



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۵۷ تا ۱۶۸

Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 157-168



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک

AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
ASJR-ME

بررسی تحلیلی جذب انرژی ورق‌های ساندویچی با هسته لانه زنبوری

سید سجاد جعفری^۱، سعید فعلی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

(دریافت: ۱۳۹۳/۵/۷ پذیرش: ۱۳۹۴/۳/۹)

چکیده

هدف این مقاله ارائه روش تحلیلی جدیدی برای محاسبه میزان جذب انرژی ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-لانه‌زنبوری تحت اثر ضربه بالستیک است. ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-لانه‌زنبوری دارای هسته لانه‌زنبوری شش‌ضلعی هستند که بین دو صفحه فلزی آلومینیومی، محصور شده‌اند. ضربه‌زننده به صورت پرتابه صلب استوانه‌ای سرتخت در نظر گرفته شده است. با استفاده از مدل جرم و فنر، جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی در بارگذاری شبه‌استاتیکی و با در نظر گرفتن مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی محاسبه شده است. همچنین جذب انرژی لانه‌زنبوری نیز به کمک مدل ویرزبکی محاسبه می‌شود. جذب انرژی توسط ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-لانه‌زنبوری 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 لانه‌زنبوری در میزان جذب انرژی ساندویچ پانل بررسی شده است.

کلمات کلیدی:

ورق ساندویچی، لانه‌زنبوری، آلومینیوم، سوراخ شدن، جذب انرژی.

۱- مقدمه

پانل‌های ساندویچی آلومینیوم-لانه‌زنبوری به دلیل استحکام و سفتی مناسب به‌طور 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 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 ادامه، ابتدا کارهای انجام‌شده در زمینه برخورد پرتابه به اهداف فلزی و لانه‌زنبوری و سپس تحقیقات انجام‌شده در زمینه ضربه به پانل‌های ساندویچی بررسی می‌شود.

در زمینه اهداف فلزی، بکمن و گلداسمیت [۲] و کوریت و همکاران [۳] 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 [۴] نفوذ پرتابه در آلیاژهای آلومینیوم را به‌صورت 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.

با تقویت اهداف به‌وسیله مواد دیگر، تحقیقات وارد مرحله جدیدی شد. چندلایه کردن اهداف فلزی، میزان جذب انرژی اهداف را بالا می‌برد. رادمهر و همکاران [۵] با استفاده از تئوری انتشار امواج پلاستیک و بر مبنای معادلات مومنتم، برخورد مایل پرتابه سرتخت را در اهداف چندلایه فلزی به‌صورت تحلیلی بررسی کردند. این فرایند در ۹ مرحله بررسی شده است.

در زمینه اهداف لانه‌زنبوری، مک‌فارلند با ارائه یک مدل نیمه‌تجربی، خرد شدن لانه‌زنبوری‌هایی با سلول شش‌ضلعی را بررسی نمود [۶]. ویرزبکی با توسعه مدل مک‌فارلند، مدلی را ارائه نمود که تغییر شکل‌های خمشی و انبساطی لانه‌زنبوری‌ها را نیز در بر می‌گیرد [۷]. مدل ویرزبکی یکی از بهترین مدل‌ها برای بررسی رفتار سازه‌های لانه‌زنبوری است به‌طوری که بسیاری از دانشمندان از این مدل برای بررسی رفتار لانه‌زنبوری‌ها استفاده می‌کنند [۸، ۱]. او از بقای انرژی و معادلات حاکم بر رفتار پلاستیک مواد استفاده نموده است.

گلداسمیت و لویی [۹] ویژگی‌های تغییر شکل و جذب انرژی لانه‌زنبوری‌های آلومینیومی را در حالت بارگذاری استاتیکی و در اثر برخورد پرتابه‌های استوانه‌ای و کروی به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار

دادند. آن‌ها برای ۱۰ ترکیب مختلف پرتابه-هدف سرعت حد بالستیک را به‌دست آوردند. این آزمایش‌ها نشان داد که با وجود شرایط اولیه یکسان، به دلیل تغییر محل تماس اولیه پرتابه با هدف، مقادیر سرعت حد بالستیک متفاوتی به دست می‌آید.

محققان داخل کشور نیز کارهای ارزشمندی در زمینه برخورد پرتابه به لانه‌زنبوری‌ها انجام داده‌اند. لیاقت و همکاران [۸] پدیده خرد شدن شبه‌استاتیکی سازه‌های لانه‌زنبوری را به‌صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها حالت‌های تغییر شکل المان زاویه‌ای را تشریح کرده 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 لانه‌زنبوری‌ها را در برخورد بالستیک به‌صورت تحلیلی بررسی کردند.

صبوری و لیاقت [۱۱] فرمول‌بندی جدیدی برای محاسبه انرژی کرنشی و پاسخ استاتیکی و دینامیکی لایه‌های فلز-کامپوزیت ارائه نمودند.

بررسی سازه‌های ساندویچی برای جذب انرژی بیشتر و کاربرد در شرایط مختلف رشد چشمگیری داشته است. سازه‌های ساندویچی به‌طور معمول دارای یک هسته هستند که بین دو لایه محصور شده‌اند. از جمله سازه‌های ساندویچی می‌توان به سازه‌های کامپوزیت-فوم، کامپوزیت-لانه‌زنبوری، آلومینیوم-فوم و آلومینیوم-لانه‌زنبوری اشاره نمود.

هوفت و سیرویلیو [۱۲] با استفاده از مدل انتشار امواج تنش، سرعت باقیمانده پرتابه با دماغه کروی را در برخورد به پانل ساندویچی کامپوزیت-فوم تعیین کردند. همچنین فرایند برخورد سرعت بالا به پانل ساندویچی را در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی نمودند.

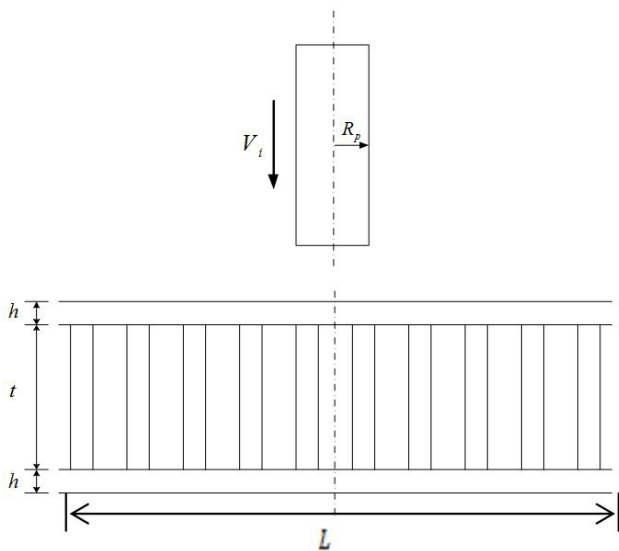
خدارحمی و همکاران نفوذ پرتابه صلب سرتخت در اهداف ساندویچی آلومینیوم-فوم را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند [۱۳]. مطابق آزمایش‌ها و شبیه‌سازی صورت‌گرفته توسط آن‌ها، با افزایش چگالی و ضخامت فوم و سرعت اولیه پرتابه، جذب انرژی سازه ساندویچی نیز افزایش می‌یابد.

فعلی و نامداری‌پور [۱۴] 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 به‌صورت الیاف بافته شده تار و پود در نظر گرفته شده است. همچنین فعلی و جعفری [۱۵] 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.

هزیزان و کنتول [۱۶] رفتار سازه‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری را تحت ضربه سرعت‌پایین به‌صورت تحلیلی بررسی کردند. آن‌ها از قانون

پرتابه هستند.

در برخورد های سرعت بالا، پرتابه در هدف نفوذ می کند، به طوریکه میزان نفوذ پرتابه به پارامترهای مختلفی از جمله سرعت اولیه پرتابه و جنس هدف بستگی دارد.



شکل ۱: برخورد پرتابه سر تخت به پانل ساندویچی.

در مدل تحلیلی، جذب انرژی لایه های آلومینیومی و هسته لانه زنبوری به صورت مجزا محاسبه می شود. ابتدا با استفاده از مدل جرم و فنر، جذب انرژی لایه های آلومینیومی در بارگذاری شبه استاتیکی محاسبه شده و سپس با به کار بردن ضریب افزایش دینامیکی، جذب انرژی این لایه ها در بارگذاری ضربه ای به دست می آید. همچنین از مدل ویرزیبکی به منظور محاسبه جذب انرژی لانه زنبوری استفاده شده است. در نهایت با استفاده از معادله موازنه انرژی سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه به دست می آید.

۲-۱- نفوذ پرتابه در لایه آلومینیومی

در برخورد پرتابه به پانل ساندویچی، قسمتی از انرژی جنبشی پرتابه توسط لایه های پانل جذب می شود. در این قسمت ابتدا جذب انرژی لایه آلومینیومی در اثر تغییر شکل (جذب انرژی ناشی از تغییر شکل موضعی و تغییر شکل کلی) در بارگذاری استاتیکی محاسبه و سپس با استفاده از ضریب افزایش دینامیکی، جذب انرژی این لایه در بارگذاری ضربه ای به دست می آید.

سیستم معادل بارگذاری شبه استاتیکی بر روی هدف ساندویچی آلومینیوم - لانه زنبوری در شکل ۲ نشان داده شده است، بطوریکه K_c سفتی تماسی، K_d سفتی بشقابی شدن، K_b سفتی خمشی و K_s سفتی برشی هستند.

تورفتگی میر به منظور محاسبه نیروی وارده به پانل استفاده کردند. مدل ارائه شده مکانیزم های خمش، برش و اثرات تماسی در نظر گرفته شده و مطابقت مناسبی بین نتایج این مدل و داده های تجربی وجود دارد. بررسی و تحلیل نفوذ بالستیک پرتابه ها در ورق های ساندویچی فلز - لانه زنبوری موضوع جدیدی است که کمتر به روش تحلیلی بررسی شده است و اکثر کارهای انجام شده در این خصوص به صورت تجربی می باشد. گلداسمیت و همکاران [۱۷] برخورد پرتابه های سر تخت، سرکروی و سرمخروطی به پانل های ساندویچی آلومینیوم - لانه زنبوری را به صورت تجربی بررسی کردند. هوفت و پارک [۱] برخورد بالستیک پرتابه های استوانه ای سر تخت و سرکروی به پانل آلومینیوم - لانه زنبوری را به صورت تحلیلی بررسی کردند. در این مدل نیز فرایند نفوذ پرتابه در سه مرحله در نظر گرفته شده است: نفوذ پرتابه در لایه بالایی، نفوذ پرتابه در لانه زنبوری و در نهایت نفوذ پرتابه در لایه زیرین. مدل ارائه شده مطابقت خوبی با داده های تجربی دارد اما مهمترین عیب آن پیچیدگی معادلات حاکم و وابسته بودن معادلات هر مرحله به مرحله قبل است.

در این مقاله مدل تحلیلی جدیدی برای بررسی فرآیند نفوذ و سوراخ شده صفحات ساندویچی آلومینیوم - لانه زنبوری تحت اثر برخورد پرتابه سر تخت ارائه شده است، بطوریکه هسته پانل از جنس لانه زنبوری و لایه های بالایی و پایینی از جنس آلومینیوم هستند. جذب انرژی لایه های آلومینیومی و لانه زنبوری به صورت مجزا محاسبه و در نهایت جذب انرژی پانل به دست می آید.

در محاسبه جذب انرژی لایه های آلومینیومی علاوه بر در نظر گرفتن اتلاف انرژی موضعی در محل برخورد پرتابه، مکانیزم های مختلف اتلاف انرژی از جمله بشقابی شدن، خمش و برش نیز در نظر گرفته شده اند. همچنین جذب انرژی لانه زنبوری نیز به کمک مدل ویرزیبکی محاسبه می شود. با تعیین انرژی های جذب شده توسط پانل ساندویچی، طی فرآیند نفوذ پرتابه و استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده پرتابه محاسبه می گردد. از ویژگی های مدل تحلیلی، در نظر گرفتن مکانیزم های مختلف جذب انرژی توسط پانل و روش حل مساله است، به نحوی که با سادگی معادلات نتایج مدل همخوانی مناسبی با نتایج تجربی مرجع [۱۷] و تحلیلی مرجع [۱] دارد.

۲-۲- مدل تحلیلی

در طی فرایند نفوذ پرتابه در هدف، با توجه به جنس هدف و پارامترهای هندسی پرتابه، قسمتی از انرژی جنبشی اولیه پرتابه توسط هدف جذب می شود. در واقع کاهش انرژی جنبشی پرتابه صرف تغییر شکل هدف شده و انرژی کرنشی هدف افزایش می یابد. شکل ۱ یک پانل ساندویچی با لایه های آلومینیومی و هسته لانه زنبوری که تحت برخورد پرتابه صلب سر تخت است را نشان می دهد. در این شکل L و h ، t ، R_p ، V_i به ترتیب نشان دهنده اندازه پانل، ضخامت لایه های رویی و زیری فلزی، ضخامت هسته لانه زنبوری، شعاع پرتابه و سرعت اولیه

$$Q = (C_{11}^2 - C_{13}^2 - 2C_{13}C_{44}) / 2C_{11}C_{44} \quad (1-1)$$

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

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

که در آن 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 انرژی تماسی (E_{ct}) نامیده می‌شود، برابر است با:

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

ب- تغییر شکل کلی

با توجه به کوچک بودن قطر پرتابه در مقایسه با اندازه هدف، بار اعمالی از سوی پرتابه به هدف، به صورت متمرکز در نظر گرفته شده است. با توجه به نسبت اندازه صفحه به ضخامت لایه آلومینیومی، پانل ممکن است توسط برش، خمش، بشقابی‌شدن و یا ترکیب خمش و بشقابی‌شدن کشیده شود. در ادامه، تئوری‌های خمش، بشقابی‌شدن و خمش - بشقابی‌شدن بررسی می‌شود. فرض می‌شود که در تئوری‌های خمش و خمش - بشقابی‌شدن، برش نیز رخ می‌دهد.

تئوری خمش

رابطه بین نیرو و جابجایی، بدون در نظر گرفتن فرورفتگی موضعی به صورت زیر است [۲۱]:

$$P = K_{bs} W \quad (3)$$

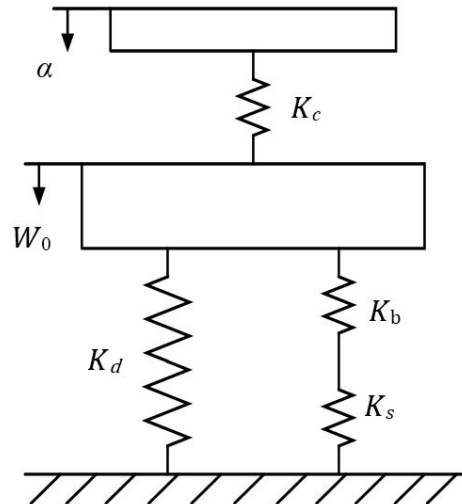
در رابطه بالا، W خیز عرضی صفحه میانی آلومینیوم و K_{bs} سفتی موثر ناشی از خمش و برش می‌باشد. با در نظر گرفتن شکل (۲)، سفتی موثر خمشی و برشی برابر است با:

$$K_{bs} = \frac{K_b K_s}{K_b + K_s} \quad (4)$$

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

$$K_b = \frac{86.2Eh^3}{12(1-\nu^2)L^2} \quad (5)$$

که L اندازه موثر پانل بوده و در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین سفتی موثر برشی به کمک رابطه (۶) به دست می‌آید [۲۳، ۲۱].



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

در این مقاله شرایط مرزی در لبه‌های پانل به صورت گیردار می‌باشد، بطوریکه 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 [۱۸]. با توجه به نسبت اندازه صفحه به ضخامت لایه آلومینیومی، پانل ممکن است توسط برش، خمش، بشقابی‌شدن و یا ترکیب خمش و بشقابی‌شدن کشیده شود. در ادامه، نیروی تماسی بین پرتابه و پانل با استفاده از تئوری‌های مختلف بررسی می‌شود.

۲-۱-۱- 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 مورد بررسی قرار گرفته است.

الف- تغییر شکل موضعی

رابطه نیروی تماسی شبه‌استاتیکی (P) و فرورفتگی موضعی پانل (α)، به صورت رابطه (۱) است [۱۹]:

$$P = K_c \alpha \quad (1)$$

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

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

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

در واقع وقتی خیز ورق به خیز بحرانی برسد، واماندگی لایه‌های رویی و زیری رخ می‌دهد. رابطه بین خیز عمودی بحرانی و استحکام برشی (τ) به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$P = K_{bs}W_{of} + K_dW_{of}^3 = 2\pi RhK\tau \quad (14)$$

به دلیل تغییر شکل اطراف ناحیه تورفتگی، میانگین استحکام برشی عرضی از مقدار واقعی آن بیشتر می‌شود. بنابراین به منظور اثر دادن این افزایش، از ضریب K استفاده می‌شود که برای فلزات برابر با ۲ در نظر گرفته شده است [۲۴].

بنابراین جذب انرژی لایه آلومینیومی در بارگذاری شبه‌استاتیکی (E_{sAL}) برابر با انرژی تغییر شکل است:

$$E_{sAL} = E_{def} \quad (15)$$

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

$$E_{dAL} = \phi_{AL} E_{sAL} \quad (16)$$

در رابطه فوق، ϕ_{AL} ضریب افزایش دینامیکی می‌باشد که در این ضریب تجربی اثرات سرعت اولیه پرتابه V_i لحاظ شده است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$\phi_{AL} = 1 + 0.0065V_i \quad (17)$$

۲-۲- نفوذ پرتابه در هسته لانه‌زنبوری

در اثر برخورد پرتابه به پانل ساندویچی، بخشی از انرژی جنبشی پرتابه توسط لانه‌زنبوری جذب می‌شود. جذب انرژی لانه‌زنبوری به کمک مدل ویرزیکی بررسی می‌شود. برای بررسی جذب انرژی لانه‌زنبوری 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 کماتش طی تشکیل چین خوردگی‌ها ثابت است.
 ۳. به منظور ایجاد برش، مچالگی و له‌شدگی قطر پرتابه از اندازه سلول لانه‌زنبوری تا حدودی بیشتر در نظر گرفته شده است.
- یک المان Y شکل از یک سلول با زاویه دلخواه مطابق شکل ۳ در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که یک سازه لانه‌زنبوری از اجتماع این المان‌ها تشکیل شده است (شکل ۴). ابعاد یک سلول لانه‌زنبوری شش ضلعی در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$K_s = \frac{4\pi}{3} Gh \left(\frac{E}{E - 4\nu G} \right) \left(\frac{4}{3} + \log \frac{L}{2R_p} \right)^{-1} \quad (6)$$

تئوری بشقابی شدن

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

$$P = K_d W^3 \quad (7)$$

که K_d نشان دهنده سفتی غشایی بوده و از رابطه (۸) به دست می‌آید [۲۰]:

$$K_d = \frac{191\pi Eh}{162L^2} \quad (8)$$

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 رابطه (۹) است:

$$P = K_{bs} W + K_d W^3 \quad (9)$$

در واقع این تئوری ترکیب تئوری خمش با تئوری بشقابی شدن می‌باشد.

بنابراین انرژی تغییر شکل کلی، در کلی‌ترین حالت (تئوری خمش - بشقابی شدن) به کمک رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_{gd} = \int_0^W P dW = \frac{1}{2} K_{bs} W^2 + \frac{1}{4} K_d W^4 \quad (10)$$

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

$$E_{def} = \frac{1}{2} (K_c \alpha^2 + K_{bs} W^2 + \frac{1}{2} K_d W^4) \quad (11)$$

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

$$E_{def} = \frac{(K_{bs} W_0 + K_d W_0^3)^2}{2K_c} + \frac{1}{2} K_{bs} W_0^2 + \frac{1}{4} K_d W_0^4 \quad (12)$$

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

$$E_{def} = \frac{(K_{bs} W_{of} + K_d W_{of}^3)^2}{2K_c} + \frac{1}{2} K_{bs} W_{of}^2 + \frac{1}{4} K_d W_{of}^4 \quad (13)$$

تروئیدی)، E_2 انرژی تلف‌شده در اثر حرکت مفصل خمیری افقی و E_3 انرژی تلف‌شده در اثر حرکت مفصل خمیری مایل است و مقادیر آن‌ها برابر است با:

$$E_1 = 16M_0 \frac{b}{h_c} H I_1(\psi_0) \quad (19)$$

$$E_2 = \pi D M_0 \quad (20)$$

$$E_3 = \frac{4M_0 H^2}{b} I_3(\psi_0) \quad (21)$$

به طوری که شعاع کوچک سطح تروئیدی، H نصف طول موج کماتش خمیری، h_c ضخامت دیواره‌های سلول لانه‌زنبوری، 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 لانه‌زنبوری رابطه دارد [5]:

$$M_0 = \frac{\sigma_0 h_c^2}{4} \quad (22)$$

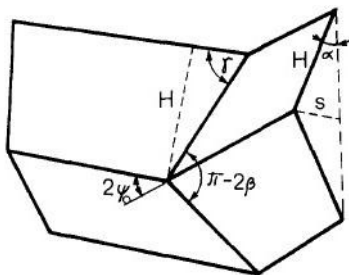
همچنین $I_1(\psi_0)$ و $I_3(\psi_0)$ از روابط زیر به دست می‌آیند [8, 7]:

$$I_1(\psi_0) = \frac{w}{\tan \psi_0} \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \alpha \left\{ \cos \psi_0 - \cos \left(\psi_0 - \frac{\beta}{w} \right) \right\} d\alpha \quad (23)$$

$$I_3(\psi_0) = \frac{1}{\tan \psi_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \alpha}{\sin \gamma} d\alpha \quad (24)$$

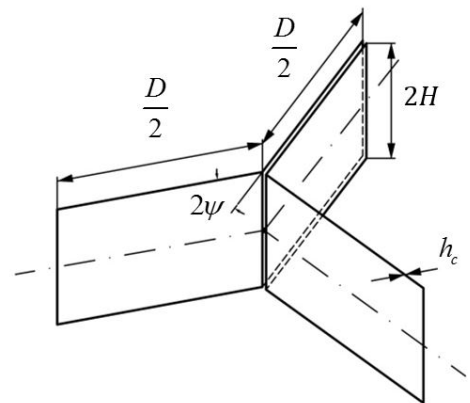
به طوری که α زاویه دوران المان زاویه‌ای، β و γ زوایایی در المان زاویه‌ای پس از تغییر شکل می‌باشند که در شکل ۶ مشخص شده‌اند. همچنین مقدار w برابر است با [7]:

$$w = \frac{\pi}{\pi - 2\psi_0} \quad (25)$$

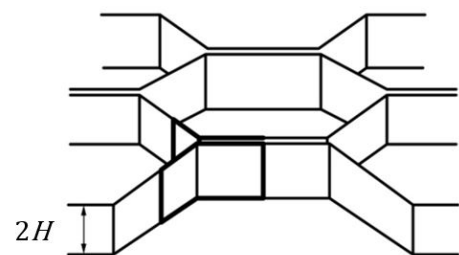


شکل ۶: هندسه المان زاویه‌ای پس از تغییر شکل [۷].

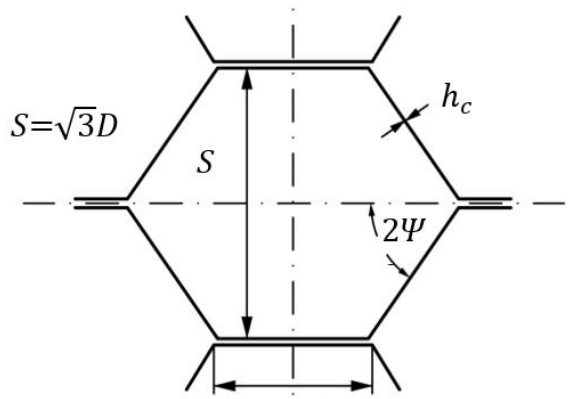
با توجه به اینکه سلول‌های لانه‌زنبوری به صورت شش ضلعی در نظر گرفته شده‌اند، $2\psi_0 = (\pi/6)$ مقدار $I_3(\pi/6)$ و $I_1(\pi/6)$ با توجه به روابط



شکل ۳: المان پایه مدل ویرزیبکی [۷]



شکل ۴: سلول شش ضلعی متشکل از المان‌های پایه ویرزیبکی [۸]



شکل ۵: ابعاد یک سلول لانه‌زنبوری شش ضلعی [۷]

هر المان پایه موردنظر از دو المان زاویه‌ای و هر سلول لانه‌زنبوری به طور متوسط از چهار المان پایه تشکیل می‌شود. ابتدا انرژی تلف‌شده در یک المان پایه محاسبه و سپس برای کل سلول لانه‌زنبوری توسعه می‌یابد.

طی چین خوردگی سه نوع تغییر شکل اصلی در هر سلول Y شکل از هانی کمب به وجود می‌آید که این سه تغییر شکل شامل ایجاد سطح تروئیدی، خطوط لولای افقی و لولای مایل است.

جذب انرژی یک المان پایه لانه‌زنبوری (E_{sh}) که در شکل ۳ نشان داده شده است، برابر است با [۷]:

$$E_{sh} = 2[E_1 + 2E_2 + E_3] \quad (18)$$

به طوری که E_1 انرژی تلف‌شده در اثر انبساط خمیری (ایجاد سطح

(۲۳) و (۲۴) به دست می‌آید:

با استفاده از موازنه انرژی، سرعت حد بالستیک پرتابه در برخورد با

پانل ساندویچی (V_b) به دست می‌آید:

$$V_b = \sqrt{\frac{2E_T}{M_p}} \quad (37)$$

بطوریکه M_p نشان‌دهنده جرم پرتابه است. 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، انرژی جنبشی اولیه پرتابه برابر است با مجموع انرژی که صرف سوراخ شدن پانل می‌شود و انرژی جنبشی پرتابه هنگام خروج از پانل. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} M_p V_i^2 = E_T + \frac{1}{2} M_p V_r^2 \quad (38)$$

با نظر گرفتن موازنه انرژی، سرعت باقیمانده پرتابه (V_r)، از رابطه

زیر به دست می‌آید:

$$V_r = (V_i^2 - V_b^2)^{0.5} \quad (39)$$

در واقع، در مدل تحلیلی، جذب انرژی پانل که برابر جذب انرژی لایه‌های آلومینیومی و هسته لانه‌زنبوری است محاسبه شده 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، پیش‌بینی سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده در برخورد پرتابه سرتخت به پانل‌های ساندویچی آلومینیوم-لانه‌زنبوری 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 شود، هدف دچار واماندگی می‌شود. برای بررسی درستی نتایج مدل تحلیلی ارائه شده، نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های تجربی مرجع [۱۷] و مدل تحلیلی هوفت و پارک [۱] مقایسه شده است. گلداسمیت و همکاران [۱۷] سه آزمون مختلف به روش تجربی برای تعیین حد بالستیک پانل‌های مختلف انجام داده و نتایج آن را ارائه نموده‌اند. این نتایج برای پانل با لایه‌های آلومینیومی به ضخامت ۰/۷۹ mm، هسته لانه‌زنبوری به ضخامت ۱۹/۰۵ mm و اندازه سلول ۶/۳۵ mm ارائه شده است. همچنین ضخامت دیواره سلول لانه‌زنبوری در آزمون تجربی ۱ برابر ۰/۲۵۴ mm و در آزمون‌های تجربی ۲ و ۳ برابر ۰/۵۸ mm می‌باشد. لازم به ذکر است که جرم و شعاع پرتابه در آزمون‌های ۱ و ۲ به ترتیب معادل ۳۷ g و ۶/۳۵ mm و در آزمون ۳ به ترتیب برابر ۴/۶۶ g و ۳/۱۷ mm هستند. مشخصات این سه آزمون

$$I_1(\pi/6) = 1.05 \quad (26)$$

$$I_3(\pi/6) = 2.39 \quad (27)$$

با توجه به شکل ۴ انرژی جذب شده توسط سلول لانه‌زنبوری (E'_{sh})، ۴ برابر انرژی جذب شده توسط المان پایه است. یعنی:

$$E'_{sh} = 4E_{sh} \quad (28)$$

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

$$E_{ext} = P_m \cdot 2H \quad (29)$$

به طوری که P_m متوسط نیروی خرد شدن است. با برابر قرار دادن روابط (۲۸) و (۲۹)، رابطه زیر را می‌توان نوشت:

$$\frac{P_m}{M_0} = \left(B_1 \frac{b}{h_c} + B_2 \frac{D}{H} + B_3 \frac{H}{b} \right) \quad (30)$$

به طوری که $B_1 = 64I_1$ ، $B_2 = 8\pi$ ، $B_3 = 16I_3$ در نهایت با کمینه‌سازی رابطه (۳۰) یعنی با در نظر گرفتن $\frac{\partial P_m}{\partial H} = 0$ ، روابط زیر به دست می‌آید:

$$H = 0.821 \sqrt[3]{h_c D^2} \quad (31)$$

$$P_m = 8.61 \sigma_0 \sqrt[3]{h_c^5 D} \quad (32)$$

در روابط فوق σ_0 ، h_c و s به ترتیب نشان‌دهنده ضخامت دیواره سلول، تنش سیال و فاصله دو ضلع روبه‌رو در سلول شش‌ضلعی (اندازه سلول) هستند. با در نظر گرفتن $S = \sqrt{3}D$ روابط (۳۱) و (۳۲) به روابط زیر تبدیل می‌شوند:

$$H = 0.569 \sqrt[3]{h_c S^2} \quad (33)$$

$$P_m = 7.17 \sigma_0 \sqrt[3]{h_c^5 S} \quad (34)$$

مطابق مشاهدات تجربی [۲۲]، انرژی جذب شده توسط لانه‌زنبوری در بارگذاری دینامیکی (E_{FD})، ۱/۳ برابر بارگذاری استاتیکی است، یعنی:

$$E_{Dh} = 1.3E'_{sh} \quad (35)$$

۳-۲- انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی آلومینیوم-لانه‌زنبوری در قسمت‌های قبلی انرژی جذب شده توسط لایه آلومینیومی و لانه‌زنبوری محاسبه شد. بنابراین انرژی جذب شده توسط پانل از مجموع روابط (۱۶) و (۳۵) به دست می‌آید:

$$E_T = 2E_{dal} + E_{Dh} \quad (36)$$

خطا که در مورد ۳ رخ داده است، در مقایسه با داده‌های تجربی برابر ۱۰/۱٪ و در مقایسه با داده‌های مدل تحلیلی هوفت و پارک ۱۵/۰۲٪ بوده و این مقادیر نشان از دقت قابل قبول مدل ارائه شده است.

برای بررسی و صحت‌گذاری مدل تحلیلی در پیش‌بینی سرعت باقیمانده، منابع و داده‌های محدودی وجود دارد به طوری که با بررسی تحقیقات نویسندگان فقط تنها یک مورد برای مقایسه وجود دارد. در برخورد پرتابه سرتخت با سرعت اولیه ۱۴۵ m/s و شعاع ۶/۳۵ mm و جرم ۳۷ g به پانل آلومینیوم-لانه‌زنبوری با مشخصات ضخامت لایه آلومینیومی ۰/۷۹ mm، ضخامت هسته ۱۵/۹ mm، اندازه سلول ۶/۳۵ mm و ضخامت دیواره سلول لانه‌زنبوری ۰/۰۶۳۵ mm مقدار سرعت باقیمانده ۱۳۶ m/s است [۱۷]. مدل تحلیلی ارائه شده سرعت باقیمانده را تحت همین شرایط ۱۳۱/۲۲ m/s پیش‌بینی می‌کند که درصد خطای آن ۳/۵٪ است. بنابراین اختلاف مدل تحلیلی و مقدار داده‌های تجربی در محاسبه سرعت باقیمانده ناچیز می‌باشد.

جدول ۴: مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های تجربی مرجع [۱۷].

سرعت حد بالستیک (m/s)			
شماره آزمون	تجربی [۱۷]	مدل ارائه شده	مقدار خطا
۱	۵۰	۵۰/۹۳	۱/۸۶٪
۲	۵۳	۵۱/۳۱	۳/۱۸٪
۳	۸۵	۹۳/۶۶	۱۰/۱٪

جدول ۵: مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های مدل تحلیلی هوفت و پارک [۱].

سرعت حد بالستیک (m/s)			
شماره آزمون	هوفت و پارک [۱]	مدل ارائه شده	مقدار خطا
۱	۴۹/۳۲	۵۰/۹۳	۳/۲۶٪
۲	۵۱/۸۷	۵۱/۳۱	۱/۰۸٪
۳	۸۱/۳	۹۳/۶۶	۱۵/۰۲٪

همچنین به منظور بررسی اثرات سرعت اولیه بر روی جذب انرژی پانل، منحنی تغییرات سرعت باقیمانده بر حسب سرعت اولیه در شکل ۷ ارائه شده است. مطابق این شکل، با افزایش سرعت اولیه پرتابه، سرعت باقیمانده آن نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش سرعت اولیه، ضریب افزایش دینامیکی، زیاد می‌شود و این باعث افزایش میزان جذب انرژی پانل می‌شود. از اینرو می‌توان گفت که در نرخ کرنش‌های بالاتر، مقاومت پانل ساندویچی نیز افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده در پیش‌بینی جذب انرژی پانل در برخورد بالستیک با نتایج مدل تحلیلی هوفت و پارک [۱] در جدول ۶ ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این نتایج برای آزمون‌های ۱ تا ۳

به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین خواص مکانیکی پرتابه فولادی، لایه‌های آلومینیومی و هسته لانه‌زنبوری در جداول ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. آلیاژهای استفاده شده در لایه‌های رویی و زیری و هسته، به ترتیب از نوع AL-2024-O و AL-5052-H19 هستند.

به طور معمول نتایج حاصل از مدل تحلیلی و داده‌های تجربی در حد بالستیک دارای بیشترین خطا خواهد بود. به منظور صحت‌گذاری بر مدل تحلیلی، نتایج این مدل در محاسبه سرعت حد بالستیک برای پرتابه سرتخت در جداول ۴ و ۵ ارائه شده و به ترتیب با داده‌های تجربی مرجع [۱۷] و مدل تحلیلی مرجع [۱] مقایسه و مقدار درصد خطا بیان شده است. همان‌طور که در جداول ۴ و ۵ مشخص است، مدل ارائه شده با دقت خوبی سرعت حد بالستیک را پیش‌بینی می‌کند. به طوری که بیشترین

جدول ۱: مشخصات هندسی آزمون‌های تجربی انجام شده توسط گلداسمیت و همکاران [۱۷]

شماره آزمون	مشخصات هندسی		
	۱	۲	۳
	۳۷	۳۷	۴/۶۶
پرتابه	M_p (g)	۶/۳۵	۶/۳۵
	R_p (mm)	۳۸/۱	۳۸/۱
	L_p (mm)	۰/۷۹	۰/۷۹
لایه‌ها	h (mm)	۱۹/۰۵	۱۹/۰۵
	H (mm)	۰/۰۵۸	۰/۰۵۸
هسته	h_c (mm)	۰/۰۲۵۴	۰/۰۲۵۴
	D (mm)	۶/۳۵	۶/۳۵

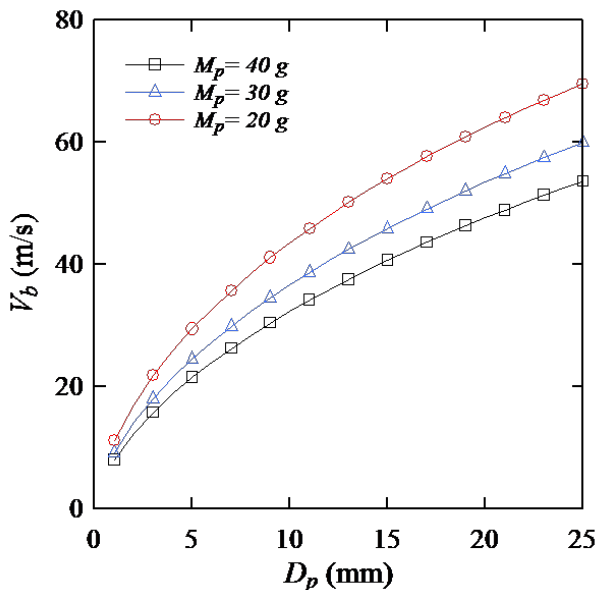
جدول ۲: خواص مکانیکی لایه رویی و زیری آلومینیومی [۱، ۱۷]

پارامتر	مقدار
ρ (kg/m ³)	۲۸۰۰
E (GPa)	۷۳
ν	۰/۳۳
σ_y (MPa)	۱۶۵/۵
τ (MPa)	۱۲۴

جدول ۳: خواص مکانیکی هسته لانه‌زنبوری [۱، ۱۷]

پارامتر	مقدار
ρ (kg/m ³)	۲۶۷۸
E (GPa)	۷۰
ν	۰/۳۳
σ_0 (MPa)	۲۷۲/۵

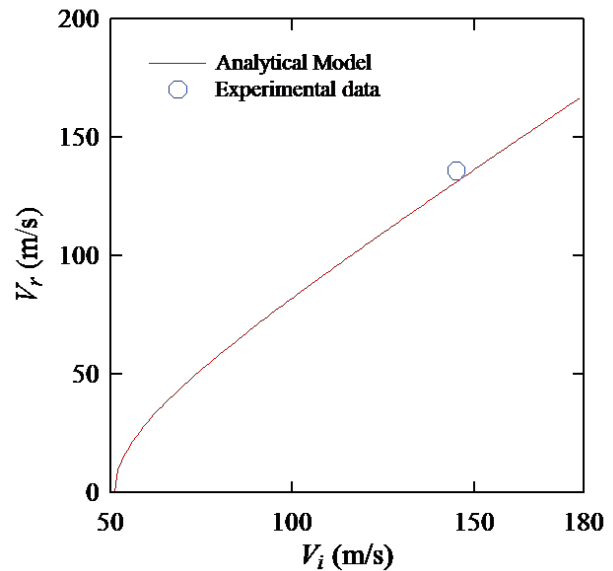
شکل ۸ منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب تغییرات قطر پرتابه سر تخت را و برای جرم‌های مختلف پرتابه را نشان می‌دهد. در این شکل $h=0.79$ mm و $h_c=0.635$ mm، $S=6/35$ mm، $t=19/05$ mm هستند. مطابق شکل ۸ با افزایش قطر پرتابه و با ثابت در نظر گرفتن جرم آن، حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. دلیل افزایش حد بالستیک این است که با افزایش قطر پرتابه، سطحی از رویه‌های آلومینیومی که دچار شکست می‌شوند نیز افزایش می‌یابد، به همین دلیل 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 می‌یابد، بنابراین انرژی جذب شده توسط هسته لانه‌زنبوری 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.



شکل ۸: منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک پرتابه سر تخت بر حسب قطر پرتابه

اثرات اندازه سلول هسته لانه‌زنبوری پانل ساندویچی در شکل ۹ نشان داده شده است. در این شکل، $M_p=30$ g، $h_c=0.58$ mm و $t=19/05$ mm در نظر گرفته شده است. همچنین قطر پرتابه ۱/۵ 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 با افزایش اندازه سلول هسته لانه‌زنبوری پانل سرعت حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش اندازه سلول لانه‌زنبوری میزان جذب انرژی پانل نیز افزایش می‌یابد. با توجه به مطابقت مناسب نتایج مدل تحلیلی با داده‌های تجربی،

که در جدول ۱ مشخص شده، ارائه شده است. همانطور که مقایسه نتایج نشان می‌دهد، مطابقت مناسبی بین مدل تحلیلی جدید و مدل هوفت و پارک وجود دارد.



شکل ۷: منحنی تغییرات سرعت باقیمانده پرتابه سر تخت بر حسب سرعت اولیه و مقایسه آن با داده‌های تجربی [۱۷]

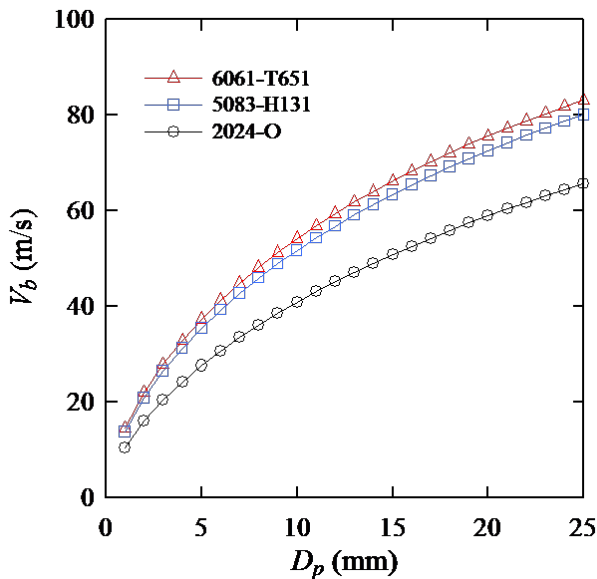
جدول ۶: مقایسه نتایج حاصل از مدل تحلیلی با داده‌های مدل تحلیلی هوفت و پارک [۱]

انرژی جذب شده توسط پانل (J)			
شماره آزمون	هوفت و پارک [۱]	مدل ارائه شده	مقدار خطا
۱	۴۵/۰۱	۴۸	۶/۳٪
۲	۴۹/۷۷	۴۸/۷۲	۲/۱۵٪
۳	۱۷/۴	۲۰/۴۳	۱۴/۸٪

انرژی جذب شده توسط پانل ساندویچی، فوم و لایه‌های آلومینیومی در برخورد بالستیک پرتابه سر تخت به سازه ساندویچی در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که نتایج این جدول نشان می‌دهد لایه‌های آلومینیومی سهم بیشتری را نسبت به هسته لانه‌زنبوری، در جذب انرژی پانل ساندویچی دارند.

جدول ۷: میزان جذب انرژی لایه‌ها، هسته و پانل ساندویچی در برخورد بالستیک.

جذب انرژی (J)			
شماره آزمون	لایه‌های آلومینیومی	هسته لانه‌زنبوری	پانل ساندویچی
۱	۴۸/۵	۰/۰۰۲۲	۴۸/۵۰۲۲
۲	۴۸/۵	۰/۰۱۱۴	۴۸/۵۱۱۴
۳	۲۰/۶۷	۰/۰۱۱۴	۲۰/۶۸۳۷



شکل ۱۰: منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب قطر پرتابه برای پانل آلومینیوم-لانه‌زنبوری با لایه‌های متفاوت

(تغییر شکل موضعی، خمش، برش و بشقابی شدن) در نظر گرفته شده است.

- مقادیر سرعت حد بالستیک و سرعت باقیمانده محاسبه شده به روش تحلیلی هم‌خوانی مناسبی با نتایج تجربی و مدل تحلیلی هوفت و پارک [۱] دارد. از ویژگی‌های مدل تحلیلی ارائه شده، سادگی معادلات حاکم و نحوه حل آن‌ها می‌باشد.

- بررسی قطر پرتابه سرتخت 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.

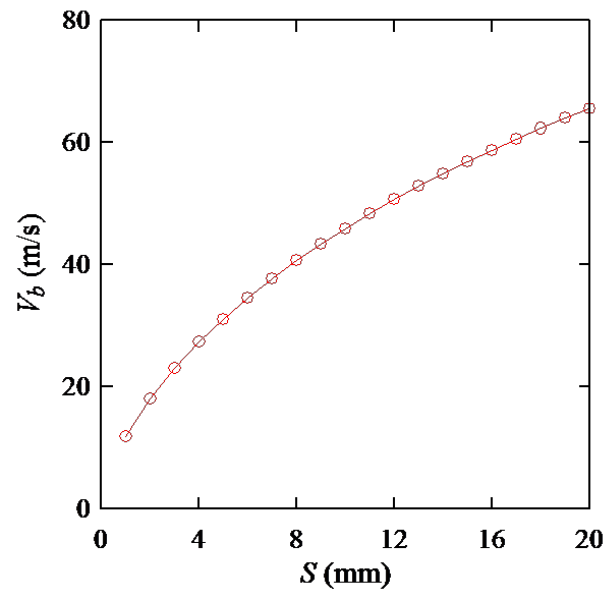
- در برخورد پرتابه سرتخت، بیشترین جذب انرژی توسط لایه‌های آلومینیومی صورت می‌گیرد و لانه‌زنبوری تأثیر کمی در جذب انرژی دارد.

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

- با افزایش اندازه سلول هسته لانه‌زنبوری پانل سرعت حد بالستیک نیز افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش اندازه سلول لانه‌زنبوری میزان جذب انرژی پانل نیز افزایش می‌یابد. به طوری که با ۲۰ برابر شدن اندازه سلول لانه‌زنبوری، سرعت حد بالستیک ۵/۵ برابر می‌شود.

۵- فهرست علائم

- C_{ij} : ثوابت الاستیک
- D : طول المان زاویه‌ای بر حسب متر
- E : مدول یانگ بر حسب پاسکال
- E_I : انرژی جذب شده در اثر انبساط خمیری بر حسب ژول



شکل ۹: منحنی تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب اندازه سلول لانه‌زنبوری برای پانل آلومینیوم-لانه‌زنبوری

اثرات آلیاژ مختلف آلومینیوم بر روی سرعت حد بالستیک بررسی می‌شود. در این بخش آلیاژهای 5083-H131، 6061-T651 و 2024-O بررسی می‌شوند. خواص این دو آلیاژ اول در جدول ۸ و خواص 2024-O در جدول ۲ آورده شده است. مقادیر جدول ۸ از مراجع [۲۷] و [۲۸] جمع‌آوری شده‌اند.

جدول ۸: خواص مکانیکی لایه‌های زیری و رویی آلومینیومی [۲۷، ۲۸]

نوع ماده	σ_y (MPa)	τ (MPa)	E (GPa)	ρ (kg/m ³)
6061-T651	۳۸۰	۲۰۷	۶۸	۲۷۱۰
5083-H131	۲۷۶	۱۹۰	۷۰/۳	۲۶۶۰

تغییرات سرعت حد بالستیک بر حسب قطر پرتابه و برای آلیاژهای مختلف لایه‌های آلومینیومی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل $h_c = 0.0254$ mm، $M_p = 37$ g، $t = 19.05$ mm، $h = 1$ mm و $S = 6.35$ mm هستند. مطابق این شکل حد بالستیک آلیاژ 6061-T651 از آلیاژهای 5083-H131 و 2024-O بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده جذب انرژی بالستیک بیشتر این آلیاژ نسبت به دو آلیاژ دیگر است.

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-لانه‌زنبوری ارائه شده است. در مدل تحلیلی، مکانیزم‌های مختلف جذب انرژی برای لایه‌های رویی و زیری

w : تعریف شده در رابطه (۲۶)

W_{of} : خیز میانی بحرانی لایه آلومینیومی بر حسب متر

α : فرو رفتگی موضعی بر حسب متر

β : زاویه‌ای در المان زاویه‌ای

γ : زاویه‌ای در المان زاویه‌ای

ν : ضریب پواسون

σ_0 : تنش سیلان ماده لانه‌زنبوری بر حسب پاسکال

ψ_0 : نصف زاویه بین صفحات المان زاویه‌ای

۶- مراجع

- [1] Hoo Fatt, M.S.; K.S. Park, 2000. "Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, No. 8, pp. 889-899.
- [2] Backman, M.E.; W. Goldsmith, 1978. "The mechanics of penetration of projectiles into targets", *International Journal of Engineering Science*, 16, No. 1, pp. 1-99.
- [3] Corbett, G.G.; S.R. Reid W. Johnson, 1996. "Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review", *International Journal of Impact Engineering*, 18, No. 2, pp. 141-230.
- [4] Forreстал, M.J.; K. Okajima V.K. Luk, 1988. "Penetration of 6061-T651 aluminum targets with rigid long rods", *Applied Mechanics*, 55, No. pp. 755-760.
- [۵] رادمهر، داود؛ لیاقت، غلامحسین؛ فعلی، سعید؛ "تحلیل فرایند نفوذ مایل پرتابه‌های تغییر شکل‌پذیر در اهداف فلزی چند لایه". نشریه مواد پراورزی، دوره ۱۱، شماره ۷، صفحات ۲۱-۳۱، ۱۳۹۰.
- [6] Mc Farland, R.K., 1963. "Hexagonal cell structures under post-buckling axial load", *AIAA Journal*, 1, No. 6, pp. 1380-1385.
- [7] Wierzbicki, T., 1983. "Crushing analysis of metal honeycombs", *International Journal of Impact Engineering*, 1, No. 2, pp. 157-174.
- [۸] لیاقت، غلامحسین؛ صدیقی، مجتبی؛ داغبانی، حمیدرضا؛ علوی‌نیا، علی؛ "خرد شدن سازه‌های لانه زنبوری فلز تحت بارهای شبه‌استاتیکی"، نشریه دانشکده فنی، دوره ۳۷، شماره ۱، صفحات ۱۴۵-۱۸۶، ۱۳۸۲.
- [9] Goldsmith, W.; D.L. Louie, 1995. "Axial perforation of aluminum honeycombs by projectiles", *International Journal of Solids and Structures*, 32, No. 8-9, pp. 1017-1046.
- [10] Liaghat, G.H.; A.A. Nia; H.R. Daghyani M. Sadighi, 2010. "Ballistic limit evaluation for impact of cylindrical projectiles on honeycomb panels", *Thin-Walled Structures*, 48, No. 1, pp. 55-61.

E_2 : انرژی جذب شده در اثر حرکت مفصل خمیری افقی بر حسب ژول

E_3 : انرژی جذب شده در اثر حرکت مفصل خمیری مایل بر حسب ژول

E_{ct} : انرژی جذب شده در اثر تغییر شکل موضعی بر حسب ژول

E_{dAL} : انرژی جذب شده توسط لایه آلومینیومی در بارگذاری ضربه‌ای بر حسب ژول

E_{Dh} : انرژی جذب شده توسط هسته لانه‌زنبوری در بارگذاری ضربه‌ای بر حسب ژول

E_{gd} : انرژی جذب شده در اثر تغییر شکل کلی بر حسب ژول

E_{sAL} : انرژی جذب شده توسط لایه آلومینیومی در بارگذاری شبه‌استاتیکی بر حسب ژول

E_{sh} : انرژی جذب شده توسط المان زاویه‌ای در بارگذاری شبه‌استاتیکی بر حسب ژول

E'_{sh} : انرژی جذب شده توسط سلول لانه‌زنبوری در بارگذاری شبه‌استاتیکی بر حسب ژول

E_T : انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی در بارگذاری ضربه‌ای بر حسب ژول

G : مدول برشی بر حسب پاسکال

h : ضخامت لایه‌های رویی و زیری بر حسب متر

H : نصف طول موج کماتش خمیری

H_0 : تعریف شده در رابطه (۱-۱)

h_c : ضخامت دیواره‌های سلول لانه‌زنبوری بر حسب متر

K : ثابت تجربی

K_b : سفتی خمشی بر حسب نیوتن بر متر

K_{bs} : سفتی خمشی برشی بر حسب نیوتن بر متر

K_c : سفتی تماسی بر حسب نیوتن بر متر

K_d : سفتی بشقابی شدن بر حسب نیوتن بر متر مکعب

K_s : سفتی برشی بر حسب نیوتن بر متر

L : اندازه سازه ساندویچی بر حسب متر

M_0 : لنگر کامل خمیری مقطع بر حسب نیوتن

M_p : جرم پرتابه بر حسب کیلوگرم

P : نیروی وارد شده از سوی پرتابه به سازه بر حسب نیوتن

P_m : متوسط نیروی خرد شدن بر حسب نیوتن

R_p : شعاع پرتابه بر حسب متر

S : اندازه سلول لانه‌زنبوری بر حسب متر

t : ضخامت هسته لانه‌زنبوری بر حسب متر

V_b : سرعت حد بالستیک بر حسب متر بر ثانیه

V_i : سرعت اولیه پرتابه بر حسب متر بر ثانیه

V_r : سرعت باقیمانده بر حسب متر بر ثانیه

W : خیز میانی لایه آلومینیومی بر حسب متر

- composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading”, *Key Engineering Materials*, 141, No. pp. 501-552.
- [20] Wu, Q.G.; H.M. Wen; Y. Qin S.H. Xin, 2012. “Perforation of FRP laminates under impact by flat-nosed projectiles”, *Composites Part B: Engineering*, 43, No. 2, pp. 221-227.
- [21] Shivakumar, K.N.; W. Elber W. IIG, 1985. “Prediction of impact force and duration due to low velocity impact on circular composite laminates”, *Application Mechanic*, 52, No. 3, pp. 674-680.
- [22] Timoshenko, S.; S. Woinowsky-Krieger S. Woinowsky, *Theory of plates and shells*. 2. 1959: McGraw-hill New York.
- [23] Łukasiewicz, S., 1976. “Introduction of concentrated loads in plates and shells”, *Progress in Aerospace Sciences*, 17, No. pp. 109-146.
- [24] Woodward, R.L.; M. De Morton, 1976. “Penetration of targets by flat-ended projectiles”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 18, No. 3, pp. 119-127.
- [25] Hou, W.; F. Zhu; G. Lu D.-N. Fang, 2010. “Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core”, *International Journal of Impact Engineering*, 37, No. 10, pp. 1045-1055.
- [۲۶] نامداری پور، محمدهادی؛ “تحلیل صفحات ساندویچی لانه زنبوری - کامپوزیت تحت بار ضربه‌ای عمودی”، کارشناسی ارشد، کرمانشاه، دانشگاه رازی، ۱۳۹۰.
- [27] Forreſtal, M.J.; V.K. Luk N.S. Brar, 1990. “Perforation of aluminum armor plates with conical-nose projectiles”, *Mechanics of Materials*, 10, No. 1-2, pp. 97-105.
- [28] Forreſtal, M.J.; K. Okajima V.K. Luk, 1988. “Penetration of 6061-T651 Aluminum Targets With Rigid Long Rods”, *Journal of applied mechanics*, 55, No. 4, pp. 755-760.
- [11] Sabouri, H.; G.H. Liaghat, 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*, 92, No. 2, pp. 600-601.
- [12] Hoo Fatt, M.S.; D. Sirivolu, 2010. “A wave propagation model for the high velocity impact response of a composite sandwich panel”, *International Journal of Impact Engineering*, 37, No. 2, pp. 117-130.
- [۱۳] ضیاء شمایی، مجتبی؛ خدارحمی، حسین؛ واحدی، خداداد؛ پل، محمدحسین؛ “بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه صلب سرتخت در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیوم”، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۵، صفحات ۱-۱۳، ۱۳۹۲.
- [14] Feli, S.; M.H. Namdari Pour, 2012. “An analytical model for composite sandwich panels with honeycomb core subjected to high-velocity impact”, *Composites Part B: Engineering*, 43, No. 5, pp. 2439-2447.
- [۱۵] فعلی، سعید؛ جعفری، سید سجاد؛ “بررسی تحلیلی سوراخ شدن ورق‌های ساندویچی آلومینیوم-فوم تحت اثر ضرب بالستیک”، نشریه مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۳، شماره ۶، صفحات ۵۲-۵۹، ۱۳۹۲.
- [16] Hazizan, M.A.; W.J. Cantwell, 2003. “The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure”, *Composites Part B: Engineering*, 34, No. 8, pp. 679-687.
- [17] Goldsmith, W.; G.-T. Wang; K. Li D. Crane, 1997. “Perforation of cellular sandwich plates”, *International Journal of Impact Engineering*, 19, No. 5-6, pp. 361-379.
- [18] Lin, C.; M.S.H. Fatt, 2006. “Perforation of composite plates and sandwich panels under quasi-static and projectile loading”, *Journal of composite materials*, 40, No. 20, pp. 1801-1840.
- [19] Wen, H.; T. Reddy; S. Reid P. Soden, 1997. “Indentation, penetration and perforation of