



بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه صلب سر تخت در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی

مجتبی ضیاء شمامی^۱، حسین خدارحمی^{۲*}، خداداد واحدی^۳، محمدحسین پل^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۴- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش

* تهران، صندوق پستی ۱۲۳۴۵۶۷۸۹، ihu.ac.ir، hkhdrhmi@ihu.ac.ir

چکیده- سازه‌های ساندویچی با رویه فلزی و هسته فوم آلومینیومی، به دلیل نسبت استحکام به وزن مناسب و جذب انرژی بالا، به عنوان سازه‌های سبک با قابلیت‌های بالستیکی اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف هوا فضا، دریایی، خودروسازی و غیره پیدا کرده‌اند. در این تحقیق، با تهیه فوم‌های آلومینیومی با چگالی و ضخامت‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم آلومینیومی، به کمک سیستم پرتابگر گازی، یک سری آزمایش‌های بالستیکی تعریف شده و اثر چگالی و ضخامت فوم و سرعت پرتابه در میزان جذب انرژی ساختار ساندویچی و حد بالستیک پرتابه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با به کارگیری مدل ماده تعریف شده دسپند-فلک-فوم برای فوم فلزی و تعیین ضرایب آن به کمک نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده روی فوم و نرم افزار متلب، شبیه‌سازی برخورد و نفوذ پرتابه در ساختار ساندویچی به کمک نرم افزار ال‌اس‌داینا انجام شده و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه و صحت‌سنجی شده است. آزمایش‌های تجربی و مطالعات پارامتریک انجام شده، نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی ساختار ساندویچی با افزایش چگالی و ضخامت فوم و افزایش سرعت برخورد بالا می‌رود.

کلیدواژگان: نفوذ، بالستیک، سازه ساندویچی، فوم آلومینیومی، جذب انرژی

Experimental and numerical investigation of a blunt rigid projectile penetration into a sandwich panel with Aluminum foam core

M. Zia Shamami¹, H. Khodarahmi^{2*}, Kh. Vahedi³, M. H. Pol⁴

1- MSc. Student, Mech. Eng., Imam Hossien Univ., Tehran, Iran.

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Imam Hossien Univ., Tehran, Iran.

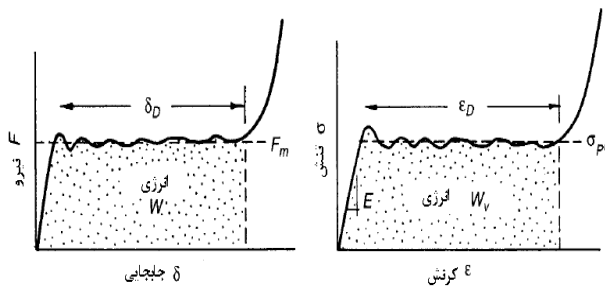
3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Imam Hossien Univ., Tehran, Iran.

4- Assist. Prof., Mech. Eng., Tafresh Univ., Tafresh, Iran.

* P.O.B. 123456789 Tehran, hkhdrhmi@ihu.ac.ir

Abstract- Sandwich panels (structures) of metal surface with aluminum foam core are of great importance in aerospace, naval and automotive industries due to high strength to weigh ratio and high energy absorption characteristics. In this article several aluminum sandwich panels with aluminum foam core having different densities and thickness were designed and tested using light gas gun device. A series of ballistic test were defined in order to determine the effects of density, foam thickness and projectile velocity on energy absorption and ballistic limit velocity of sandwich structures. The material model used for metal foam was Deshpande-Fleck-Foam and coefficients were determined experimentally using foam and Matlab capabilities. Also, numerical simulation using LS-DYNA software were performed. The results of the experiment and numerical simulation were compared and there was a good agreement between experimental investigation and numerical results. Using experimental testes and parametric studies, it is shown that the amount of energy absorption of sandwich structures is increased as density, foam thickness and velocity of the projectile is increased.

Keywords: Perforation, Ballistic Impact, Sandwich Structure, Aluminum Foam, Energy Absorption



شکل ۱ (الف) منحنی نیرو-جابجایی، (ب) منحنی تنش- کرنش

آزمایش‌های مشابهی نیز توسط روچ و همکارانش [۶،۵] بر روی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم پی‌وی‌سی انجام گرفته که نقش هسته و ارتباط بین انرژی جذب شده و مساحت لایه لایه شدگی را مورد مطالعه و بررسی قرار داده است. هوفت و همکارانش [۸،۷] حل تحلیلی برای صفحه ساندویچی با هسته لانه زنبوری در معرض بار ضربه‌ای عمودی در اثر برخورد پرتابه‌هایی با شکل‌های مختلف را بر پایه اتصال کلی و کشش در امتداد صفحه توسعه دادند. کیپر [۱۰،۹] به صورت تجربی و تحلیلی نفوذ در صفحات با هسته فوم پی‌وی‌سی را مورد بررسی قرار داد و سه مدل تغییرشکل را معین نموده و فرمول تحلیلی برای آن‌ها ارائه کرد. ون و رید [۱۱] مدل‌های تحلیلی ارائه شده نفوذ و جذب انرژی برای صفحات از این نوع را مورد مطالعه وسیع‌تری قرار دادند. اخیراً ویلانوا و کانتول [۱۲] ضربه با سرعت بالا بر روی سازه‌های ساندویچی با صفحات کامپوزیتی و چندلایه‌ای فلز-الیاف و همچنین هسته فوم آلومینیومی را مورد بررسی قرار دادند و سه معیار شکست برای صفحاتی با هسته فوم آلومینیومی ارائه کردند. هانسن و همکارانش [۱۳]، با توجه به نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی، برخورد پرنده به صفحات ساندویچی تشکیل شده از هسته فوم آلومینیومی با رویه آلومینیومی را مورد مطالعه قرار دادند. ژائو و همکارانش [۱۴] سوراخ شدگی در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی و پوسته آلیاژ آلومینیومی توسط میله فشاری هاپکینسون را بررسی کرده و نمودار نیرو-جابجایی آن را نیز ثبت کردند.

در این تحقیق، با تهیه فوم‌های آلومینیومی با چگالی و ضخامت‌های مختلف و ساخت پانل‌های ساندویچی از ورق‌های آلومینیومی و هسته فوم آلومینیومی، به کمک سیستم پرتابگر گازی، یک سری آزمایش‌های بالستیکی تعریف شده و با توجه

۱- مقدمه

ساختارهای ساندویچی با هسته سلولی (مانند فوم فلزی)، علاوه بر کاربردهای سازه‌ای، به عنوان جاذب‌های ضربه و انرژی نیز به کار می‌روند. بحث برخورد اجسام و نفوذ پرتابه در سازه‌های ساندویچی، به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی بسیار بالا، مورد توجه محققان واقع شده است. ساختار سلولی این سازه‌ها قابلیت تغییرشکل‌های پلاستیکی بزرگ در مقابل بارهای ضربه‌ای را داراست، که با توجه به چنین خصوصیتی، مقدار زیادی از انرژی جنبشی ناشی از برخورد، قبل از اینکه موجب تخریب سازه گردد، جذب می‌شود [۱].

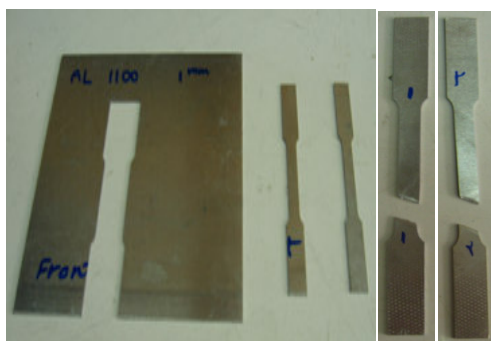
مواد و سازه‌هایی که به عنوان جاذب‌های انرژی به کار می‌روند عموماً دارای منحنی‌های تنش-کرنش کشیده و یکنواخت می‌باشند. این جاذب‌ها در تنشی که به تنش پایا^۱ معروف است، دچار تغییرشکل پلاستیک شده و انرژی زیادی را جذب می‌نمایند. یک قطعه یا سازه هنگامی به عنوان جاذب انرژی محسوب می‌شود که بتواند بیشترین تنش را تحمل کرده و در این تنش بتواند بیشترین مقدار کرنش و یا تغییرشکل را داشته باشد. به همین دلیل اکثر جاذب‌های انرژی اولاً دارای مقدار تنش پایای بالایی بوده و علاوه بر این منحنی تنش-کرنش آن‌ها نیز بسیار کشیده است (شکل ۱). سطح زیر منحنی بیانگر مقدار انرژی جذب شده در واحد حجم اولیه است. بنابراین موادی که منحنی‌های کشیده‌تری داشته باشند، مقدار انرژی بیشتری را نیز می‌توانند جذب نمایند [۲].

اکثر کارهای انجام گرفته بر روی سازه‌های ساندویچی با هسته فوم پی‌وی‌سی^۲ یا هسته لانه زنبوری بوده است. گلدسمیت و ساکن [۳] در آزمایش‌هایی اثر پارامترهای سرعت پرتابه، شرایط مرزی و مقاومت ناشی از اتصال بین هسته لانه زنبوری و صفحه آلومینیومی و جذب انرژی در طی فرآیند نفوذ را بررسی کردند. ماینز و همکارانش [۴] سازه‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیتی و زمینه پلیمری و هسته لانه زنبوری را تحت نفوذ با سرعت پایین مورد مطالعه و آزمایش قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت ضربه‌زننده گرایش به جذب انرژی بیشتر می‌شود که این عامل ناشی از افزایش یافتن تنش لهیدگی هسته و تنش تسلیم پوسته در نرخ کرنش‌های بالاتر است.

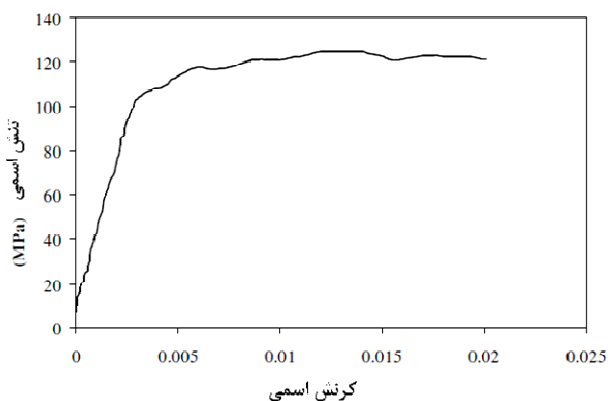
1. Plateau stress
2. Poly-Vinyl Chloride

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی پرتابه فولادی

مقادیر	خصوصیات
۷۸۰۰	$\rho(\text{kg/m}^3)$
۲۱۰	$E(\text{GPa})$
۰/۳	ν



شکل ۳ نمایی از نمونه‌های تهیه شده از ورق آلومینیومی برای انجام آزمایش کشش قبل و بعد از آزمایش



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش آزمایش کششی ورق آلومینیوم

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی ورق آلومینیومی

مقادیر	خصوصیات
۲۷۰۰	$\rho(\text{kg/m}^3)$
۷۰	$E(\text{GPa})$
۱۱۷	$\sigma_Y(\text{MPa})$
۱۲۴	$\sigma_U(\text{MPa})$

۲-۳- خصوصیات مکانیکی فوم آلومینیومی

نمونه فوم‌های به‌کارگرفته شده در این تحقیق با روش ریخته‌گری آلپوراس از جنس Al (A356/SiCp) در ابعاد $130 \times 130 \times 20$ و $130 \times 130 \times 30$ میلی‌متر با چگالی‌های متفاوت

به نتایج تجربی و عددی اثر چگالی و ضخامت فوم و سرعت پرتابه در میزان جذب انرژی ساختار ساندویچی و حد بالستیک پرتابه مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین، در این تحقیق، ارائه یک مدل شبیه‌سازی عددی منطبق بر شرایط واقعی مسئله با توجه به نتایج آزمایش‌های تجربی نیز دنبال شده است تا در انجام آزمایش‌های تجربی صرفه‌جویی گردد.

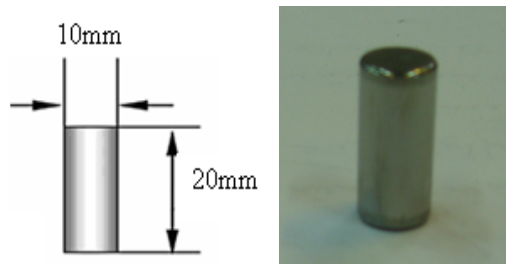
۲-۲- خصوصیات مکانیکی مواد

۲-۲-۱- خصوصیات مکانیکی پرتابه

پرتابه‌های مورد استفاده در تست‌های تجربی نفوذ در سازه ساندویچی، به‌دلیل محقق ساختن فرض صلب بودن، از جنس فولاد با سختی بالا انتخاب شده است. پرتابه سر تخت و دارای جرم $12/2$ گرم، قطر 10 و طول 20 میلی‌متر می‌باشد (شکل ۲) و مشخصات مکانیکی آن در جدول ۱ داده شده است.

۲-۲-۲- خصوصیات مکانیکی ورق آلومینیومی

ورق آلومینیومی که برای آزمایش‌های تجربی نفوذ انتخاب شده از سری 1100-H14 می‌باشد. آزمایش کشش بر روی ورق آلومینیوم برای تعیین منحنی تنش-کرنش طبق استاندارد E8 انجام شده است. روند انجام آزمایش بدین صورت بوده که در ابتدا یک ورق به ابعاد 130×130 با ضخامت یک میلی‌متر از نمونه اصلی ورق آلومینیومی تهیه شده و نمونه برای انجام آزمایش کشش از آن بریده شده است. آزمایش‌های کشش توسط دستگاه کشش آیزترون^۱ با سرعت فک بالایی $1/2 \text{ mm/min}$ انجام شده است. نمونه‌های آزمایش کشش و یک نمودار تنش-کرنش در شکل‌های ۳ و ۴ و همچنین مشخصات مکانیکی به‌دست آمده از آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۲ نمایی از پرتابه فولادی سر تخت

1. ISTRON 5500R

همان طور که از این منحنی ها پیداست، بعد از نقطه تسلیم در پیک اولیه، منحنی از شیب همواری برخوردار بوده که نشان دهنده خاصیت جذب انرژی فوم های آلومینیومی است.

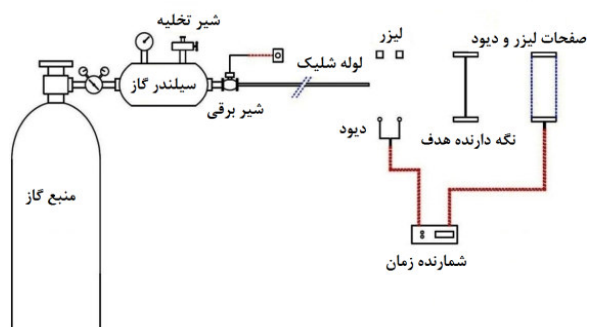
۳- آزمایش های تجربی

۳-۱- روش انجام آزمایش ها

در این بخش به روش انجام آزمایش های تجربی نفوذ پرتابه صلب سر تخت در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی پرداخته شده است و تاثیر عواملی همچون تغییر سرعت پرتابه و ضخامت و چگالی فوم آلومینیوم بر میزان انرژی جذب شده سازه ساندویچی و حد بالستیک پرتابه بررسی شده است. در آزمایش های تجربی، هدف به دست آوردن سرعت های پرتابه قبل از برخورد و پس از عبور از ساختار ساندویچی بوده است. پس از اندازه گیری این سرعت ها، انرژی جذب شده توسط هدف و حد بالستیک پرتابه محاسبه شده است.

در آزمایش های انجام شده، پس از شلیک پرتابه توسط دستگاه تفنگ گازی^۱ (شکل ۷)، سرعت پرتابه قبل از برخورد توسط سیستم لیزری اندازه گیری شده است. برای اندازه گیری سرعت پرتابه بعد از برخورد، با توجه به وجود ذرات پلاگ و ترکش، از محفظه مجهز به لیزرهای مکان یاب ذرات استفاده شده و پس از پردازش اطلاعات در کامپیوتر، اطلاعات مربوط به پرتابه مشخص و سرعت آن تعیین شده است.

نمونه ها در داخل قالب نگه دارنده دستگاه تفنگ گازی به وسیله پیچ هایی محکم شده اند، به طوری که شرایط مرزی کاملاً گیردار در لبه های سازه ساندویچی تامین گردد. سطح مواجهه سازه ساندویچی در مقابل نفوذ پرتابه در قسمت قالب نگه دارنده، مربعی به ضلع ۱۰۰ میلی متر بوده است.



شکل ۷ طرح شماتیک تفنگ گازی

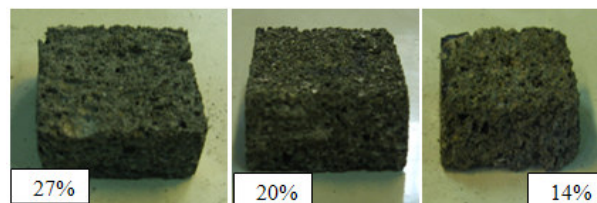
1. Gas gun

در محدوده ۳۰۰ تا ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب تهیه شده، که در جدول ۳ مشخصات نمونه ها ارائه شده است.

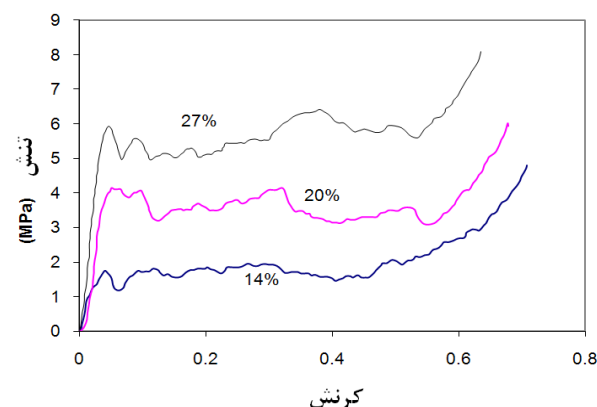
آزمایش فشار تک محوری نمونه فوم های آلومینیومی (شکل ۵) به کمک دستگاه MTS با سرعت فک بالایی ۱/۲ mm/min انجام شده است. از این آزمایش ها منحنی تنش- کرنش و منحنی نیرو- جابه جایی ثبت شده است. شکل ۶ منحنی تنش- کرنش برای سه نوع فوم آلومینیومی با چگالی های مختلف، تحت نیروی فشاری تک محوره را نشان می دهد.

جدول ۳ خصوصیات مکانیکی فوم های آلومینیومی با نسبت چگالی های متفاوت

مشخصات	نوع اول	نوع دوم	نوع سوم
نسبت چگالی	۱۴٪	۲۰٪	۲۷٪
E (GPa)	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰
σ_y (MPa)	۱	۳/۶	۵/۲
σ_p (MPa)	۱/۵	۳/۸	۵/۴
ϵ_D	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۲
ν	۰/۳	۰/۳	۰/۳



شکل ۵ نمونه های مختلف تهیه شده با نسبت چگالی های متفاوت برای انجام آزمایش فشار تک محوری



شکل ۶ نمودار تنش-کرنش فوم آلومینیومی با نسبت چگالی های متفاوت حاصل از اعمال بار فشاری تک محوره در آزمایش شبه استاتیکی

۳-۲- فرمول‌ها و روابط

در بررسی نفوذ پرتابه در سازه ساندویچی، دو کمیت حد بالستیک (V_{BL}) و میزان انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی اهمیت بالایی دارند. سرعت حد بالستیک حداقل سرعتی است که پرتابه می‌تواند صفحه هدف را سوراخ کند و با سرعت صفر از آن خارج شود. بالاتر بودن سرعت حد بالستیک بیانگر مقاوم بودن سازه ساندویچی نسبت به پدیده نفوذ پرتابه می‌باشد. به‌علاوه میزان انرژی جذب شده توسط سازه ساندویچی، برای مقایسه عملکرد سازه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اگر جرم ذرات جدا شده از پرتابه در حین فرآیند نفوذ ناچیز فرض شود، انرژی جنبشی آن نیز قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین تغییرات انرژی جنبشی پرتابه (E_p) قبل و بعد از برخورد را می‌توان معادل انرژی جذب شده در حین سوراخ شدن سازه ساندویچی در نظر گرفت:

$$\frac{1}{2}m_p V_i^2 - \frac{1}{2}m_p V_r^2 = E_p \quad (1)$$

که V_i و V_r به ترتیب سرعت برخورد و سرعت باقی‌مانده پرتابه است. چنانچه سرعت خروجی V_r برابر صفر باشد، با فرض اینکه میزان جذب انرژی تفاوت چندانی نداشته باشد، سرعت برخورد همان سرعت حد بالستیک خواهد شد:

$$\frac{1}{2}m_p V_{BL}^2 = E_p \quad (2)$$

از رابطه (۲) می‌توان سرعت حد بالستیک پرتابه را به‌دست آورد. البته این روابط در محدوده حد بالستیک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۴- شبیه‌سازی عددی

در این مقاله، برای شبیه‌سازی نفوذ پرتابه صلب سرتخت در فوم آلومینیومی از ال‌اس‌داینال^۱ که یک نرم‌افزار اجزاء محدود غیر خطی صریح با قابلیت‌های دو و سه‌بعدی است، استفاده شده است. در این نرم‌افزار نزدیک به ۱۹۰ مدل ماده و ۱۳ معادله حالت برای توصیف رفتار مواد مختلف ارائه شده است. همچنین، امکان استفاده از تکنیک فرسایش المان^۲، برای تحلیل مسائلی که شبکه مش‌بندی دچار تغییر فرم‌های شدید می‌شود، وجود دارد. انتخاب صحیح مدل ماده و معادله حالت، همچنین، اعمال

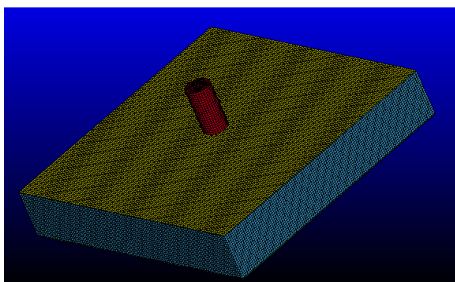
صحیح شرایط فیزیکی مسئله، از قبیل شرایط مرزی و استفاده از سطوح تماس و المان‌های متناسب با نوع مسئله، امکان انجام شبیه‌سازی صحیح، به‌کمک این نرم‌افزار را فراهم می‌کند. در این بخش، با توجه به پارامترهای موثر در پدیده نفوذ، اقدام به شبیه‌سازی عددی مسئله مورد نظر شده است. صحت‌سنجی نتایج عددی به‌کمک نتایج تست‌های تجربی انجام شده است. پس از صحت‌سنجی کار عددی، تاثیر پارامترهای دیگر به‌دست آمده است. در واقع، با بررسی مسئله در محیط نرم‌افزار، در منابع مالی صرفه‌جویی زیادی شده و نیاز به انجام تست‌های تجربی بیشتر برطرف شده است.

در گام اول به ایجاد مدل در محیط نرم‌افزار انسیس اقدام شده و پس از ذخیره آن با فرمت تحت ال‌اس‌داینال به وارد کردن مدل مربوطه به محیط ال‌اس‌داینال اقدام نموده و سپس به تعریف خصوصیات مواد، ویژگی‌ها، شرایط مرزی و معین کردن ابزارهای کنترلی در محیط نرم‌افزار ال‌اس‌داینال اقدام شده است. در شبیه‌سازی انجام شده، نفوذ پرتابه سرتخت فولادی در سازه ساندویچی مدل شده است. نمایی از مدل سه‌بعدی پرتابه و هدف همراه با مش در نظر گرفته شده در شکل ۸ دیده می‌شود.

۴-۱- مدل هندسی

با توجه به متقارن بودن شکل پرتابه و هدف، به منظور کاهش حجم محاسبات، از یک‌چهارم مدل با تعریف ویژگی تقارن محوری استفاده شده است. مش مورد نظر در این تحلیل نسبت به ابعاد قطعه و حجم محاسبات به‌طور مناسب انتخاب گردیده است (شکل ۹).

شرایط اولیه و مرزی در نظر گرفته شده در مسئله، با اعمال سرعت اولیه برای پرتابه و شرایط مرزی گیردار برای محیط سازه و شرایط تقارن در صفحات تقارن، محقق شده است.



شکل ۸ مدل شبیه‌سازی شده سازه ساندویچی

1. LS-DYNA
2. Erosion element

مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای پرتابه به‌خاطر صلب بودنش مدل صلب^۵، برای ورق آلومینیومی مدل پلاستیک-سینماتیک^۶ و برای فوم آلومینیومی مدل دَشپند-فلک-فوم^۷ انتخاب شده، که در ادامه به‌طور خلاصه تشریح می‌شود.

۴-۲-۱- مدل صلب

به‌علت اینکه جنس پرتابه از فولاد با سختی بالا بوده و تغییر فرم نمی‌دهد، برای ساده‌سازی تحلیل، برای پرتابه از مدل مادی صلب استفاده شده است. خصوصیات پرتابه صلب در جدول ۱ ارائه شده است.

۴-۲-۲- مدل پلاستیک-سینماتیک

به‌دلیل نوع رفتار ورق آلومینیومی و همچنین سادگی تعیین ضرایب عددی، از مدل مادی پلاستیک-سینماتیک برای ورق‌ها استفاده شده است. در جدول ۴، خصوصیات ورق آلومینیومی مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۴ خصوصیات ورق آلومینیومی همراه با ضرایب مدل

مقادیر	خصوصیات
۲۷۰۰	ρ_s (kg/m ³)
۷۰	E (GPa)
۱۱۷	σ_y (MPa)
۰/۲	ϵ_f
۰/۳	ν

۴-۲-۳- مدل دَشپند-فلک-فوم

مدل ماده دَشپند-فلک-فوم، که برای فوم آلومینیومی انتخاب شده است، مدل شماره ۱۵۴ نرم‌افزار ال‌اس‌داینما است که تابع تسلیم آن به‌صورت زیر ارائه گردیده است [۱۵]:

$$\phi = \hat{\sigma} - \sigma_y \quad (۳)$$

تنش معادل $\hat{\sigma}$ در رابطه بالا به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sigma_{VM}^2 - \alpha^2 \sigma_m^2}{1 + (\frac{\alpha}{3})^2} \quad (۴)$$

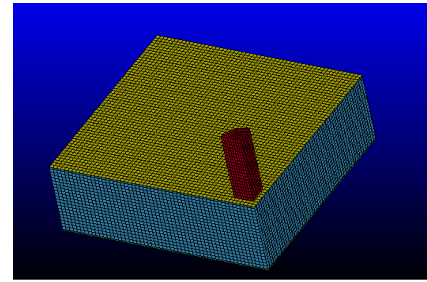
که σ_{VM} تنش ون مایرز است:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right) \sigma^{dev} : \sigma^{dev}} \quad (۵)$$

5. Rigid

6. Plastic-kinematic

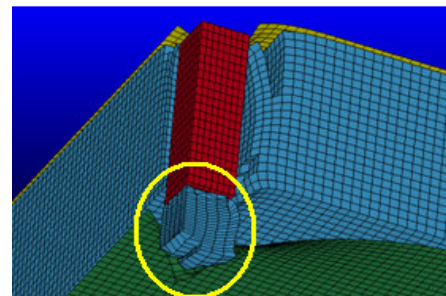
7. Deshpande-Fleck-Foam



شکل ۹ یک چهارم مدل شبیه‌سازی شده

یکی دیگر از نکات مهم در شبیه‌سازی انتخاب و اعمال سطوح تماس و برخورد مناسب است. در این شبیه‌سازی، از الگوریتم تماس فرسایشی سطح به سطح^۱ برای تعیین وضعیت تماس بین پرتابه و اجزاء سازه ساندویچی و از الگوریتم تماس اتوماتیک سطح به سطح^۲ برای تماس بین ورق آلومینیومی و فوم آلومینیومی استفاده شده است. ساختار پرتابه و هسته فومی، با توجه به ابعاد آن‌ها، از نوع حجمی^۳ و ورق آلومینیومی با توجه به ضخامت کمتر نسبت به دیگر اجزاء از نوع پوسته‌ای^۴ انتخاب گردیده است.

در شکل ۱۰ نحوه نفوذ پرتابه صلب در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی در محیط نرم‌افزار ال‌اس‌داینما نشان داده شده است، که نحوه فشرده شدن و شکست هسته فوم آلومینیومی در اثر نفوذ پرتابه و همچنین پلاگ جدا شده از آن قابل مشاهده است.

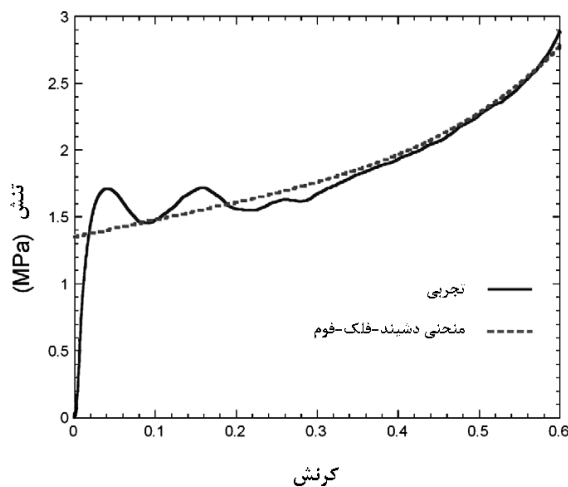


شکل ۱۰ تغییر فرم و شکل‌گیری پلاگ ناشی از نفوذ پرتابه

۴-۲-۴- انتخاب مدل ماده

برای به‌دست آوردن نتایج مطلوب در شبیه‌سازی، انتخاب مدل ماده و دقت داده‌های ورودی به نرم‌افزار برای تعریف خواص

1. Contact-eroding-surface-to-surface
2. Automatic-surface-to-surface
3. Solid
4. Shell



شکل ۱۱ منحنی تنش-کرنش تجربی آزمایش فشاری و مدل دشتیند-فلک-فوم

جدول ۵ خصوصیات فوم آلومینیومی با نسبت چگالی‌های متفاوت همراه با ضرایب مدل دشتیند-فلک-فوم

خصوصیات	نمونه اول ۱۴٪	نمونه دوم ۲۰٪	نمونه سوم ۲۷٪
E (MPa)	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰
ν^p	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
α	۲/۱	۲/۱	۲/۱
γ (MPa)	۲/۵	۴/۳	۷
ϵd	۱/۹۹	۱/۶۳	۱/۳۳
α_2 (MPa)	۳۳	۴۸	۶۵
β	۸/۶	۵/۵	۳
σpl (MPa)	۱/۵	۳/۸	۵/۴
ϵ_{cr}	۰/۱	۰/۱	۰/۱

۵- نتایج و بحث

در این بخش تاثیر عوامل مختلف از جمله تغییر چگالی فوم آلومینیومی، تغییر ضخامت فوم و تغییر سرعت در میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و حد بالستیک پرتابه به دست آمده از تست‌های تجربی و مدل شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است.

آزمایش‌های تجربی نفوذ در سازه ساندویچی، در سه نسبت چگالی و دو ضخامت متفاوت برای فوم آلومینیومی و در سرعت‌های متفاوت، انجام شده است.

انرژی جذب شده در سازه ساندویچی به دو گروه تقسیم می‌شود: در گروه اول که سازه‌های ساندویچی به طور کامل

در روابط زیر σ_m تنش هیدرواستاتیک و σ^{dev} تنش دیویاتوریک است:

$$\sigma_m = \frac{1}{3} tr(\sigma) \quad (۶)$$

$$\sigma^{dev} = \sigma - \sigma_m I \quad (۷)$$

پارامتر α که بیانگر شکل سطح تسلیم است و در محدوده زیر تعریف می‌گردد:

$$0 \leq \alpha^2 \leq \left(\frac{9}{2}\right) \quad (۸)$$

برحسب ضریب پواسون پلاستیک به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha^2 = \left(\frac{9}{2}\right) \frac{(1-2\nu^p)}{(1+\nu^p)} \quad (۹)$$

تنش تسلیم نیز طبق رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma_Y = \sigma_p + \gamma \frac{\epsilon}{\epsilon_D} + \alpha_2 \ln\left(\frac{1}{1 - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_D}\right)^\beta}\right) \quad (۱۰)$$

که σ_p تنش پایا و α_2, γ, β پارامترهای سختی می‌باشند. همچنین کرنش معادل به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\epsilon^2 = \left(1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2\right) \left[\epsilon_e^2 + \frac{1}{\alpha_2} \epsilon_m^2\right] \quad (۱۱)$$

که ϵ_e کرنش ون مایز و ϵ_m کرنش هیدرواستاتیک است. اما کرنش قراردادی که به عنوان کرنش فشاری تک‌محوره است به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\epsilon_d = -\frac{9+\alpha^2}{3\alpha^2} \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_s}\right) \quad (۱۲)$$

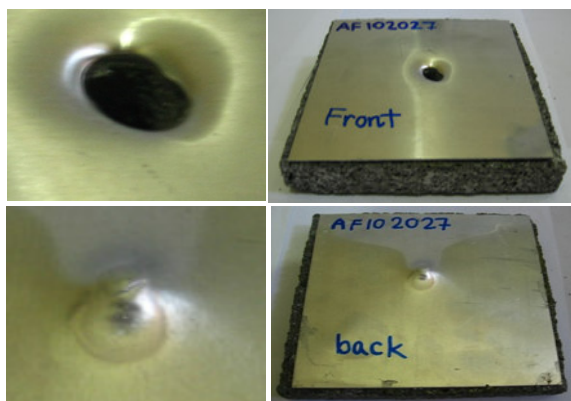
که ρ_0 چگالی فوم آلومینیوم و ρ_s چگالی آلومینیوم (ماده پایه) است.

در این مدل ماده شکست (از بین رفتن المان‌ها) زمانی اتفاق می‌افتد که کرنش هیدرواستاتیک از کرنش شکست حجمی بیشتر شود، که بدین صورت بیان می‌گردد:

$$\epsilon_m \geq \epsilon_m^{cr} \quad (۱۳)$$

درضمن، برای حذف المان‌های فوم در مسیر نفوذ پرتابه، از مدل فرسایشی^۱، که مدل کمکی برای حذف المان‌هاست، استفاده شده است. در جدول ۵ خصوصیات فوم آلومینیوم همراه با ضرایب مدل مربوطه داده شده است. این ضرایب از گذراندن معادله منحنی تنش تسلیم (رابطه ۱۰) ارائه شده برای مدل دشتیند-فلک-فوم از داده‌های به دست آمده از تست‌های تجربی، با کدنویسی در نرم‌افزار متلب، به دست آمده و نمونه‌ای از آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

1. Add Erosion



شکل ۱۳ نمای از قسمت‌های جلویی و پشتی نمونه سازه ساندویچی بعد از انجام آزمایش نفوذ ناقص پرتابه

به کمک انجام یک سری آزمایش‌های تجربی با تغییر سرعت ورودی پرتابه می‌توان، طبق رابطه (۲)، تقریبی از حد بالستیک را تعیین نمود که مبنایی برای مقدار سرعت ورودی پرتابه در انجام آزمایش تجربی بعدی قرار گیرد. البته روند انجام آزمایش‌های تجربی نفوذ پرتابه در سازه ساندویچی نسبتاً پرهزینه و زمان‌بر است.

با توجه به اینکه E_p در رابطه (۱) حقیقتاً با تغییر سرعت پرتابه تغییر می‌کند، ولی در محدوده حد بالستیک با خطای کمی همراه است. همچنین در صورتی که پرتابه از سازه ساندویچی عبور نکند میزان جذب انرژی از رابطه $\frac{1}{2}m_p V_i^2 = E_p$ به دست می‌آید.

در ضمن آزمایش‌های تجربی با تکرار ۲ الی ۵ بار برای هر مورد انجام گرفته است و نتایج تجربی با میانگین‌گیری از نتایج آزمایش‌های تکراری به دست آمده است.

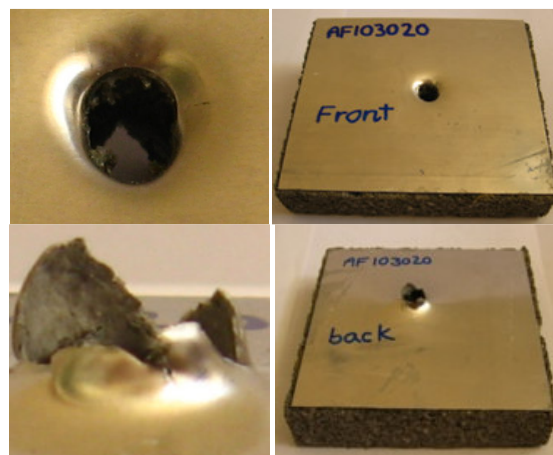
۵-۱- تاثیر سرعت پرتابه

در این قسمت تاثیر سرعت پرتابه بر میزان جذب انرژی سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی با نسبت چگالی ۲۰ درصد و ضخامت ۲۰ میلی‌متر مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار ال‌اس‌داینما در جدول ۶ مقایسه شده و در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین نتایج تجربی و عددی هم‌خوانی خوبی برقرار است. البته اختلاف کم ایجاد شده بین نتایج آزمایش‌های تجربی و عددی را می‌توان ناشی از ساده‌سازی‌های صورت گرفته در حل عددی از قبیل تعیین ضرایب برای مدل‌های ارائه شده و دیگر عوامل دانست.

سوراخ می‌شوند و در گروه دوم که نفوذ در بخشی از سازه ساندویچی انجام گرفته است.

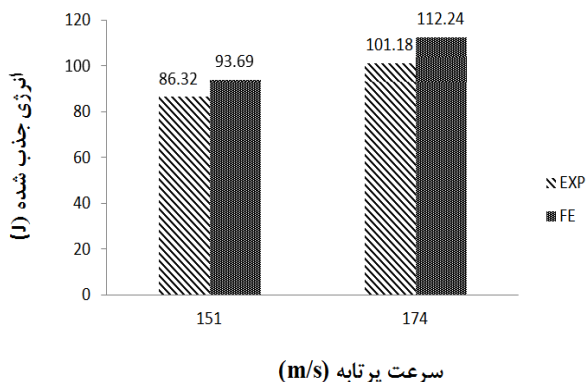
در شکل ۱۲، قسمت‌های مختلف سازه ساندویچی، که در معرض سوراخ شدگی کامل پرتابه قرار گرفته است، نشان داده شده است. در ورق آلومینیوم جلویی سازه ساندویچی یک حفره با تغییر شکل موضعی دیده می‌شود، به طوری که مسیر حرکت پرتابه در طول ضخامت سازه ساندویچی همانند یک تونل به نظر می‌رسد. همچنین، جداشدگی بین ورق پشتی و فوم دیده می‌شود و در اطراف ناحیه سوراخ شده ورق پشتی تغییر فرم گلبگی^۱ قابل مشاهده است.

شکل ۱۳ سازه ساندویچی را که قسمتی از آن به وسیله پرتابه صلب سوراخ شده است نشان می‌دهد. ورق جلویی به طور کامل سوراخ گردیده و پرتابه بعد از سوراخ کردن بخش زیادی از فوم آلومینیوم نتوانسته قسمت‌های دیگر آن و ورق پشتی را نیز سوراخ نماید. فوم آلومینیوم و ورق آلومینیوم پشتی قرار گرفته در جلوی پرتابه سر تخت از ادامه حرکت پرتابه جلوگیری کرده است و بدین ترتیب تمام انرژی جنبشی پرتابه جذب شده است و همچنین جدا شدگی بین ورق و فوم به علت نفوذ نکردن کامل پرتابه در این سازه ساندویچی نسبت به نمونه‌های سوراخ شده آن بیشتر است و ناحیه سوراخ شدگی نیز به صورت موضعی می‌باشد و روی صفحه پشتی نیز تا حدودی پدیده‌های برآمدگی^۲ و تغییر فرم بشقابی^۳ قابل مشاهده است.



شکل ۱۲ نمای از قسمت‌های جلویی و پشتی نمونه سازه ساندویچی بعد از انجام آزمایش نفوذ پرتابه

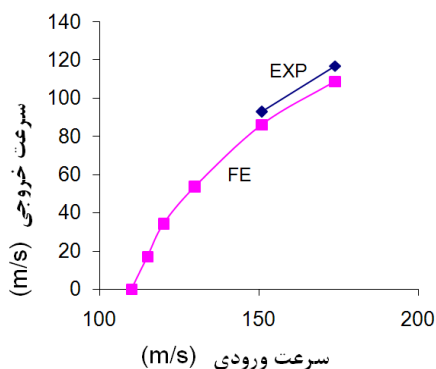
1. Petal
2. Bulging
3. Dishing



شکل ۱۴ انرژی جذب شده بر حسب سرعت ورودی پرتابه

جدول ۷ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با آزمایش های تجربی حاصل از تغییر سرعت پرتابه و محاسبه حد بالستیک

سرعت خروجی (m/s)		سرعت ورودی (m/s)
عددی	تجربی	
۱۰۸/۹۷	۱۱۷	۱۷۴
۸۶/۲۶	۹۳	۱۵۱
۵۲/۵۲	-	۱۳۰
۳۴/۱	-	۱۲۰
۱۷/۳	-	۱۱۵
رد نشد	-	۱۱۰



شکل ۱۵ نمودار ارتباط بین سرعت ورودی پرتابه با سرعت خروجی برای محاسبه حد بالستیک

در شکل ۱۶ مدل شبیه سازی شده در نرم افزار آورده شده است، که پرتابه با سرعت ۱۱۰ متر بر ثانیه توسط دستگاه تفنگ گازی به سوی هدف یعنی سازه ساندویچی شلیک شده ولی از آن عبور نکرده است.

با افزایش سرعت ورودی پرتابه، میزان جذب انرژی افزایش می یابد، به طوری که با افزایش سرعت پرتابه از ۱۵۱ به ۱۷۴ متر بر ثانیه میزان جذب انرژی ۱۴ درصد افزایش یافته است. این عامل را می توان ناشی از افزایش مقاومت ورق و فوم در نرخ کرنش های بالاتر دانست.

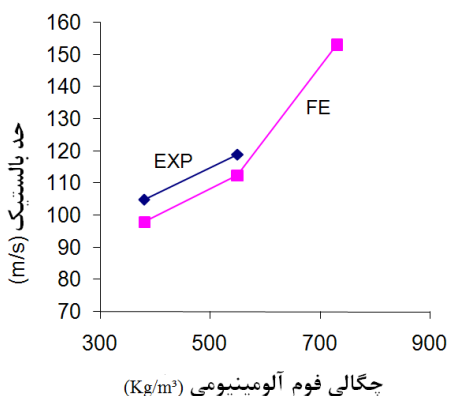
باید توجه داشت که نتایج تجربی ارائه شده برای حد بالستیک با استفاده از رابطه (۲) به دست آمده است و این رابطه برای سرعت ورودی نزدیک حد بالستیک جواب قابل قبولی ارائه می دهد و برای سرعت ورودی با اختلاف زیاد از حد بالستیک جواب خوبی ارائه نمی دهد.

با توجه به هزینه بر بودن انجام آزمایش های تجربی برای پیدا کردن حد بالستیک واقعی، در این تحقیق سعی شده است، با ارتباط بین آزمایش های تجربی و شبیه سازی عددی در محیط نرم افزار ال اس داینا و اطمینان از نتایج عددی، ادامه مراحل آزمایش ها با شبیه سازی انجام گیرد تا با انجام آزمایش ها در سرعت های متفاوت، حد بالستیک تعیین گردد. بنابراین در ادامه این تحقیق سعی شده است که حد بالستیک پرتابه در سازه ساندویچی با هسته فوم آلومینیومی با نسبت چگالی ۲۰ درصد و ضخامت ۲۰ میلی متر تعیین گردد که در جدول ۷ ارائه شده است. در شکل ۱۵ نیز نمودار سرعت خروجی بر حسب سرعت ورودی پرتابه نشان داده شده است.

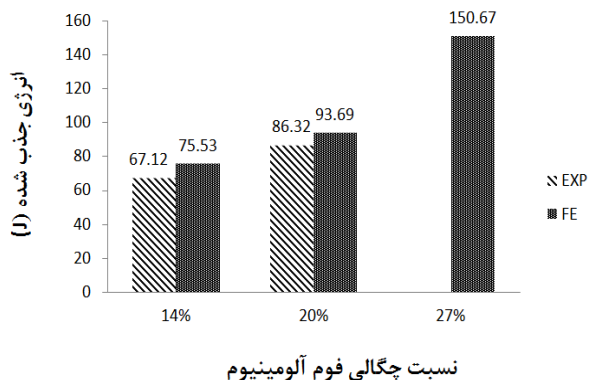
با توجه به نتایج ارائه شده جدول ۷ و شکل ۱۵، نتایج تجربی و عددی در سرعت های ورودی ۱۷۴ و ۱۵۱ متر بر ثانیه برای صحت سنجی حل عددی است و با ادامه آزمایش ها به کمک شبیه سازی، حد بالستیک بین دو عدد ۱۱۵ و ۱۱۰ قرار دارد، که با میانگین گیری بین این دو عدد حد بالستیک ۱۱۲/۵ متر بر ثانیه به دست می آید.

جدول ۶ مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با آزمایش های تجربی حاصل از تغییر سرعت پرتابه

نمونه			سرعت خروجی (m/s)
سرعت ورودی	سرعت ورودی	سرعت ورودی	
۱۷۴	۱۵۱	تجربی	۱۰۸/۹۷
۱۱۷	۹۳	عددی	
درصد اختلاف			۶٪
نمونه			جذب انرژی (J)
سرعت ورودی	سرعت ورودی	سرعت ورودی	
۱۰۱/۱۸	۸۶/۳۲	تجربی	۱۱۲/۲۴
۱۱۲/۲۴	۹۳/۶۹	عددی	
درصد اختلاف			۱۰٪



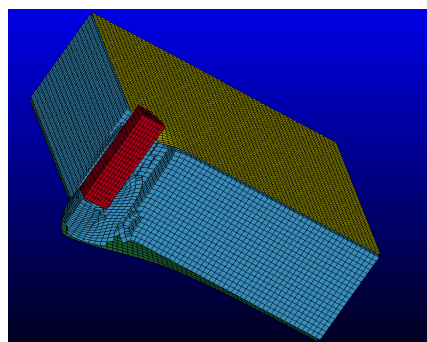
شکل ۱۷ نمودار حد بالستیک بر حسب چگالی فوم آلومینیومی



شکل ۱۸ نمودار انرژی جذب شده بر حسب چگالی فوم

با توجه به این شکل‌ها، با افزایش چگالی فوم آلومینیومی، حد بالستیک و انرژی جذب شده سازه ساندویچی نیز افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش نسبت چگالی از ۱۴ درصد به ۲۰ درصد، میزان جذب انرژی ۲۲ درصد و حد بالستیک ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. در واقع، با کاهش چگالی فوم، میزان تخلخل آن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزایش میزان تخلخل در فوم‌های فلزی، استحکام کششی و فشاری آن‌ها کاهش پیدا می‌کند. براساس نتیجه آزمایش‌های استحکام کششی و فشاری فوم آلومینیومی با میزان تخلخل آن نسبت عکس دارد. دلیل کاهش قابل توجه استحکام در تخلخل‌های بالای ۷۰ درصد این است که در این حالت حباب‌های کروی شکل به صورت چندوجهی درآمده و در نتیجه باعث تمرکز تنش در عیوب موجود در دیواره سلول‌ها می‌شود.

در واقع، چگالی فوم‌های فلزی بر قابلیت جذب انرژی آن‌ها در سازه‌های ساندویچی موثر است. تنش پایای فوم آلومینیومی



شکل ۱۶ فرآیند توقف پرتابه با سرعت ۱۱۰ متر بر ثانیه

۵-۲-تأثیر چگالی فوم آلومینیومی

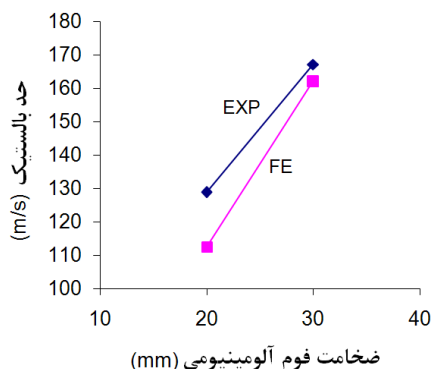
در این قسمت تأثیر چگالی هسته فوم آلومینیومی بر میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و حد بالستیک در فرآیند نفوذ پرتابه صلب سر تخت با سرعت اولیه ۱۵۰ متر بر ثانیه، در سازه ساندویچی با ضخامت ۲۲ میلی‌متری (دو لایه ورق ۱ میلی‌متری و فوم ۲۰ میلی‌متری)، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی در جدول ۸ و شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین نتایج آزمایش‌های تجربی و عددی در چگالی‌های متفاوت فوم آلومینیومی به کار رفته در هسته سازه ساندویچی هم‌خوانی خوبی برقرار است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، حد بالستیک و انرژی جذب شده سازه ساندویچی بر حسب چگالی‌های متفاوت نشان داده شده است.

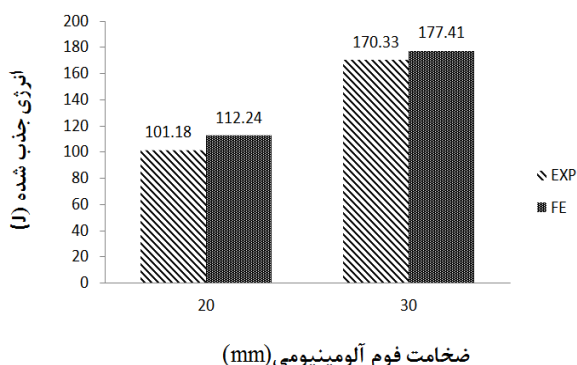
جدول ۸ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی حاصل از تغییر چگالی فوم آلومینیومی

نمونه	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	کد مشخصه
	۱۴٪	۲۰٪	۲۷٪	
	AF 102014	AF 102020	AF 102027	
سرعت ورودی	۱۵۲	۱۵۱	۱۵۰	تجربی
سرعت خروجی	۱۱۰	۹۳	رد نشد	تجربی
درصد اختلاف	۱۲٪	۸٪	-	تجربی
حد بالستیک	۹۸	۱۱۲/۵	۱۵۶	تجربی*
درصد اختلاف	۶٪	۵٪	-	تجربی

* مقادیر تجربی حد بالستیک از رابطه تقریبی (۲) به دست آمده است.



شکل ۱۹ نمودار حد بالستیک بر حسب ضخامت فوم



شکل ۲۰ نمودار انرژی جذب شده بر حسب ضخامت فوم آلومینیومی

این نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضخامت هسته فوم آلومینیومی در سازه ساندویچی به مکانیزم رفتاری ساختار فوم آلومینیومی در بیشتر فشرده شدن آن کمک کرده و همچنین کار پلاستیک لازم برای له شدگی سلول‌های فوم آلومینیومی که متاثر از اندازه و مقاومت فوم بوده از انرژی حاصل از برخورد پرتابه به فوم تامین می‌گردد. البته توضیح این نکته لازم است که نقش ورق آلومینیومی در دو طرف فوم آلومینیومی در ساختار ساندویچی نیز بسیار مهم بوده و به فوم آلومینیومی در ایفای نقش خود کمک می‌نماید.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، پس از تعیین خواص مکانیکی ورق و فوم آلومینیومی، با تعریف یک سری آزمایش‌های بالستیکی بر روی پانل ساندویچی با رویه ورق آلومینیومی و هسته فوم آلومینیومی، مطالعاتی بر روی اثر چگالی و ضخامت فوم و سرعت برخورد عمودی پرتابه صلب استوانه‌ای سر تخت بر میزان جذب انرژی ساختار ساندویچی انجام شده است. همچنین،

تولید شده با روش ریخته‌گری آلپوراس همراه با افزایش چگالی فوم افزایش می‌یابد. اما آنچه که بر قابلیت جذب انرژی موثر است سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی و یا تنش-کرنش است. با افزایش چگالی فوم آلومینیومی میزان تنش پایا افزایش یافته و سطح زیر منحنی نیز ابتدا افزایش می‌یابد، اما با افزایش بیشتر چگالی سطح زیر منحنی کاهش یافته و به این ترتیب قابلیت جذب انرژی در فوم کاهش پیدا می‌کند. دلیل این عامل را می‌توان ناشی از سوق پیدا کردن رفتار آن به سمت رفتار مواد صلب دانست.

۵-۳- ضخامت فوم آلومینیومی

در این قسمت تاثیر ضخامت هسته فوم آلومینیومی با نسبت چگالی ۲۰ درصد بر میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و حد بالستیک در فرآیند نفوذ پرتابه صلب سر تخت با سرعت اولیه ۱۵۰ متر بر ثانیه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی در جدول ۹ مقایسه شده است و در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بین نتایج آزمایش‌های تجربی و عددی هم‌خوانی خوبی برقرار است. با افزایش ضخامت هسته فوم آلومینیومی در سازه ساندویچی، میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و حد بالستیک افزایش یافته است، به طوری که با افزایش ضخامت هسته فوم آلومینیومی از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، میزان جذب انرژی ۴۰ درصد و حد بالستیک ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۹ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی حاصل از تغییر ضخامت فوم آلومینیومی

نمونه	ضخامت ۲۰ mm	ضخامت ۳۰ mm
کد مشخصه	AF102020	AF103020
سرعت ورودی	تجربی	۱۷۴
	عددی	۱۷۴
سرعت خروجی	تجربی	۴۸/۵
	عددی	۱۰۸/۹۷
جذب انرژی	تجربی	۱۰۱/۱۸
	عددی	۱۷۷/۴۱
حد بالستیک	تجربی	۱۶۷/۱
	عددی	۱۱۲/۵
درصد اختلاف	۱۰٪	۴٪
درصد اختلاف	۱۲٪	۳٪

کرنش تراکم	ϵ_D	به کمک آزمایش‌های تجربی روی فوم، ضرایب مدل دشنید-
کرنش شکست هیدرواستاتیک	ϵ_{cr}	فلک-فوم استخراج شده و مطالعات پارامتریک عددی صورت
کرنش ون مایرز	ϵ_e	گرفته است که نتایج عددی به دست آمده تطابق خوبی با نتایج
کرنش شکست	ϵ_f	تجربی نشان می‌دهد. آزمایش‌های بالستیک انجام شده بر روی
کرنش هیدرواستاتیک	ϵ_m	ساختار ساندویچی با فوم‌های با نسبت چگالی‌های ۱۴ درصد و
چگالی، kg/m^3	ρ	۲۰ درصد نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در حدود ۲۲
چگالی فوم آلومینیومی، kg/m^3	ρ_0	درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با تغییر ضخامت فوم
چگالی آلومینیوم، kg/m^3	ρ_s	آلومینیومی از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، جذب انرژی در حدود ۴۰
تنش، MPa	σ	درصد افزایش داده شده است. به علاوه افزایش سرعت برخورد از
تنش معادل، MPa	$\hat{\sigma}$	۱۵۱ به ۱۷۴ متر بر ثانیه جذب انرژی را در حدود ۱۴ درصد
تنش نهایی، MPa	σ_u	افزایش می‌دهد.
تنش ون مایرز، MPa	σ_{VM}	در این مقاله، برای تعیین سرعت حد بالستیک، به دلیل
تنش تسلیم، MPa	σ_Y	پرهزینه بودن آزمایش‌های تجربی و تعداد آزمایش نسبتاً بالای
تنش دیویاتوریک، MPa	σ^{dev}	مورد نیاز، از منحنی سرعت باقی‌مانده V_r بر حسب سرعت
تنش هیدرواستاتیک، MPa	σ_m	برخورد V_i ، در نقاط خاصی که آزمایش‌های تجربی موجود بود،
تنش پایا، MPa	σ_{pl}	نتایج عددی صحت‌سنجی شده و سپس به روش عددی حد
ضریب سختی	β	بالستیک استخراج شده است. برای نمونه پانل ساندویچی با فوم
ضریب سختی	γ	به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و نسبت چگالی ۲۰ درصد سرعت حد
نسبت پواسون	ν	بالستیک معادل ۱۱۲/۵ متر بر ثانیه به دست آمده است.
نسبت پواسون پلاستیک	ν^p	

۷- فهرست علائم

مدول الاستیسیته، MPa	E
انرژی جذب شده	E_p
ماتریس همانی	I
طول پرتابه	L
جرم پرتابه، kg	m_p
شعاع پرتابه	r
سرعت اولیه پرتابه، m/s	V_i
سرعت ثانویه پرتابه، m/s	V_r
حد بالستیک، m/s	V_{BL}

علائم یونانی

ضریب شکل سطح تسلیم فوم	α
ضریب سختی	α_2
کرنش	ϵ
کرنش معادل	$\hat{\epsilon}$
کرنش قراردادی	ϵ_d

۸- مراجع

- [1] Hou W., Zhu F., Lu G., Fang D. N., "Ballistic Impact Experiments of Metallic Sandwich Panels with Aluminium Foam Core", *Journal of the Impact Engineering*, Vol. 37, 2010, pp. 1045-1055.
- [2] Ashby M. F., Evans A. G., Fleck N. A., Gibson L. J., Hutchinson J. W., Wadley H. N. G., *Metal Foams: a Design Guide*, New York, Cambridge University Press, 2000, pp. 150-169.
- [3] Goldsmith W., Sackman J. L., "An Experimental Study of Energy Absorption in Impact on Sandwich Plates", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, 1992, pp. 241-262.
- [4] Mines R. A. W., Worrall C. M., Gibsson A. G., "Low Velocity Perforation Behaviour of Polymer Composite Sandwich Panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 10, 1998, pp. 855-879.
- [5] Roach A. M., Evans K. E., Jones N., "The Penetration Energy of Sandwich Panel Elements under Static and Dynamic Loading- Part I", *Composite Structures*, Vol. 42, 1998, pp. 119-134.

- [11] Reid S. R., Wen H. M., *Perforation of FRP Laminates and Sandwich Panels Subjected to Missile Impact*, Cambridge, Woodhead Publisher Ltd., 2000, pp. 239-279.
- [12] Villanueva G. R., Cantwell W. J., "The High Velocity Impact Response of Composite and FML-Reinforced Sandwich Structures", *Composites Science and Technology*, Vol. 64, 2004, pp. 35-54.
- [13] Hanssen A. G., Girard Y., Olovsson L., Berstad T., Langseth M., "A Numerical Model for Bird Strike of Aluminium Foam-Based Sandwich Panels", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, 2006, pp. 1127-1144.
- [14] Zhao H., Elnasri I., Girard Y., "Perforation of Aluminium Foam Core Sandwich Panels under Impact Loading - An Experimental Study", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, No. 7, 2007, pp.1246-1257.
- [15] Deshpande V. S., Fleck N. A., "Isotropic Constitutive Models for Metallic Foams", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, 2000, pp. 1253-1283.
- [6] Roach A. M., Evans K. E., Jones N., "The Penetration Energy of Sandwich Panel Elements under Static and Dynamic Loading- Part II", *Composite Structures*, Vol. 42, 1998, pp.135-152.
- [7] Hoo Fatt M. S., Park K. S., "Perforation of Honeycomb Sandwich Plates by Projectiles", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 31, 2000, pp. 889-899.
- [8] Lin C., Hoo Fatt M. S., "Perforation of Sandwich Panels with Honeycomb Cores by Hemispherical Nose Projectiles", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 7, 2005, pp. 133-172.
- [9] Kepler J., "Impact Penetration of Sandwich Panels at Different Velocities an Experimental Parameter Study: Part I - Parameters and Results", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 6, 2004, pp. 357-374.
- [10] Kepler J., "Impact Penetration of Sandwich Panels at Different Velocities an Experimental Parameter Study: Part II - Interpretation of Results and Modeling", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 6, 2004, pp. 357-374.