۱۴].

نام ماده	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	σ_0 (MPa)
AL-5052- H19	۲۶۷۸	۷۰	۲۷۲/۵

معمولاً نتایج حاصل از مدل تحلیلی و داده‌های تجربی در حد بالستیک دارای بیشترین خطا خواهد بود. بنابراین، به‌منظور صحت‌گذاری بر مدل تحلیلی، نتایج این مدل در محاسبه سرعت حد بالستیک برای پرتابه سر تخت در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه و به‌ترتیب با داده‌های تجربی مرجع [۱۴] و مدل تحلیلی مرجع [۱] مقایسه و مقدار درصد خطا بیان شده است. این نتایج برای پانل با لایه‌های آلومینیومی به ضخامت ۰/۷۹ mm، هسته هانی کمب به ضخامت ۱۹/۰۵ mm و اندازه سلول ۶/۳۵ mm ارائه شده است. همچنین ضخامت دیواره سلول هانی کمب در مورد ۱ برابر ۰/۲۵۴ mm و در موارد ۲ و ۳ برابر ۰/۰۵۸ mm می‌باشد. لازم به ذکر است که جرم و شعاع پرتابه در موارد ۱ و ۲ به‌ترتیب معادل ۳۷ g و ۶/۳۵ mm و در مورد ۳ به‌ترتیب برابر ۴/۶۶ g و ۳/۱۷ mm می‌باشند.

جدول (۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های تجربی [۱۴].

مورد	سرعت حد بالستیک (m/s)	
	تجربی [۱۴]	مدل ارائه شده
۱	۵۰	۵۰/۹۸
۲	۵۳	۵۱/۳۹
۳	۸۵	۷۷/۳۱

هسته هانی کمب در جدول ۳ ارائه شده است.

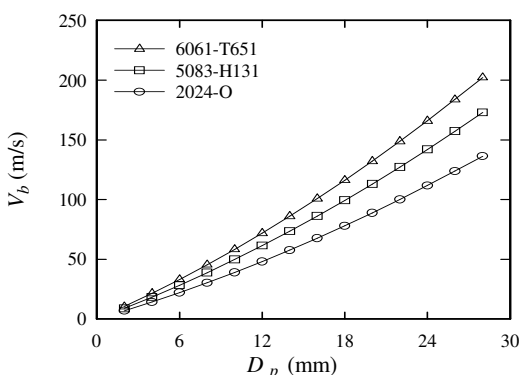
جدول (۷): خواص مکانیکی لایه‌های زیری و رویی آلومینیومی [۴].

نام ماده	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	σ_Y (MPa)
6061-T651	۲۷۱۰	۶۹	۳۸۰

جدول (۸): خواص مکانیکی لایه‌های زیری و رویی آلومینیومی [۱۸].

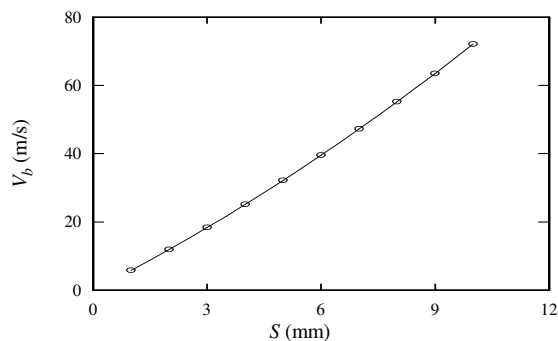
نام ماده	ρ (Kg/m ³)	E (GPa)	σ_Y (MPa)
5083-H131	۲۶۶۰	۷۰/۳	۲۷۶

تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب قطر پرتابه و برای آلیاژهای مختلف لایه‌های آلومینیومی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب قطر پرتابه برای پانل آلومینیوم- هانی کمب با لایه‌های متفاوت.

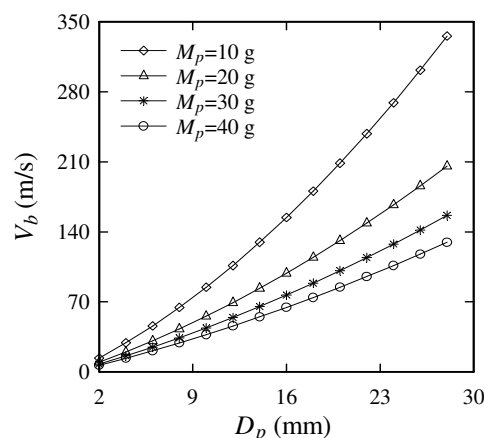
در این شکل $M_p = 37$ g، $h = 0.79$ mm، $t = 1.05$ mm، $S = 6.35$ mm و $h_c = 0.635$ mm می‌باشند. مطابق این شکل حد بالستیک آلیاژ 6061-T651 از آلیاژهای 5083-H131 و 2024-O بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده جذب انرژی این آلیاژ نسبت به دو آلیاژ دیگر است. اثرات اندازه سلول هسته هانی کمب پانل ساندویچی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل (۸): منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب اندازه سلول هانی کمب برای پانل آلومینیوم- هانی کمب.

۱۳۵/۵۸ m/s پیش‌بینی می‌کند. لذا اختلاف مدل تحلیلی و مقدار داده‌های تجربی در محاسبه سرعت باقیمانده ناچیز می‌باشد.

شکل ۶ منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب تغییرات قطر پرتابه سرتخت و برای جرم‌های مختلف پرتابه را نشان می‌دهد.



شکل (۶): منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک پرتابه سرتخت بر حسب قطر پرتابه.

در این شکل $S = 6.35$ mm، $t = 1.05$ mm، $h = 0.79$ mm و $h_c = 0.635$ mm می‌باشند. مطابق شکل ۶ با افزایش قطر پرتابه و با ثابت در نظر گرفتن جرم آن، حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. دلیل افزایش حد بالستیک این است که با افزایش قطر پرتابه، سطحی از رویه‌های آلومینیومی که دچار شکست می‌شوند نیز افزایش می‌یابد، بدین خاطر انرژی جذب شده توسط رویه‌ها نیز افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش قطر پرتابه، تعداد سلول‌های مورد برخورد و در نتیجه تعداد اجزائی که دچار تغییر شکل می‌شوند نیز افزایش می‌یابند. بنابراین، انرژی جذب شده توسط هسته هانی کمب نیز افزایش می‌یابد. از این رو، با توجه به افزایش جذب انرژی پانل، سرعت 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.

در ادامه با توجه به مطابقت مناسب نتایج مدل تحلیلی با داده‌های تجربی، اثرات آلیاژ مختلف آلومینیوم بر روی سرعت حد بالستیک بررسی می‌شود. در این بخش آلیاژهای 2024-O، 6061-T651 و 5083-H131 بررسی می‌شوند که خواص آنها به ترتیب در جدول‌های ۲، ۷ و ۸ ذکر شده است. همچنین خواص

2. Backman, M.E. and Goldsmith, W. "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets", Int. J. Eng. Sci., Vol. 16, No. 1, pp. 1-99, 1978.
3. Corbett, G.G., Reid, S.R. and Johnson, W. "Impact Loading of Plates and Shells by Free-flying Projectiles: A review", Int. J. Impact Eng., Vol. 18, No. 2, pp. 141-230, 1996.
4. Ghasemi-Nia, A. and Vahedi, K. "Analysis and Comparison of Projectile Penetration Models into Semi-Infinite Metal Targets", Aero. Mech J., Vol. 1, No. 3, pp. 83-96, 2005 (In Persian).
5. Pol, M.H., Liaghat, G.H., and Hoseini, A.V. "Analysis of Oblique Penetration of Conical Projectiles into Thin Metallic Plates", Aero. Mech J., Vol. 5, No. 2, pp. 1-10, 2008 (In Persian).
6. Mc Farland, R.K. "Hexagonal Cell Structures under Post-Buckling Axial Load", AIAA J., Vol. 1, No. 6, pp. 1380-1385, 1963.
7. Wierzbicki, T. "Crushing Analysis of Metal Honeycombs", Int. J. Impact Eng., Vol. 1, No. 2, pp. 157-174, 1983.
8. Liaghat, G.H., Sadighi, M., Daghyani, H.R. and Alavi Nia, A. "Crushing of Honeycomb Panels under Quasi-static Load", Univers. Coll. Eng., Vol. 37, No. 1, pp. 145-156, 2003 (In Persian).
9. Goldsmith, W. and Louie, D.L. "Axial Perforation of Aluminum Honeycombs by Projectiles", Int. J. Sol. and Struc., Vol. 32, No. 8-9, pp. 1017-1046, 1995.
10. Liaghat, G.H., Alavi Nia, A., Daghyani, H.R. and Sadighi, M., "Ballistic Limit Evaluation for Impact of Cylindrical Projectiles on Honeycomb Panels", Thin-Wall. Struc., Vol. 48, No. 1, pp. 55-61, 2010.
11. Sabouri, H. and 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]", Compos. Struc., Vol. 92, No. 2, pp. 600-601, 2010.
12. Hoo Fatt, M.S. and Sirivolu, D. "A Wave Propagation Model for The High Velocity Impact Response of A Composite Sandwich Panel", Int. J. Impact Eng., Vol. 37, No. 2, pp. 117-130, 2010.
13. Feli, S. and Namdari Pour, M.H. "An Analytical Model for Composite Sandwich Panels with Honeycomb Core Subjected to High-Velocity Impact", Compos. Part B: Eng., Vol. 43, No. 5, pp. 2439-2447, 2012.
14. Jafari, S.S. and Feli, S. "Perforation of Composite-Foam Sandwich Panel by Flat-Ended Projectile", Energic. Mat., Vol. 16, No. 3, pp. 63-72, 2012.
15. Hazizan, M.A. and Cantwell, W.J. "The Low Velocity Impact Response of an Aluminum Honeycomb Sandwich Structure", Compos. Part B: Eng., Vol. 34, No. 8, pp. 679-687, 2003.
16. Goldsmith, W., Wang, G.-T., Li, K. and Crane, D. "Perforation of Cellular Sandwich Plates", Int. J. Impact Eng. Vol. 19, No. 5-6, pp. 361-379, 1997.

در این شکل $t = 19\text{mm}$, $h = 1\text{mm}$, $M_p = 37\text{ g}$ و $h_c = 0.254\text{ mm}$ در نظر گرفته شده است. همچنین قطر پرتابه برابر اندازه سلول است. اگر قطر پرتابه کمتر از اندازه سلول و یا در حدود آن باشد، پرتابه در هسته نفوذ خواهد کرد بدون آنکه هسته مجاله شود [۱]. مطابق این شکل برای پرتابه و سازه با مشخصات هندسی ذکر شده، با افزایش اندازه سلول هسته هانی کمب پانل سرعت حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش اندازه سلول هانی کمب میزان جذب انرژی پانل نیز افزایش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه‌ی سرعت حد بالستیک، سرعت باقیمانده و انرژی جذب شده توسط لایه‌های مختلف صفحات ساندویچی آلومینیوم-هانی کمب ارائه شده است. در مدل تحلیلی، واماندگی لایه‌های رویی و زیری آلومینیومی بر اساس موج تنش غالب در نظر گرفته شده است. همچنین از مدل ویرزبکی برای تحلیل هانی کمب استفاده 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.

- در برخورد پرتابه سرتخت، بیشترین جذب انرژی توسط لایه‌های آلومینیومی صورت می‌گیرد و هانی کمب تأثیر کمی در جذب انرژی دارد.

- حد بالستیک آلیاژ آلومینیوم 6061-T651 از آلیاژهای 5083-H131 و 2024-O بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده جذب انرژی بیشتر این آلیاژ نسبت به دو آلیاژ دیگر است.

- با توجه به شرایط به کار رفته در این مقاله و برای پرتابه بررسی شده، با افزایش اندازه سلول هسته هانی کمب، پانل سرعت حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش اندازه سلول هانی کمب میزان جذب انرژی پانل نیز افزایش می‌یابد. به طوری که با افزایش ۸۰٪ اندازه سلول هانی کمب، سرعت حد بالستیک ۴۵/۱۷٪ افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

1. Hoo Fatt, M.S. and Park, K.S. "Perforation of Honeycomb Sandwich Plates by Projectiles", Compos Part A: App. Sci. Manu., Vol. 31, No. 8, pp. 889-899, 2000.

18. Forrestal, M.J., Luk, V.K. and Brar, N.S. "Perforation of Aluminum Armor Plates with Conical-Nose Projectiles", *Mech. Mat.*, Vol. 10, No. 1-2, pp. 97-105, 1990.
17. Hou, W., Zhu, F., Lu, G. and Fang, D.N. "Ballistic Impact Experiments of Metallic Sandwich Panels with Aluminum Foam Core", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 37, No. 10, pp. 1045-1055, 2010.