

مدل سازی فوم های آلومینیومی جهت جذب ضربه در ساختارهای چند لایه

رضا حساری*

کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سید یوسف احمدی بروغنی

دانشیار، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

در پژوهش حاضر، شش پیکربندی محافظتی چندلایه در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده است. سه تا از پیکربندی ها شامل یک صفحه برخورد فولادی و یک صفحه سرامیکی است و در سایر مدل ها در میان این دو صفحه، یک لایه فوم آلومینیومی تولید شده توسط جهاد دانشگاهی مشهد با ضخامت های مختلف، لحاظ شده است. برخورد پرتابه ای با سرعت مشخص به این پیکربندی ها مطالعه شده تا تأثیر حضور فوم آلومینیومی در برخوردهای با سرعت بالا و جذب انرژی مورد بررسی قرار گیرد. از مدل آسیب جانسون-کوک برای مدل سازی رفتار پلاستیک در فولاد (صفحه برخورد و پرتابه) استفاده شده و برای مدل سازی رفتار فوم آلومینیومی از مدل فوم ضربه پذیر له شونده در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. در پایان مشاهده شد که پیکربندی دارای فوم آلومینیومی با افزایش جرم ۲۸/۴ درصدی، در جذب تنش های اعمالی به صفحه سرامیکی نقش بسزایی داشته و علاوه بر میرا نمودن تنش های اعمالی، بیشینه این تنش ها را در مقایسه با ساختار بدون فوم، تا بیش از ۵۰ برابر کاهش داده است.

واژه های کلیدی: فوم فلزی، مدل آسیب جانسون-کوک، فوم ضربه پذیر له شونده، جذب انرژی، تنش پایا.

Modeling of Aluminum Foams for Impact Absorption in Multilayer Structures

R. Hesari

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

S. Y. Ahmadi Brooghani

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

Abstract

In this study metal foams are simulated by their mechanical properties with continuum mechanics model. To do so, six multi layered armors were simulated. Three armors consisted of steel/ceramic plates with different thicknesses and other armors had a layered aluminum foam between their layers. A bullet with specified velocity was collided to armors and the Johnson-Cook model was used for the steel plate and bullet and the crushable foam model was used for aluminum foam. The results of the present research showed that the multi layered armor with aluminum foam (28.4 percent overweight) reduced the stress in ceramic plate more than 50 times compared to armors without aluminum foam.

Keywords: Metal Foam, Johnson-Cook, Crushable Foam, Energy Absorbent, Plateau Stress.

فیزیکی لایه های سوراخ شونده را پیش بینی می کند. فلز [۴] با مدلسازی یک پیکربندی محافظتی به کمک مدل پیش بینی رفتار جانسون-کوک و تحلیل المان محدود در نرم افزار Ansys Autodyn و مقایسه با نتایج تجربی، از مدل خود به عنوان مدلی مناسب برای پیش بینی رفتار پیکربندی های محافظتی نام می برد. گاما و همکارانش [۵] نیز در مطالعه ای با مقایسه چند پیکربندی محافظتی دارای یک لایه فوم سلول بسته نشان دادند که ساختار سلولی و متخلخل فوم های آلومینیومی باعث پراکندگی امواج تنش در درون فوم می شود. موریو و همکاران [۶] در مطالعه خود یک فوم سلول باز را به صورت فوم ضربه پذیر له شونده^۳ در نرم افزار المان محدود ABAQUS مدل سازی نموده اند و با مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی دریافتند که تحلیل المان محدود همراه با حالت فوم ضربه پذیر له شونده توانایی بالایی در مدل سازی و پیش بینی رفتار فوم های فلزی دارند. تیتا و کالیری جونیور [۷] در مطالعه خود فوم ضربه پذیر له شونده را در دو حالت سخت شونده همسانگرد^۴ و سخت شونده حجمی^۵ مدلسازی نموده اند و نتایج حاصل را با مدل واقعی و غیرهمسانگرد مقایسه

۱- مقدمه

فوم های فلزی به دلیل خواص منحصر به فردشان در جذب ضربه و انرژی، همواره مورد توجه بوده اند. خواص فوم های فلزی و ساختارهای فلزی حفره دار به خواص فلز پایه، چگالی نسبی^۱ (نسبت چگالی فوم فلزی به فلز پایه)، ریخت شناسی حفره ها (باز یا بسته بودن حفره ها، اندازه حفره ها) و غیره بستگی دارد [۱]. برخی مطالعات صورت گرفته در رابطه با خواص فوم های فلزی به شرح زیر است:

وانیچایانگ کورانوت و همکاران [۲] به بررسی تأثیر برخورد گلوله به یک ساختار محافظتی (فولاد-سرامیک) پرداخته اند. آنها از مدل آسیب جانسون-کوک^۲ برای مدل سازی رفتار پلاستیک در فولاد استفاده کرده اند و دریافتند که مدل پیش بینی رفتار جانسون-کوک به خوبی تخریب یک لایه فولادی را مدل سازی می نماید. پکوچک و همکارانش [۳] در مطالعه خود ضخامت های مختلف یک زره چندلایه (فولاد، سرامیک و بتن) را در نظر گرفته و با مقایسه نتایج تجربی با نمونه مدلسازی شده دریافتند که روش المان محدود به خوبی رفتار

³ Crushable foam

⁴ Crushable Foam with Isotropic Hardening (CIH)

⁵ Crushable Foam with Volumetric Hardening (CVH)

¹ Relative Density

² Johnson-Cook

کردن پرتابه را بر عهده دارد. صفحه فلزی با مقاومت بالا نیز مقدار زیادی از تنش ناشی از برخورد را گرفته و از آسیب مستقیم سرامیک جلوگیری می‌کند [۲]. در حالات برخورد با سرعت‌های بالا (مثل برخورد گلوله) امواج تنش تولید شده توسط پرتابه که به صفحه برخورد اصابت کرده، به لایه سرامیکی می‌رسند و در آن میکروتکرهایی را به وجود می‌آورند. این میکروتکرها سبب ضعیف‌تر شدن این لایه می‌شوند. لذا استفاده از جاذب‌های انرژی می‌تواند در جذب یا کاهش شوک ناشی از برخورد مؤثر باشد [۱۰].

۲-۲- مدل‌سازی فوم آلومینیومی

فوم مورد استفاده جهت مدل‌سازی از نوع فوم آلومینیومی سلول بسته می‌باشد. این فوم در مطالعه‌ای توسط آبروی و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه حاضر نیز نمونه‌ای از همان فوم فلزی آلومینیومی با همان ابعاد، در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شده است. همچنین همانند مطالعه یان و همکاران [۱۱] برای تعیین رفتار پلاستیک فوم، از حالت فوم ضربه‌پذیر له شونده با سخت‌شوندگی همسانگرد استفاده شده است. برای تعیین رفتار در این حالت نیاز به تعیین مقدار نسبت پواسن پلاستیک^۲ (ν_p) فوم می‌باشد که مقدار آن برای فوم‌های با چگالی پایین تقریباً صفر در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. در این مطالعه نیز مقدار صفر برای آن لحاظ گردیده است. پارامتر دیگری که در این قسمت نیاز می‌باشد، نسبت تنش تسلیم فشاری^۳ است که با توجه به نسبت پواسن پلاستیک قابل محاسبه می‌باشد [۱۲].

$$K = \sqrt{3(1-2\nu_p)} \quad (۱)$$

در مطالعه حاضر، مدول الاستیسیته فوم‌های فلزی نیز با توجه به خواص فلز پایه محاسبه شده است [۱۱].

$$E_{foam} = A E_{Al} \bar{\rho}^2 \quad (۲)$$

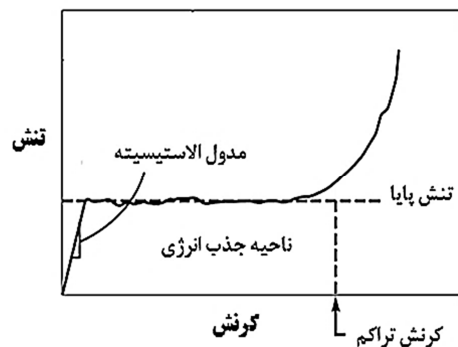
که در آن A ضریب و معادل 0.3 ، E_{Al} مدول الاستیسیته آلومینیوم به عنوان فلز پایه و معادل $68/9$ گیگاپاسکال و $\bar{\rho}$ چگالی نسبی فوم و معادل 0.16 می‌باشد. فوم مدل‌سازی شده با ابعاد $30 \times 30 \times 3$ میلی‌متر تحت بارگذاری فشاری تک محوری قرار گرفته است. با توجه به خواص بیان شده، مدل المان محدودی مدل‌سازی شده و تحت کرنش فشاری قرار داده شده است. پانگیراهی و داس [۱۳] با توجه نمودار تنش-کرنش فوم آلومینیومی تحت بارگذاری تک محوری فشاری، فوم مورد نظر خود را مدل‌سازی کرده و سپس در ساختاری تحت برخورد با سرعت بالا مورد بررسی قرار داده‌اند لذا در این پژوهش نیز از نمودار تنش-کرنش فوم تحت بارگذاری تک محوری فشاری استفاده شده است و نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی مرجع [۸] مقایسه شده است (شکل ۲).

کرده‌اند. آنها دریافتند که مدل با سخت‌شوندگی همسانگرد، نتایجی نزدیک‌تر به حالت واقعی نسبت به مدل با سخت‌شوندگی حجمی ارائه می‌دهد. در مطالعه حاضر امکان‌سنجی استفاده از فوم‌های آلومینیومی تولید داخل جهت استفاده برای جذب انرژی به همراه تحلیل رفتار فشاری این مواد مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی صحت نتایج، رفتار فشاری فوم آلومینیومی مدل‌سازی شده در مطالعه حاضر با نتایج تجربی [۸] مقایسه شده است. نتایج مطالعه حاضر می‌تواند در حوزه‌های مختلفی از جمله صنایع خودروسازی و یا هوافضا مورد استفاده قرار گیرد.

۲- تئوری

در هنگام برخورد پرتابه به فوم، انرژی ناشی از برخورد ابتدا ناحیه جلویی فوم را مورد هدف قرار می‌دهد و سبب متراکم شدن آن می‌شود. لذا برخی از دیواره‌های سلول‌های تشکیل دهنده فوم دچار برش و یا گسیختگی و پارگی می‌شوند. با توجه به اینکه این دیواره‌ها در یک ساختار شبکه‌ای در کنار هم و متصل به هم قرار گرفته‌اند، انرژی اعمالی را به سلول‌های مجاور خود منتقل می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود تا تنش در مسیرهای مختلف پخش گردد و فقط در مسیر اعمال نیرو نباشد [۹]. با توجه به شکل ۱ مشاهده می‌شود که نمودار تنش-کرنش یک فوم فلزی دارای سه ناحیه است:

ناحیه اول محدوده الاستیک نام دارد که در این ناحیه تغییرات تنش و کرنش نسبت به یکدیگر خطی می‌باشد. ناحیه دوم که نمودار تقریباً مسطح بوده و بیشترین میزان جذب انرژی در این ناحیه صورت می‌گیرد. ناحیه سوم زمانی است که میزان کرنش در فوم به حد فروپاشی در سلول‌ها می‌رسد که همان ناحیه فروپاشی است. جاذب‌های انرژی ایده‌آل خط تنش-کرنش طولانی و تقریباً مسطحی دارند. شکست پلاستیک جاذب‌های انرژی در تنش ثابت، تنش پایا^۱ نامیده می‌شود [۱۰].



شکل ۱- نمودار تنش-کرنش در فوم‌های فلزی [۱۰]

۲-۱- پیکربندی‌های محافظتی رایج

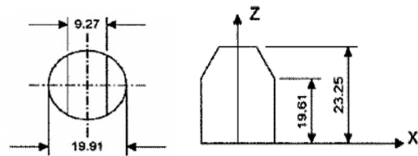
یک پیکربندی معمول و رایج برای ساختارهای محافظتی با وزن معمولی به صورت زیر می‌باشد:

صفحه برخورد با مقاومت بالا (فلز) که به یک لایه سرامیکی متصل شده است. در این پیکربندی لایه سرامیکی وظیفه شکستن و خرد

^۲ Plastic Poisson's Ratio

^۳ Compression Yield Stress Ratio

^۱ Plateau Stress



شکل ۳- ابعاد هندسی پرتابه بر حسب میلی متر [۳]

جنس صفحه برخورد و پرتابه هر دو فولاد HSS^۳ در نظر گرفته شده و خواص مکانیکی لایه‌های فولادی و سرامیکی نیز به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی فولاد صفحه برخورد و پرتابه [۲]

چگالی (kg/m ³)	۷۸۷۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۰
نسبت پواسان	۰/۳۳

جدول ۳- خواص مکانیکی لایه سرامیکی [۲]

چگالی (kg/m ³)	۳۹۰۰
مدول الاستیسیته (GPa)	۳۵۰
نسبت پواسان	۰/۲۲
تنش تسلیم (MPa)	۲۴۰۰

از مدل آسیب جانسون-کوک برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک در فولاد و پرتابه و بررسی انتشار امواج تنش در آنها استفاده شده است. برای مدل‌سازی لایه سرامیکی نیز از حالت پلاستیک کامل استفاده شده است [۲]. قانون پلاستیسیته جانسون-کوک یک قانون کامل برای تغییر شکل پلاستیک مواد می‌باشد که تأثیر نرخ کرنش، دما و کرنش پلاستیک را بر روی تنش ارائه می‌دهد و عبارت است از:

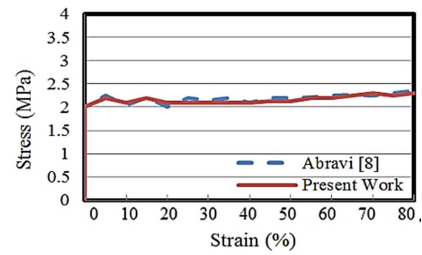
$$\bar{\sigma} = \left[A + B \left(\bar{\epsilon}^{pl} \right)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left(1 - \hat{\theta}^m \right) \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left(1 + d_5 \hat{\theta} \right) \quad (4)$$

کرنش در شکست نیز براساس رابطه (۴) بدست می‌آید که به نرخ کرنش و دما وابسته می‌باشد که در آنها، $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ کرنش پلاستیک مؤثر، $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک مؤثر، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، A ، B و C پارامترهای ماده در زیر دمای انتقال، $\hat{\theta}$ دمای بی‌بعد نرمالیزه شده، n و m ضرایب سخت‌شوندگی و حرارتی، p فشار یا تنش میانگین، q تنش میزز، d_1-d_5 پارامترهای شکست و $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ کرنش در شکست می‌باشند. مدل تخریب برشی جانسون-کوک بر پایه معادله

$$\omega = \sum (\bar{\epsilon}^{pl} / \Delta \bar{\epsilon}_f^{pl}) \quad (5)$$

می‌باشد و شکست زمانی رخ خواهد داد که مقدار ω از یک بیشتر شود. همچنین در رابطه (۵) $\Delta \bar{\epsilon}_f^{pl}$ نمو کرنش پلاستیک معادل است [۲]. در جدول (۴) ضرایب و ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای فولاد و پرتابه مورد استفاده ارائه شده است که به هنگام مدل‌سازی باید در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS اعمال



شکل ۲- مقایسه نمودار تنش-کرنش فوم آلومینیومی مدل‌سازی شده با نتایج تجربی

در جدول ۱ خواص فوم مدل‌سازی شده مشاهده می‌شود. برای مدل‌سازی دقیق‌تر محل برخورد، در تمامی لایه‌ها قسمتی^۱ به فاصله ۶۰ میلی‌متر از اطراف لبه پایینی آنها (محل برخورد پرتابه) جدا شده تا مش‌بندی در این قسمت ریزتر و نتایج دقیق‌تر باشند. نوع المان در تمام لایه‌ها تنش سه بعدی استاندارد^۲ (C3D8R) در نظر گرفته شده و تعداد این المان‌ها در لایه فولادی ۴۶۲ المان، در لایه سرامیکی ۴۸۴ المان و در لایه فوم در پیکربندی‌های دوم، پنجم و ششم به ترتیب ۶۰۷۲، ۴۴۱۶ و ۱۸۴۸ المان می‌باشد. سطوح بالایی مدل‌ها به طور کامل مقید شده‌اند و سطح پایین و سمت راست مدل‌ها (نزدیک به محل برخورد) به صورت تقارن محوری قیدگذاری شده‌اند.

جدول ۱- ویژگی‌های فوم آلومینیومی مورد استفاده در مدل‌سازی‌ها

سلول بسته	ساختار
۴۳۲	چگالی (kg/m ³)
۲/۲	تنش تسلیم (MPa)
۸۰ درصد	کرنش تراکم
۰/۳	نسبت پواسان
۰/۵۳	مدول الاستیسیته (GPa)

۳-۲- مدل‌سازی پیکربندی‌های چندلایه

در پژوهش حاضر، پیکربندی‌ها در شش حالت زیر در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند: حالات اول، سوم و چهارم شامل ضخامت‌های مختلفی از یک صفحه برخورد فولادی با مقاومت بالا و یک صفحه سرامیکی می‌باشند که به هم متصل شده‌اند. حالات دوم، پنجم و ششم علاوه بر دو صفحه فولادی و سرامیکی دارای یک لایه از فوم فلزی آلومینیومی نیز هستند. جنس و نوع مواد مورد استفاده جهت مدل‌سازی لایه‌ها نیز با توجه به آنچه در عمل برای پیکربندی‌های چندلایه استفاده می‌شود، انتخاب شده‌اند. پرتابه مورد نظر با سرعت ۴۵۰ متر بر ثانیه به پیکربندی‌ها برخورد می‌کند. ابعاد هندسی پرتابه نیز در شکل ۳ مشاهده می‌شود. جهت ساده‌سازی و استفاده از مزیت تقارن، فقط یک چهارم از مدل اصلی بررسی شده است (تمامی ابعاد و جرم‌ها و نتایج برای حالت یک‌چهارم مدل ارائه شده‌اند).

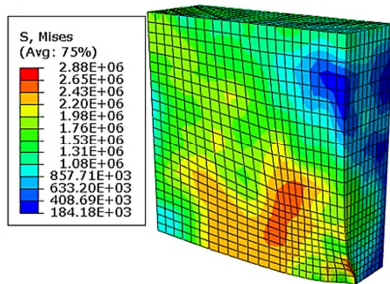
¹ Partition

² 3D Stress (Standard- Hexahedral Linear)

³ High-Speed Steel

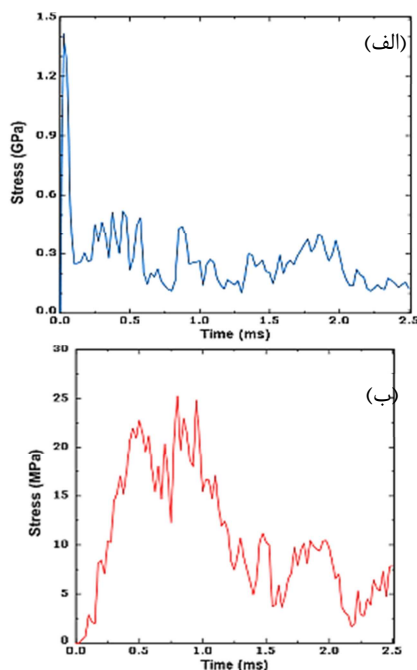
گردد.

آلومینیومی موجود در پیکربندی دوم را نشان می‌دهد. در ادامه با بررسی امان انتهایی لایه سرامیکی در این پیکربندی، می‌توان به عملکرد فوم آلومینیومی جهت جذب انرژی و تنش ناشی از برخورد پی‌برد.



شکل ۵- توزیع تنش در فوم آلومینیومی در پیکربندی دوم در لحظه ۰/۹ میلی ثانیه

نمودار تنش میزز - زمان برای امان مورد نظر در پیکربندی‌های اول و دوم در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که میزان بیشینه تنش در پیکربندی اول ۱۴۰۰ مگاپاسکال می‌باشد و با توجه به اینکه تنش تسلیم سرامیک ۲۴۰۰ مگاپاسکال است، لذا این چنین برخوردهایی می‌توانند سبب ایجاد میکروتکرک‌ها یا فعال‌سازی آنها و شکست در لایه سرامیکی شوند اما در پیکربندی دوم افزودن لایه فوم آلومینیومی سبب کاهش قابل توجهی در تنش‌های اعمالی به لایه سرامیکی شده است، بطوری که بیشینه این تنش‌ها در مقایسه با پیکربندی اول بیش از ۵۰ برابر کاهش یافته است و در حالت بیشینه به مقدار ۲۵ مگاپاسکال رسیده است در حالیکه فوم، وزن ساختار را به میزان اندکی افزایش داده است. از طرفی می‌توان به این نکته نیز توجه کرد که زمان اعمال ضربه نیز افزایش یافته و ضربه عملاً میرا شده است.



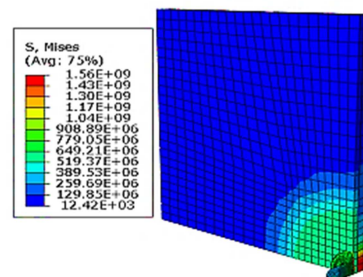
شکل ۶- تنش میزز - زمان امان انتهایی لایه سرامیکی در (الف) پیکربندی اول (ب) پیکربندی دوم

جدول ۴ - ضرایب مدل جانسون-کوک برای فولاد و پرتابه [۲]

۵۳۲ (MPa)	A
۲۲۹ (MPa)	B
۰/۳۰۲۴	n
۱	m
۰/۰۷۰۵	d ₁
۱/۷۳۲	d ₂
-۰/۵۴	d ₃
-۰/۰۱۵	d ₄
.	d ₅
۰/۰۰۰۵	نرخ کرنش مرجع ($\dot{\epsilon}_0$)
۰/۱	جابجایی در شکست
۱۷۹۳	دمای ذوب (کلوین)
۲۸۳	دمای انتقال (کلوین)
۴۵۲	گرمای ویژه (J/kg.K)

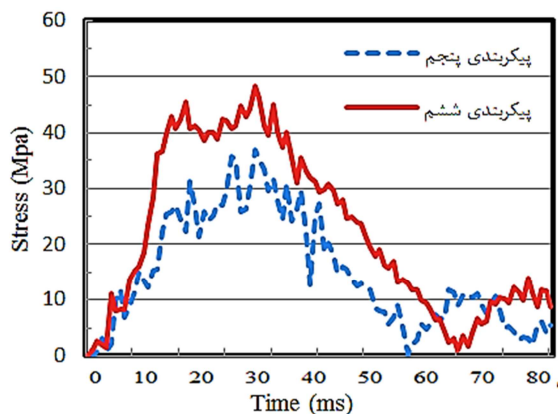
۳- نتایج و بحث

آنچه در این مطالعه مورد بررسی است، مطالعه رفتار لایه سرامیکی پس از برخورد پرتابه در چندین پیکربندی مختلف می‌باشد. لایه‌های فولادی و سرامیکی به ترتیب با ضخامت‌های ۵ و ۸ میلی‌متر مدلسازی شده‌اند. عرض صفحات در مدل‌ها نیز ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. جهت بررسی جذب انرژی و تنش‌های حاصل از برخورد، المانی یکسان از لایه سرامیکی در تمامی حالت مورد بررسی قرار گرفته است. این المان در انتهای ضخامت لایه سرامیکی (نزدیک‌ترین جزء به افراد یا تجهیزات در حال حفاظت) بوده و از طرفی در مقابل سطح برخورد پرتابه با پیکربندی نیز می‌باشد که در این حالت یکی از بیشترین تنش‌های اعمالی به این جزء وارد می‌گردد. زمان در تمامی حالات ۲۵ میلی ثانیه در نظر گرفته شده است و به گونه‌ای می‌باشد که برخورد پرتابه در تمامی پیکربندی‌ها به صورت کامل صورت گرفته و پرتابه در طی این زمان، پس از برخورد کامل، اندکی به عقب باز می‌گردد. در شکل ۴ مشاهده می‌شود که بیشترین تنش‌ها پس از برخورد پرتابه، در المان‌های مقابل ناحیه برخورد و در صفحه سرامیکی بوجود آمده‌اند.



شکل ۴- توزیع تنش‌های حاصل از برخورد پرتابه به پیکربندی اول در لحظه ۰/۰۲۵ میلی ثانیه

در پیکربندی دوم، لایه‌ای از فوم فلزی آلومینیومی به ضخامت ۶۵ میلی‌متر در بین لایه‌های فولادی و سرامیکی لحاظ شده است. جرم این لایه از فوم، ۱/۱۲۳ کیلوگرم می‌باشد. شکل ۵ توزیع تنش در لایه فوم



شکل ۸- تنش میزز - زمان المان انتهایی لایه سرامیکی در پیکربندی‌های پنجم و ششم

در جدول ۵ مقایسه‌ای کامل در رابطه با جذب تنش، ضخامت لایه‌ها، نوع لایه‌ها و جرم پیکربندی‌های مدل‌سازی شده ارائه شده است.

جدول ۵- مقایسه پیکربندی‌ها در جذب تنش

پیکربندی	ضخامت لایه فولادی (mm)	ضخامت لایه فوم آلومینیومی (mm)	ضخامت لایه سرامیکی (mm)	تنش بیشینه المان انتهایی (MPa)	جرم ساختار (kg)
اول	۵	-	۸	۱۴۰۰	۲/۸۲
دوم	۵	۶۵	۸	۲۵	۳/۹۴
سوم	۷۰	-	۸	۱۴۳	۲۳/۲۸
چهارم	۵	-	۷۳	۹۵	۱۲/۹۶
پنجم	۵	۴۵	۸	۳۸	۳/۶۱
ششم	۵	۳۰	۸	۴۸	۳/۴۳

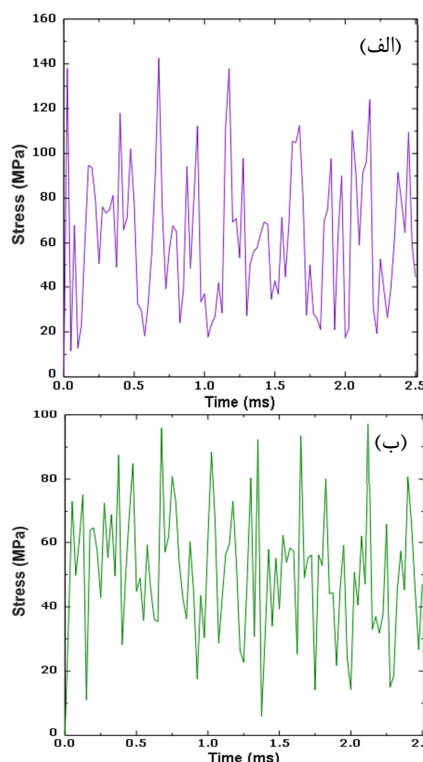
۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، نمونه‌ای از فوم آلومینیومی تولید شده در جهاد دانشگاهی مشهد به صورت فوم ضربه‌پذیر له شونده در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مدل‌سازی شد. سپس برای بررسی تأثیر حضور فوم در جذب انرژی، فوم مذکور در چندین ساختار چندلایه محافظتی قرار داده شد. تنش‌های حاصل از برخورد پرتابه‌ای که با سرعت ۴۵۰ متر بر ثانیه به این ساختارها برخورد می‌کند، بررسی گردید. همچنین برای مدل‌سازی برخوردهای با سرعت بالا از مدل آسیب جانسون-کوک برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک در فولاد و پرتابه استفاده گردید. نتایج زیر از مطالعه حاضر بدست آمده‌اند:

- ۱- تحلیل المان محدود با دقت مناسبی توانایی پیش‌بینی رفتار فشاری فوم‌های فلزی را دارد. نتایج حاصل از بارگذاری فشاری نمونه مدل‌سازی شده با نتایج تجربی مقایسه گردید و مشاهده شد که نتایج با دقت مناسبی به یکدیگر نزدیک می‌باشند.
- ۲- لایه‌ای از فوم آلومینیومی در یک پیکربندی چندلایه محافظتی توانست نقش مهمی در کاهش تنش‌ها و همچنین کاهش احتمال شکست در لایه انتهایی (سرامیک) ایفا کند.

در پیکربندی‌های سوم و چهارم به ترتیب از لایه‌های فولادی و سپس لایه‌های سرامیکی با ضخامتی به اندازه ضخامت لایه فوم آلومینیومی موجود در پیکربندی دوم (۶۵ میلی‌متر) استفاده شده است. البته توجه داریم که این افزایش ضخامت لایه فولادی و سرامیکی، باعث افزایش جرم ۶ و ۳/۳ برابری پیکربندی‌های سوم و چهارم نسبت به پیکربندی دوم می‌شود.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، لایه‌های فولادی و سرامیکی با همان ضخامت فوم آلومینیومی نیز نتوانستند تنش‌های اعمالی به المان انتهایی را به خوبی فوم آلومینیومی جذب کند و نمودارها دارای نوسانات شدیدی نیز می‌باشند که دلیل این نوسانات ارتعاش آزاد صفحه فولادی بدلیل جرم بالای آن است. همچنین افزایش ضخامت این لایه‌ها افزایش جرم قابل توجهی به ساختارها تحمیل کرده است.



شکل ۷- تنش میزز - زمان المان انتهایی لایه سرامیکی در (الف) پیکربندی سوم (ب) پیکربندی چهارم

در پیکربندی‌های پنجم و ششم ضخامت لایه فوم آلومینیومی به ترتیب ۴۵ و ۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۸ مشاهده می‌شود که بیشینه تنش در این پیکربندی‌ها به ترتیب ۳۸ و ۴۸ مگاپاسکال است که از تنش‌های به دست آمده در پیکربندی‌های سوم و چهارم کمتر می‌باشد.

[۱۰] حصارى رضا، مطالعه روش‌های ساخت و مدل‌سازی اجزاء محدود فوم‌های فلزی. پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۳.

- [11] Yan W., Durif E., Yamada Y., Wen C. Crushing Simulation of Foam-Filled Aluminum Tubes. *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 7, pp. 1901 to 1906, 2007.
- [12] SIMULIA, Abaqus Analysis User's Manual. Providence RI: Dassault Systemes, 2012.
- [13] Panigrahi, S.K., Das, K., Ballistic impact analyses of triangular corrugated plates filled with foam core, *Advances in Computational Design*, Vol. 1, No. 2, pp. 139-154, 2016.

۳- لایه‌ای از فوم آلومینیومی توانست باعث میرا شدن تنش‌های اعمالی به لایه سرامیکی گردد در حالیکه در سایر پیکربندی‌ها، نواسانات شدیدی در تنش‌های اعمالی به لایه سرامیکی مشاهده می‌شود.

۴- بیشینه تنش‌ها در ساختاری چندلایه با لایه‌ای فولادی با ضخامت ۶۵ میلی‌متر و در ساختاری با لایه‌ای سرامیکی با همین ضخامت در مقایسه با ساختاری دارای فوم آلومینیومی با ضخامت مذکور، بسیار بیشتر می‌باشد، همچنین وزن ساختار با فوم آلومینیومی بسیار کمتر از ساختارهای دیگر می‌باشد.

۵- کاهش ضخامت لایه فوم آلومینیومی از ۴۵ میلی‌متر به ۳۰ میلی‌متر باعث افزایش تنشی به میزان ۱۰ مگاپاسکال در المان انتهایی لایه سرامیکی شد.

با توجه به اینکه در مطالعات مشابه از مدل آسیب جانسون-کوک برای مدل‌سازی رفتار پلاستیک در فولاد و حالت فوم ضربه‌پذیر له شونده برای مدل‌سازی فوم‌های فلزی استفاده شده و همچنین قابلیت جذب ضربه در فوم‌های فلزی آلومینیومی نیز به کمک روش المان محدود بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است، لذا انتظار می‌رود که استفاده از روش‌های فوق در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی برخورد با سرعت بالا مناسب بوده و نتایجی نزدیک به نتایج تجربی ارائه دهد.

۵- مراجع

- [1] Ashby M.F., Evans, A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G. *Metal foams: a design guide*. Butterworth-Heinemann, Massachusetts, Boston, 2000.
- [2] Vanichayangkuranont T., Maneeratana K., Chollacoop N., Numerical Simulations of Level 3A Ballistic Impact on Ceramic/Steel Armor. *The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2006.
- [3] Pechoucek P., Rolc, S., Buchar J. Fragment Simulating Projectile Penetration into Layered Targets. *Engineering Mechanics*, Vol. 18, No. 5/6, pp. 353-361, 2011.
- [4] Flis L., Numerical Simulation of Ballistic Impact on 10GHMBA Steel Armor, *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, pp. 23-32, 2010.
- [5] Gama B.A., Bogetti T.A., Fink B.K., Yu C.J., Claar T.D., Eifert H.H., Gallespie Jr. J.W. Aluminum Foam Integral Armor: A New Dimension in Armor Design. *Composite Structures* 52, Vol. 52, pp. 381-395, 2001.
- [6] Moo Ryu K., Young An, J., Cho W. S., Yoo Y. C., Kim H. S. Mechanical Modeling of Al-Mg Alloy Open-Cell Foams, *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 3, pp. 622- 625, 2005.
- [7] Tita V., Caliri Junior M. F., Numerical Simulation of Anisotropic Polymeric Foams, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 9, pp. 259 – 279, 2012.
- [8] Abravi M.S., Malekjafarian M., Golestanipour M., Amini Mashhadi H., Sadmezhaad S.K. Investigation of SiC and CaCO₃ on Compressive Properties of Aluminum Foam. *7th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*, pp. 189-194, 2011.
- [9] Yu C.J., Eifert H.H., Hall I.W., Franz R., Leighton K. Feasibility Study on Deformation Energy Absorption of Metal Foams at High Strain Rates, Fraunhofer Resource Center, Newark, Delaware, USA, 1998.