



بررسی تجربی و عددی نفوذ پرتابه صلب سرتخت 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، تهران

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

چکیده- سازه‌های ساندویچی با رویه فلزی و هسته فوم آلومینیومی، بهدلیل نسبت استحکام به وزن مناسب و جذب انرژی بالا، به عنوان سازه‌های سبک با قابلیت‌های بالستیکی اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف هواپما، 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 دشپند-فلک-فوم برای فوم فلزی و تعیین ضرایب آن به کمک نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده روی فوم و نرمافزار متلب، شبیه‌سازی برخورد و نفوذ پرتابه در ساختار ساندویچی به کمک نرم‌افزار ال‌اس‌داینا انجام شده و نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه و صحبت‌سنگی 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.

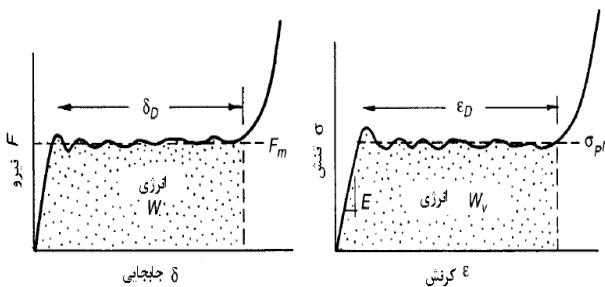
3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Imam Hossien Univ., Tehran, Iran.

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-جایه‌جایی، (ب) منحنی تنش-کرنش

آزمایش‌های مشابهی نیز توسط روج 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. هو فت و همکارانش [۷,۸] حل تحلیلی برای صفحه ساندویچی با هسته لانه زنبوری در معرض بار ضربه‌ای عمودی در اثر برخورد پرتا به‌هایی با شکل‌های مختلف را بر پایه اتصال کلی و کشش در امتداد صفحه توسعه دادند. کپلر [۹,۱۰] 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 ویلانووا 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 قراردادند. رائو 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-جایه‌جایی 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 پرتاگر 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 می‌رond. بحث برخورد اجسام و نفوذ پرتا به 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 دارد، 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 می‌رond عموماً دارای منحنی‌های تنش-کرنش کشیده و یکنواخت می‌باشند. این جاذب‌ها در 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 پایایی 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 ساکمن^۳ در آزمایش‌هایی اثر پارامترهای سرعت پرتا به، شرایط مرزی و مقاومت ناشی از اتصال بین هسته لانه زنبوری و صفحه آلومینیومی و جذب انرژی در طی فرآیند نفوذ را بررسی کردند. ماینر 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 لهیبدگی هسته و تنش تسلیم پوسته در نرخ کرنش‌های بالاتر است.

1. Plateau stress

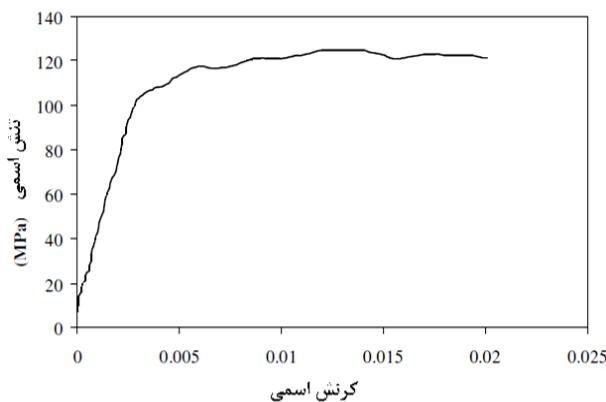
2. Poly-Vinyl Chloride

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی پرتابه فولادی

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



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



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش آزمایش کششی ورق آلومنیوم

جدول ۲ خصوصیات مکانیکی فوم آلومنیومی

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

۳-۲ خصوصیات مکانیکی فوم آلومنیومی

نمونه فوم‌های به کارگرفته شده در این تحقیق با روش ریخته‌گری آلپوراس از جنس Al (A356/SiCp) در ابعاد $130 \times 130 \times 30$ و $130 \times 130 \times 20$ 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.

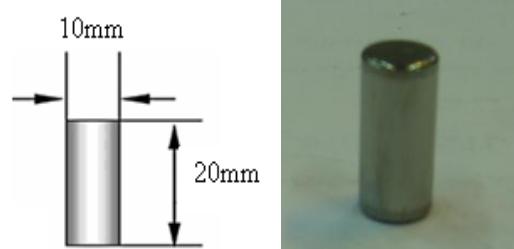
۲- خصوصیات مکانیکی مواد

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 سرتخت 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 خصوصیات مکانیکی ورق آلومنیومی

ورق آلومنیومی که برای آزمایش‌های تجربی نفوذ انتخاب شده از سری 1100-H14 می‌باشد. آزمایش کشش بر روی ورق E8 آلومنیوم 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 آلومنیومی 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 سرتخت

1. ISTRON 5500R

همان‌طور که از این منحنی‌ها پیداست، بعد از نقطه تسلیم در پیک اولیه، منحنی از شب همواری برخوردار بوده که نشان‌دهنده خاصیت جذب انرژی فوم‌های آلومینیومی است.

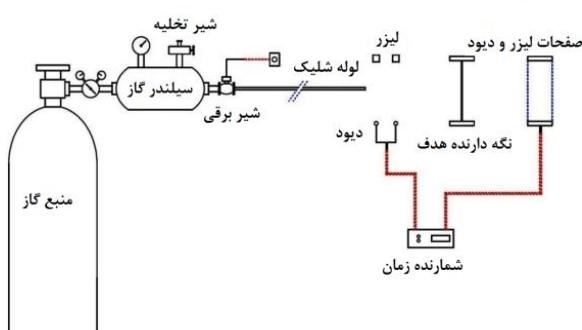
۳- آزمایش‌های تجربی

۱-۳- روش انجام آزمایش‌ها

در این بخش به روش انجام آزمایش‌های تجربی نفوذ پرتابه صلب سرتخت 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 آزمایش‌های تجربی، هدف به دست آوردن سرعت‌های پرتابه قبل از برخورد و پس از عبور از ساختار ساندویچی بوده است. پس از اندازه‌گیری این سرعت‌ها، انرژی جذب شده توسط هدف و حد بالستیک پرتابه محاسبه شده است.

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

نمونه‌ها در داخل قالب نگهدارنده دستگاه تفنگ گازی به وسیله پیچ‌هایی محکم شده‌اند، به طوری که شرایط مرزی کاملاً گیردار در لبه‌های سازه ساندویچی تامین گردد. سطح مواجهه سازه ساندویچی در مقابل نفوذ پرتابه در قسمت قالب نگهدارنده، مربعی به ضلع ۱۰۰ میلی‌متر بوده است.



شکل ۷ طرح شماتیک تفنگ گازی

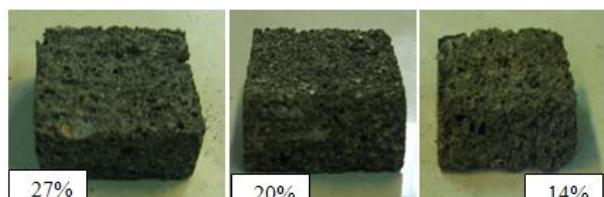
1. Gas gun

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

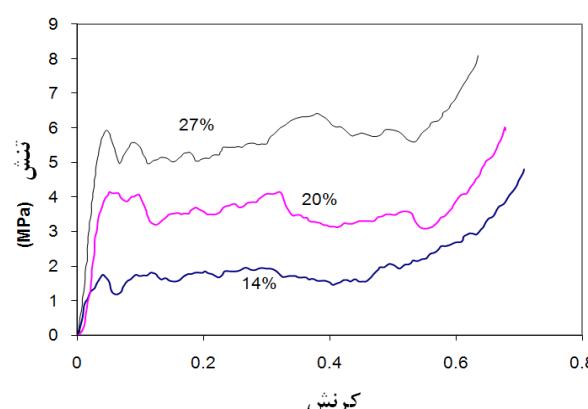
آزمایش فشار تکمحوری نمونه فوم‌های آلومینیومی (شکل ۵) به کمک دستگاه MTS با سرعت فک بالای $1/2 \text{ mm/min}$ انجام شده است. از این آزمایش‌ها منحنی تنش-کرنش و منحنی نیرو-جا به جایی ثبت شده است. شکل ۶ منحنی تنش-کرنش برای سه نوع فوم آلومینیومی با چگالی‌های مختلف، تحت نیروی فشاری تکمحوره را نشان می‌دهد.

جدول ۳ خصوصیات مکانیکی فوم‌های آلومینیومی با نسبت چگالی‌های متفاوت

مشخصات	نوع اول	نوع دوم	نوع سوم
نسبت چگالی	۱۴%	۲۰%	۲۷%
$E(\text{GPa})$	۱۱۰۰	۱۵۰۰	۱۸۰۰
$\sigma_Y(\text{MPa})$	۱	۳/۶	۵/۲
$\sigma_p(\text{MPa})$	۱/۵	۳/۸	۵/۴
ε_D	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۲
v	۰/۳	۰/۳	۰/۳



شکل ۵ نمونه‌های مختلف تهیه شده با نسبت چگالی‌های متفاوت برای انجام آزمایش فشار تک محوری



شکل ۶ نمودار تنش-کرنش فوم آلومینیومی با نسبت چگالی‌های متفاوت حاصل از اعمال بار فشاری تکمحوره در آزمایش شباهستاتیکی

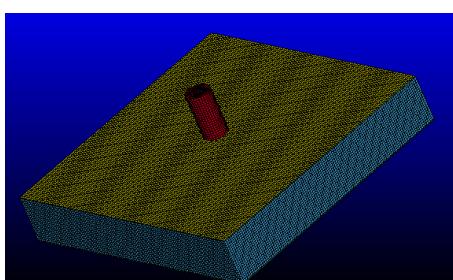
صحیح شرایط فیزیکی مسئله، از قبیل شرایط مرزی و استفاده از سطوح تماس و المان‌های متناسب با نوع مسئله، امکان انجام شبیه‌سازی صحیح، به کمک این نرم‌افزار را فراهم می‌کند. در این بخش، با توجه به پارامترهای موثر در پدیده نفوذ، اقدام به شبیه‌سازی عددی مسئله مورد نظر شده است. صحبت‌سنگی نتایج عددی به کمک نتایج تست‌های تجربی انجام شده است. پس از صحبت‌سنگی کار عددی، تاثیر پارامترهای دیگر به دست آمده است. درواقع، 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 ال‌اس‌داینا به وارد کردن مدل مربوطه به محیط ال‌اس‌داینا اقدام نموده و سپس به تعریف خصوصیات مواد، ویژگی‌ها، شرایط مرزی و معین کردن ابزارهای کنترلی در محیط نرم‌افزار ال‌اس‌داینا اقدام شده است. در شبیه سازی انجام شده، نفوذ پرتابه سرتخت فولادی در سازه ساندویچی مدل شده است. نمایی از مدل سه‌بعدی پرتابه و هدف همراه با مش درنظر گرفته شده در شکل ۸ دیده می‌شود.

۱-۴ 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 به طور مناسب انتخاب گردیده است (شکل ۹).

شرایط اولیه و مرزی درنظر 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

۲-۳ 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. به علاوه 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 درنظر گرفت:

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

که V_r و V_i 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 به دست 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 ال‌اس‌داینا^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 تکییک 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

1. LS-DYNA
2. Erosion element

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

۱-۲-۴- مدل صلب

به علت 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.

۲-۲-۴- مدل پلاستیک-سینماتیک

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

جدول ۴ خصوصیات ورق آلمینیومی 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	v

۳-۲-۴- مدل دشپند-فلک-فوم

مدل ماده دشپند-فلک-فوم، که برای فوم آلمینیومی انتخاب شده است، مدل شماره ۱۵۴ نرمافزار ال‌اس‌داینا است که تابع تسلیم آن به صورت زیر ارائه گردیده است [۱۵]:

$$\phi = \hat{\sigma} - \sigma_y \quad (3)$$

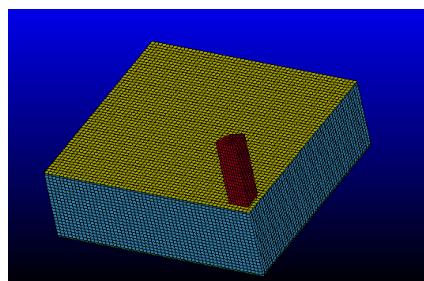
تنش معادل $\hat{\sigma}$ در رابطه بالا به صورت زیر تعریف شده است:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sigma_{VM}^2 - \alpha^2 \sigma_m^2}{1 + (\frac{\alpha}{3})^2} \quad (4)$$

که σ_{VM} تنش ون مایزز است:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right) \sigma^{dev}} : \sigma^{dev} \quad (5)$$

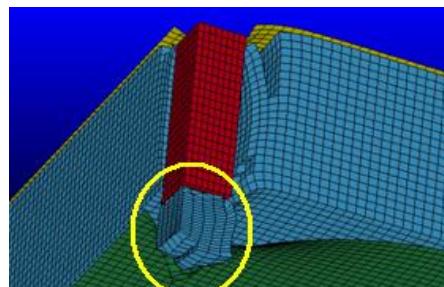
- 5. Rigid
- 6. Plastic-kinematic
- 7. Deshpande-Fleck-Foam



شکل ۹ یک‌چهارم مدل شبیه‌سازی شده

یک دیگر از نکات مهم در شبیه‌سازی انتخاب و اعمال سطوح تماس و برخورد مناسب است. در این شبیه‌سازی، از الگوریتم تماس‌فرسایشی 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 آلمینیومی و فوم آلمینیومی استفاده شده است. ساختار پرتابه و هسته فومی، با توجه به ابعاد آن‌ها، از نوع حجمی^۳ و ورق آلمینیومی 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 آلمینیومی در محیط نرمافزار ال‌اس‌داینا نشان داده شده است، که نحوه فشرده شدن و شکست هسته فوم آلمینیومی در اثر نفوذ پرتابه و همچنین پلاگ جدا شده از آن قابل مشاهده است.

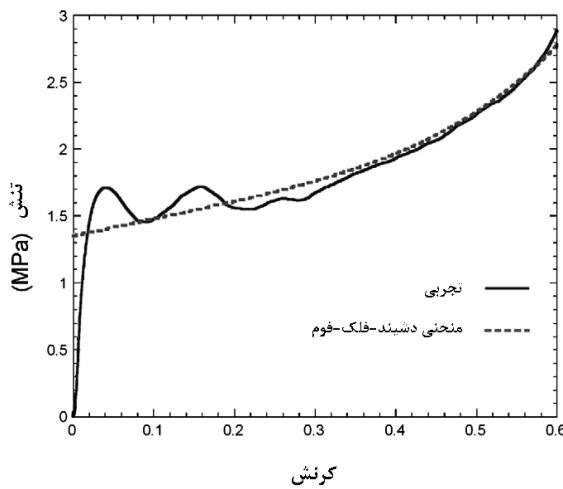


شکل ۱۰ تغییر فرم و شکل‌گیری پلاگ ناشی از نفوذ پرتابه

۴-۲- انتخاب مدل ماده

برای به دست 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 دشپند-فلک-فوم

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

نمونه سوم ۲۷٪	نمونه دوم ۲۰٪	نمونه اول ۱۴٪	خصوصیات
۱۸۰۰	۱۵۰۰	۱۱۰۰	$E(\text{MPa})$
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	ν^P
۲/۱	۲/۱	۲/۱	α
۷	۴/۳	۲/۵	$\gamma(\text{MPa})$
۱/۳۳	۱/۶۳	۱/۹۹	ϵ_d
۶۵	۴۸	۳۳	$\alpha_2(\text{MPa})$
۳	۵/۵	۸/۶	β
۵/۴	۳/۸	۱/۵	$\sigma_{pl}(\text{MPa})$
۰/۱	۰/۱	۰/۱	ϵ_{cr}

۵- نتایج و بحث

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

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

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

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

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\sigma) \quad (6)$$

$$\sigma^{dev} = \sigma - \sigma_m I \quad (7)$$

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

$$0 \leq \alpha^2 \leq \left(\frac{9}{2}\right) \quad (8)$$

برحسب ضریب پواسون پلاستیک بهصورت زیر تعریف می‌شود:

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

تنش تسليم نیز طبق رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$\sigma_Y = \sigma_p + \gamma \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_D} + \alpha_2 \ln\left(\frac{1}{1-\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_D}\right)^{\beta}}\right) \quad (10)$$

که σ_p تنش پایا و α_2 , γ و β پارامترهای سختی می‌باشند.

همچنین کرنش معادل بهصورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{\varepsilon}^2 = \left(1 + \left(\frac{\alpha}{3}\right)^2\right) [\varepsilon_e^2 + \frac{1}{\alpha_2} \varepsilon_m^2] \quad (11)$$

که $\dot{\varepsilon}_e$ کرنش ون مایزز و $\dot{\varepsilon}_m$ کرنش هیدرواستاتیک است.

اما کرنش قراردادی که بهعنوان کرنش فشاری تکمحوره است بهصورت زیر بیان می‌گردد:

$$\dot{\varepsilon}_d = -\frac{9+\alpha^2}{3\alpha^2} \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho_s}\right) \quad (12)$$

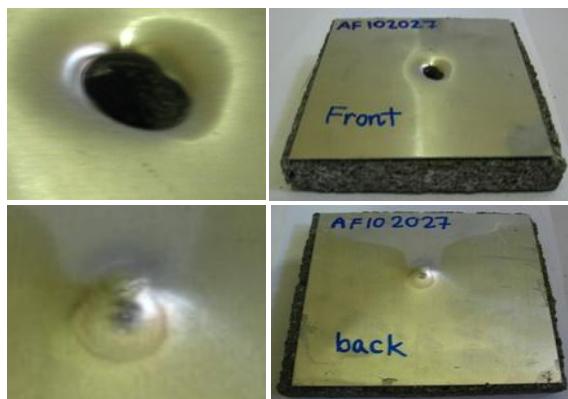
که ρ_0 چگالی فوم آلومینیوم و ρ_s چگالی آلومینیوم (ماده پایه) است.

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

$$\dot{\varepsilon}_m \geq \dot{\varepsilon}_m^{cr} \quad (13)$$

در ضمن، برای حذف المان‌های فوم در مسیر نفوذ پرتابه، از مدل فرسایشی^۱، که مدل کمکی برای حذف المان‌های استفاده شده است. در جدول ۵ خصوصیات فوم آلومینیوم همراه با ضرایب مدل مربوطه داده شده است. این ضرایب از گذراندن معادله منحنی تنش تسليم (رابطه ۱۰) ارائه شده برای مدل دشپند-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 نمایی از قسمت‌های جلویی و پشتی نمونه سازه ساندوبیچی 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 ساندوبیچی نسبتاً پرهزینه و زمان بر است.

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

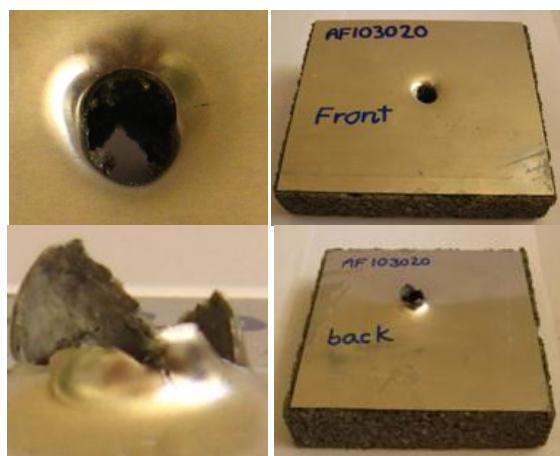
۱-۵- تاثیر سرعت پرتابه

در این قسمت تاثیر سرعت پرتابه بر میزان جذب انرژی سازه ساندوبیچی 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 ALS داینا در جدول ۶ مقایسه شده و در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین نتایج تجربی و عددی هم خوانی 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 ساندوبیچی انجام گرفته است.

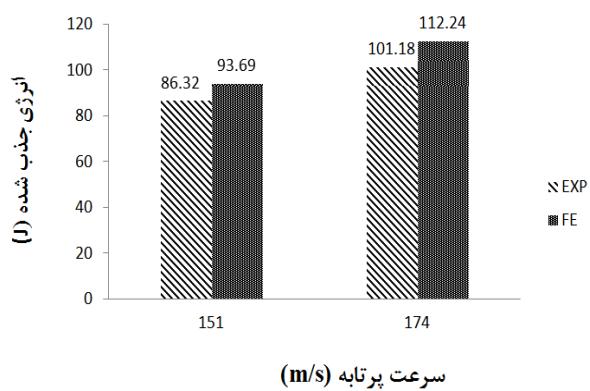
در شکل ۱۲، قسمت‌های مختلف سازه ساندوبیچی، که در معرض سوراخ شدنگی کامل پرتابه قرار گرفته است، نشان داده شده است. در ورق آلمینیوم جلویی سازه ساندوبیچی یک حفره با تغییرشکل موضعی دیده می‌شود، به طوری که مسیر حرکت پرتابه در طول ضخامت سازه ساندوبیچی همانند یک تونل به نظر می‌رسد. همچنین، جداشده‌گی بین ورق پشتی و فوم دیده می‌شود و در اطراف ناحیه سوراخ شده ورق پشتی تغییرفرم گلبرگی^۱ قابل مشاهده است.

شکل ۱۳ سازه ساندوبیچی 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 آلمینیوم نتوانسته قسمت‌های دیگر آن و ورق پشتی را نیز سوراخ نماید. فوم آلمینیوم و ورق آلمینیوم پشتی قرار گرفته در جلوی پرتابه سرتخت 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 ساندوبیچی نسبت به نمونه‌های سوراخ شده آن بیشتر است و ناحیه سوراخ شدنگی نیز به صورت موضعی می‌باشد و روی صفحه پشتی نیز تا حدودی پدیده‌های برآمدگی^۲ و تغییرفرم بشقابی^۳ قابل مشاهده است.



شکل ۱۲ نمایی از قسمت‌های جلویی و پشتی نمونه سازه ساندوبیچی بعد از انجام آزمایش نفوذ پرتابه

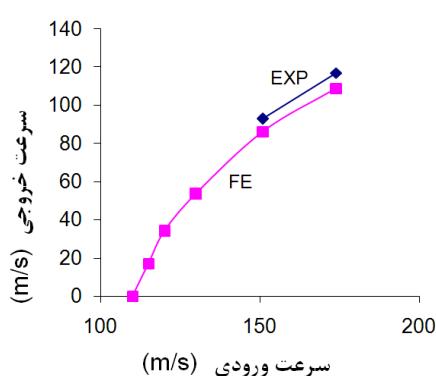
1. Petal
2. Bulging
3. Dishing



شکل ۱۴ انرژی جذب شده بر حسب سرعت ورودی پرتابه

جدول ۷ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی حاصل از تغییر سرعت پرتابه و محاسبه حد بالستیک

سرعت خروجی (m/s)	سرعت ورودی (m/s)	تجربی	عددی
۱۰۸/۹۷	۱۱۷		۱۷۴
۸۶/۲۶	۹۳		۱۵۱
۵۳/۵۲	-		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 شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آورد 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 می‌یابد، 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 می‌توان ناشی از افزایش مقاومت ورق و فوم در نرخ کرنش‌های بالاتر دانست.

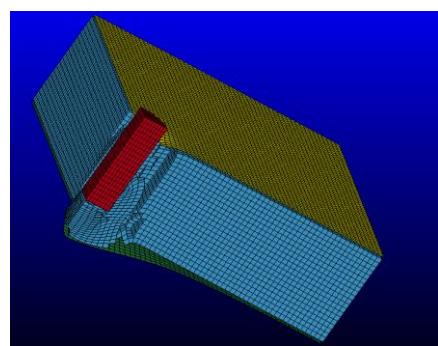
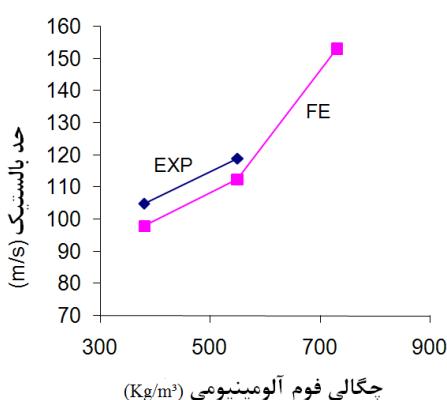
باید توجه داشت که نتایج تجربی ارائه شده برای حد بالستیک با استفاده از رابطه (۲) بدست آمده است و این رابطه برای سرعت ورودی نزدیک حد بالستیک جواب قابل قبولی ارائه می‌دهد و برای سرعت ورودی با اختلاف زیاد از حد بالستیک جواب خوبی ارائه نمی‌دهد.

با توجه به هزینه‌بر بودن انجام آزمایش‌های تجربی برای پیداکردن حد بالستیک واقعی، در این تحقیق سعی شده است، با ارتباط بین آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار الاس‌داینا و اطمینان از نتایج عددی، ادامه مراحل آزمایش‌ها با شبیه‌سازی انجام گیرد تا با انجام آزمایش‌ها در سرعت‌های 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 میلی‌متر 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 سرعت‌های ورودی ۱۷۴ و ۱۵۱ متر بر ثانیه برای صحبت‌سنجی حل عددی است و با ادامه آزمایش‌ها به کمک شبیه‌سازی، حد بالستیک بین دو عدد ۱۱۵ و ۱۱۰ قرار دارد، که با میانگین‌گیری بین این دو عدد حد بالستیک ۱۱۲/۵ متر بر ثانیه بدست می‌آید.

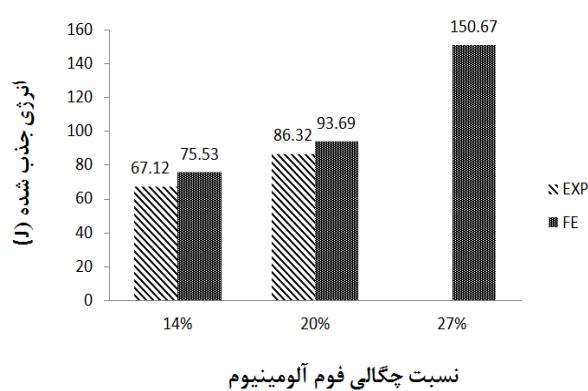
جدول ۶ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی حاصل از تغییر سرعت پرتابه

نمونه	سرعت ورودی	سرعت ورودی
تجربی	۱۵۱	۱۷۴
عددي	۹۳	۸۶/۲۶
درصد اختلاف	۷٪	۱۰۸/۹۷
تجربی	۸۶/۳۲	۱۱۷
عددي	۱۱۰	۱۰۸/۹۷
تجربی	۹۳/۶۹	۱۱۲/۲۴
عددي	۱۱۰	۹۳/۶۹
درصد اختلاف	۸٪	۱۱۲/۲۴



شکل ۱۶ فرآیند توقف پرتابه با سرعت ۱۱۰ متر بر ثانیه

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. درواقع، 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.

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

۲- تاثیر چگالی فوم آلومینیومی

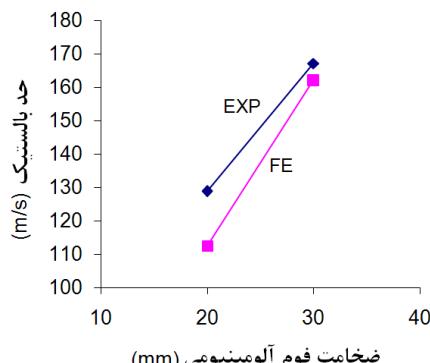
در این قسمت تاثیر چگالی هسته فوم آلومینیومی بر میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و حد بالستیک در فرآیند نفوذ پرتابه صلب سرتخت با سرعت اولیه ۱۵۰ متر بر ثانیه، در سازه ساندویچی با ضخامت ۲۲ میلی‌متری (دو لایه ورق ۱ میلی‌متری و فوم ۲۰ میلی‌متری)، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی 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.

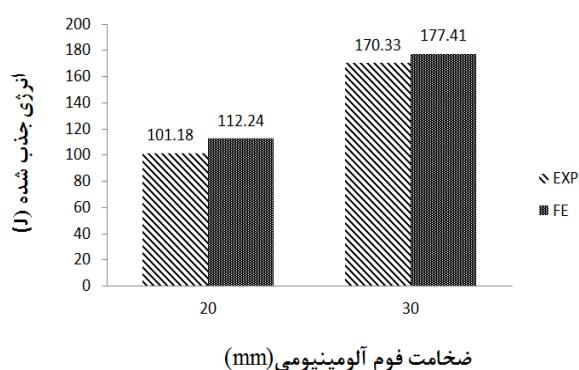
جدول ۸ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با آزمایش‌های تجربی حاصل از تغییر چگالی فوم آلومینیومی

نمونه	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم
۲۷٪	۲۰٪	۱۴٪	
AF 102027	AF 102020	AF 102014	کد مشخصه
۱۵۰	۱۵۱	۱۵۲	سرعت ورودی تجربی
۱۶۰	۱۵۱	۱۵۲	عددي تجربی
رد نشد	۹۳	۱۱۰	سرعت خروجی تجربی
۲۹/۷۳	۸۶/۲۶	۱۰۳/۵۴	عددي تجربی
-	۸۶/۳۲	۶۷/۱۲	تجربی
۱۵۰/۷۶	۹۳/۶۹	۷۵/۵۳	جذب انرژی عددی
-	۸٪	۱۲٪	درصد اختلاف
-	۱۱۸/۹۶	۱۰۴/۸۹	تجربی*
۱۵۶	۱۱۲/۵	۹۸	حد بالستیک عددی
-	۵٪	۶٪	درصد اختلاف

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



شکل ۱۹ نمودار حد بالستیک بر حسب ضخامت فوم



شکل ۲۰ نمودار اثری جذب شده بر حسب ضخامت فوم آلمینیومی

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

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از تعیین خواص مکانیکی ورق و فوم آلمینیومی، با تعریف یک سری آزمایش‌های بالستیکی بر روی پانل ساندویچی با رویه ورق آلمینیومی و هسته فوم آلمینیومی، مطالعاتی بر روی اثر چگالی و ضخامت فوم و سرعت برخورد عمودی پرتابه صلب استوانه‌ای سرتخت بر میزان جذب اثری 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-جا به جایی و یا تنش-کرنش است. با افزایش چگالی فوم آلمینیومی 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.

۳-۵- ضخامت فوم آلمینیومی

در این قسمت تاثیر ضخامت هسته فوم آلمینیومی با نسبت چگالی ۲۰ درصد بر میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و حد بالستیک در فرآیند نفوذ پرتابه صلب سرتخت 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 هم خوانی خوبی برقرار است. با افزایش ضخامت هسته فوم آلمینیومی در سازه ساندویچی، میزان جذب انرژی سازه ساندویچی و حد بالستیک افزایش یافته است، به طوری که با افزایش ضخامت هسته فوم آلمینیومی 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 آلمینیومی

نمونه	ضخامت	ضخامت	کد مشخصه
۳۰mm	۲۰mm		
AF103020	AF102020		
۱۷۴	۱۷۴	تجربی	سرعت ورودی
۱۷۴	۱۷۴	عددی	
۴۸/۵	۱۱۷	تجربی	سرعت خروجی
۳۴/۵۳	۱۰۸/۹۷	عددی	
۱۷۰/۱۳	۱۰۱/۱۸	تجربی	جذب انرژی
۱۷۷/۴۱	۱۱۲/۲۴	عددی	
۴%	۱۰%	درصد اختلاف	
۱۶۷/۱	۱۲۸/۷۹	تجربی	
۱۶۲	۱۱۲/۵	عددی	حد بالستیک
۳%	۱۲%	درصد اختلاف	

کرنش تراکم	ε_D
کرنش شکست هیدرواستاتیک	ε_{cr}
کرنش ون مایزز	ε_e
کرنش شکست	ε_f
کرنش هیدرواستاتیک	ε_m
kg/m ³	ρ
چگالی فوم آلومینیومی، kg/m ³	ρ_0
چگالی آلومینیوم، kg/m ³	ρ_s
تنش، MPa	σ
تنش معادل، MPa	$\hat{\sigma}$
تنش نهایی، MPa	σ_u
تنش ون مایزز، MPa	σ_{VM}
تنش تسلیم، MPa	σ_Y
تنش دیوباتوریک، MPa	σ^{dev}
تنش هیدرواستاتیک، MPa	σ_m
تنش پایا، MPa	σ_{pl}
ضریب سختی	β
ضریب سختی	γ
نسبت پواسون	ν
نسبت پواسون پلاستیک	v^p

به کمک آزمایش‌های تجربی روی فوم، ضرایب مدل دشپند-فلک‌فوم استخراج شده و مطالعات پارامتریک عددی صورت گرفته است که نتایج عددی به دست آمده تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهد. آزمایش‌های بالستیک انجام شده بر روی ساختار ساندویچی با فوم‌های با نسبت چگالی‌های ۱۴ درصد و ۲۰ درصد نشان می‌دهد که میزان جذب انرژی در حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با تغییر ضخامت فوم آلومینیومی از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، جذب انرژی در حدود ۴۰ درصد افزایش داده شده است. به علاوه افزایش سرعت برخورد از ۱۵۱ به ۱۷۴ متر بر ثانیه جذب انرژی را در حدود ۱۴ درصد افزایش می‌دهد.

در این مقاله، برای تعیین سرعت حد بالستیک، به دلیل پرهزینه بودن آزمایش‌های تجربی و تعداد آزمایش نسبتاً بالای مورد نیاز، از منحنی سرعت باقی‌مانده V_r بر حسب سرعت برخورد V_i ، در نقاط خاصی که آزمایش‌های تجربی موجود بود، نتایج عددی صحتسنگی شده و سپس به روش عددی حد بالستیک استخراج شده است. برای نمونه پانل ساندویچی با فوم به ضخامت ۲۰ میلی‌متر و نسبت چگالی ۲۰ درصد سرعت حد بالستیک معادل ۱۱۲/۵ متر بر ثانیه به دست آمده است.

۷- فهرست علایم

علایم یونانی	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}	

- [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.

۸- مراجع

- [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.