

مدلسازی فوم آلومینیومی به منظور استفاده در بدنه خودرو جهت جذب انرژی در تصادفات

رضا حصاری

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، rh_hesari@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۵

چکیده

امروزه با توجه به وقوع تصادفات رانندگی و تلفات مالی و جانی حاصل از آن، خودروسازان سعی دارند تا به روش‌های گوناگون میزان این خسارت‌ها را کاهش دهند. یکی از راه‌کارهای پیشنهادی، استفاده از فوم‌های فلزی در نقاط مختلف خودرو جهت جذب انرژی وارده در تصادفات است؛ زیرا این فوم‌ها نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت جذب ضربه و انرژی زیادی دارند. در مطالعه حاضر، برخورد قطعه‌ای فولادی به لایه‌ای از فوم آلومینیومی تولید داخل مدلسازی شده تا توانایی نمونه‌ای از این فوم‌ها در جذب انرژی حاصل از برخورد مورد بررسی قرار گیرد. این فوم به صورت فوم ضربه‌پذیر له‌شونده در نرم‌افزار تجاری آباکوس مدلسازی شده است. قطعه فولادی با سرعتی معادل ۶۴ کیلومتر بر ساعت به فوم برخورد می‌کند. در پایان مشاهده می‌شود که لایه فوم آلومینیومی با جرمی حدود ۱ کیلوگرم توانسته است بیش از ۹۹/۹۹ درصد از انرژی برخورد (۳/۸۶ کیلوژول) را جذب نماید. بنابراین انتظار می‌رود استفاده از این فوم‌ها در نقاط مختلف خودرو سبب کاهش خسارت‌های جانی و مالی در تصادفات شود.

واژگان کلیدی: فوم فلزی آلومینیومی، جذب انرژی، خودرو، فوم ضربه‌پذیر له‌شونده، المان محدود

۱. مقدمه

زمینه سازه‌های سبک بسیار مورد توجه خودروسازان قرار گرفته است؛ به گونه‌ای که یکی از برنامه‌های اصلی و کلیدی آنها جهت دسترسی به میزان مصرف سوخت هدف‌گذاری شده (۳ لیتر در هر ۱۰۰ کیلومتر)، استفاده و توسعه کاربرد مواد سبک در خودروهاست [۲]. خودرو باید به گونه‌ای طراحی و ساخته شود که جنس مواد به کار رفته در آن، ضربه وارده به قسمت‌های مختلف بدن را کاهش دهد. قسمت جلو خودرو نیز باید به صورتی طراحی شود که هنگام تصادف با جمع‌شدن قطعات جلو، کمترین صدمه را به اتاق خودرو وارد کند تا شدت ضربه به حداقل مقدار ممکن برسد [۱]. در دهه‌های اخیر، دسته‌ای از فلزات سلولی، به نام

در ایران، حوادث رانندگی سالهاست که آمار قابل توجه و قابل تأملی را به خود اختصاص داده است. آمارهای مربوط به تعداد کشته‌شدگان تصادفات رانندگی نشان می‌دهد سالانه در حدود ۸۰۰۰۰۰ تصادف در سراسر جاده‌های ایران رخ می‌دهد. آمار بیانگر آن است که به طور متوسط هر ۲۰ دقیقه، جان یک انسان در حوادث جاده‌ای گرفته می‌شود و ۳۴ نفر به شدت مجروح می‌شوند یا به عبارتی، صرف‌نظر از تعداد مجروحان و آسیب‌دیدگان تصادفات رانندگی، روزانه ۷۲ نفر در جاده‌های کشور کشته می‌شوند [۱]. با توجه به سیاست‌گذاری جدید کشورهای توسعه‌یافته به منظور کاهش وزن خودرو، تحقیق در

فوم مذکور را تحت بارگذاری فشاری بررسی کنند [۶]. آنها نتایج حاصل از این مدلسازی را با نتایج نمونه آزمایشگاهی مقایسه کردند و دریافتند که تحلیل المان محدود همراه با حالت فوم ضربه‌پذیر له‌شونده توانایی بالایی در مدلسازی و پیش‌بینی رفتار فوم‌های فلزی دارند.

۲. خواص فوم‌های فلزی

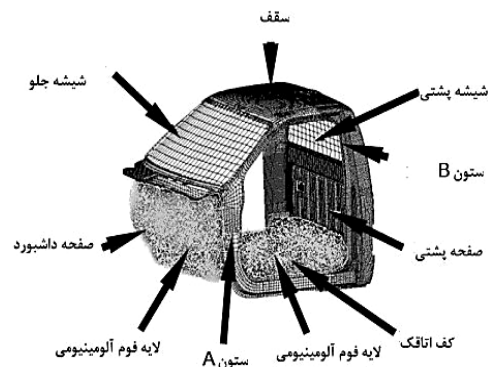
فوم‌های فلزی نسبت به ماده پایه‌ای که از آن ساخته شده‌اند، در جذب انرژی بهتر عمل می‌کنند. همچنین سبکتر از فلز پایه خود هستند. یک جاذب مناسب در برخوردها و ضربات باید انرژی جنبشی وارده را جذب کند، بدون اینکه وارد کرنش تراکم^۳ (ناحیه فروپاشی) شود. گفتنی است چنانچه تنش اعمالی به فوم از حد مجاز عبور نماید، فوم وارد ناحیه پلاستیک خواهد شد و این پلاستیسیته پس از ایجاد تغییر شکل و فروپاشی در هر سلول رخ می‌دهد. لذا به دلیل ساختار شبکه‌ای در فوم، هر سلول هم انرژی وارده را تا سرحد ممکن جذب می‌کند و هم آن را به سلول‌های مجاور خود انتقال می‌دهد [۳]. با بررسی نمودار تنش - کرنش یک فوم فلزی می‌توان به صورت دقیق‌تر با رفتار این مواد آشنا شد. با توجه به شکل ۲ 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 هم خطی است. ناحیه دوم که نمودار تقریباً مسطح بوده و بیشترین میزان جذب انرژی در این ناحیه صورت می‌گیرد که ناحیه تنش پایا^۴ نام دارد و ناحیه سوم زمانی است که میزان کرنش در فوم به حد فروپاشی در سلول‌ها می‌رسد که همان ناحیه فروپاشی است [۷].



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش در فوم‌های فلزی [۳]

فوم‌های فلزی با توجه به مقاومت فشاری بالا و رفتار تغییر شکل غیرخطی، در تغییر شکل‌های به سمت داخل بسیار مناسب

فوم‌های فلزی با خواص جدید مطرح شده‌اند و جذابیت بسیاری یافته‌اند. از جمله خواص مهم فوم‌های فلزی، چگالی کم در عین سفتی بالاست. این مواد برای ساختارهای سبک، جذب انرژی و مدیریت حرارتی پیشنهاد می‌شوند. این مواد متخلخل فلزی، غیرسمی و قابل بازیافت نیز می‌باشند. از جمله کاربردهای عمده فوم‌های فلزی در صنایع خودروسازی است. استفاده از آنها در نواحی آسیب‌پذیر خودرو، به دلیل خاصیت جذب انرژی بالا در تنش‌های فشاری می‌تواند سبب کاهش خسارت‌های جانی و مالی گردد. خواص فوم‌های فلزی و ساختارهای فلزی حفره‌دار به خواص فلز پایه، چگالی نسبی^۱ (نسبت چگالی فوم فلزی به فلز پایه) و ریخت‌شناسی حفره‌ها (باز یا بسته‌بودن حفره‌ها، اندازه حفره‌ها و جز این‌ها) نیز بستگی دارد [۳]. در شکل ۱ نمونه‌ای از پیشنهاد‌های قابل استفاده در ارتباط با به‌کارگیری فوم‌های آلومینیومی در اتاقک خودرو نمایش داده شده است [۴].



شکل ۱. استفاده از لایه‌های فوم آلومینیومی در اتاقک خودرو

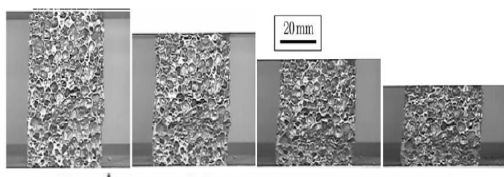
جهت جذب بهتر انرژی در تصادفات [۴]

در سال‌های اخیر، مطالعات و آزمایشات گسترده‌ای درباره این مواد انجام شده است، به عنوان نمونه گاما و همکاران (۲۰۰۱) در پژوهشی چندین ساختار محافظتی را بررسی کردند که در برخی از آنها از فوم فلزی آلومینیومی برای بررسی جذب انرژی آن در ساختارها استفاده شده است [۵]. آنها نتایج حاصل از مدلسازی ساختارها و نتایج تجربی را با هم مقایسه کرده و به این نتیجه رسیدند که ساختار سلولی و متخلخل فوم‌های آلومینیومی سبب پراکندگی امواج تنش درون فوم و جذب انرژی می‌شود. موریو و همکاران نیز (۲۰۰۵) در پژوهش خود یک فوم آلیاژی آلومینیومی - منیزی سلول باز را به صورت فوم ضربه‌پذیر له‌شونده^۲ در نرم‌افزار آباکوس مدلسازی کردند تا رفتار

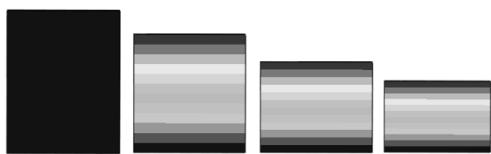
فوم مورد استفاده برای مدلسازی در مطالعه حاضر دارای چگالی نسبی ۰/۱۶ است. در مدلسازی این فوم از حالت فوم ضربه‌پذیر له‌شونده استفاده شده است که در آن نسبت پواسون پلاستیک فوم^۵ (ν_p) برای فوم‌های فلزی عموماً معادل صفر در نظر گرفته می‌شود که با توجه به این عدد، نسبت تنش تسلیم فشاری فوم^۶ به کمک رابطه ۱ مقدار ۱/۷۳ به دست می‌آید [۹].

$$K = \sqrt{3(1-2\nu_p)} \quad (1)$$

در این مقاله، فوم مدلسازی شده با ابعاد ۴۰×۳۰×۳۰ میلی‌متر تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری قرار گرفته است. در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تغییر شکل‌های نمونه واقعی و نمونه مدلسازی شده تحت بارگذاری فشاری در کرنش‌های مختلف مشاهده می‌شوند.



شکل ۳. تغییر شکل نمونه واقعی فوم در کرنش‌های مختلف [۸]



شکل ۴. تغییر شکل نمونه مدلسازی شده فوم آلومینیومی در کرنش‌های مختلف

با توجه به خواص بیان شده، مدل المان محدودی مدلسازی و تحت کرنش فشاری قرار داده شده است. پانیکراهی و داس (۲۰۱۶) با توجه نمودار تنش - کرنش فوم آلومینیومی تحت بارگذاری تک‌محوری فشاری، فوم مورد نظر خود را مدلسازی کرده و در ساختاری تحت برخورد با سرعت بالا مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰]؛ لذا در این مقاله نیز از نمودار تنش - کرنش فوم تحت بارگذاری تک‌محوری فشاری استفاده شده است و نتایج مدلسازی با نتایج تجربی مرجع [۸] مقایسه شده است (شکل ۵).

۴. مدلسازی

به منظور بررسی میزان جذب انرژی، یک نمونه فوم فلزی آلومینیومی با مشخصات مذکور و با ابعاد ۲۰۰×۲۰۰×۵۸

عمل می‌کنند. این فوم‌ها می‌توانند آثار ناشی از برخورد را کم کنند و یا به طور کامل جذب نمایند. سازوکار جذب انرژی در فوم‌ها بدین گونه است که انرژی ناشی از برخورد ابتدا ناحیه جلویی فوم را مورد هدف قرار می‌دهد و سبب متراکم شدن فوم می‌شود. در این مرحله برخی از دیواره‌های سلول‌های تشکیل‌دهنده فوم دچار تغییر شکل و گسیختگی و پارگی می‌شوند، اما چون این دیواره‌ها در یک ساختار شبکه‌ای در کنار هم و متصل به هم قرار گرفته‌اند، انرژی را به سلول‌های مجاور منتقل می‌کنند که این عامل سبب می‌شود تنش در مسیرهای مختلف پخش گردد و فقط در مسیر اعمال نیرو نباشد [۷]. این نوع گسترش انرژی باعث کاهش تغییر شکل‌های ناشی از برخورد و جلوگیری و کاهش صدمه دیدن افراد و یا سایر قسمت‌ها و تجهیزات خودرو می‌شود. با توجه به این موضوع که هر خودرویی فضاهای منحصر به فردی در بدنه خود دارد، ابعاد به کار رفته در این پژوهش قابلیت تغییر دارند تا متناسب با فضا و اهداف مورد استفاده در قسمت‌های مختلف خودرو به کار روند.

آنچه در اینجا مقصود است، بررسی توانایی نمونه‌ای از فوم فلزی آلومینیومی تولید داخل برای مقاصد جذب انرژی در فضاهای مختلف خودروها است. با توجه به اینکه این فوم‌ها در سال‌های اخیر به صورت بومی نیز تولید می‌گردند، لذا استفاده از آنها در صنعت خودروسازی می‌تواند علاوه بر رونق بخشیدن به تولید داخل، باعث افزایش ایمنی خودروهای ساخت داخل شده و تلفات انسانی و حتی مالی (صدمات وارده بر خودروها) را نیز کاهش دهد.

۳. اعتبارسنجی

در مطالعه حاضر، از مشخصات فوم آلومینیومی به کار رفته در پژوهش آبروی و همکاران (۲۰۱۱) استفاده شده است [۸]؛ این ویژگی‌ها در جدول ۱ آمده است.

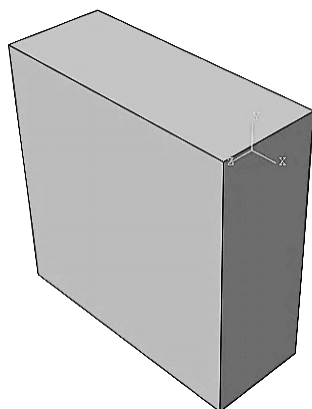
جدول ۱. خواص مکانیکی فوم آلومینیومی

ساختار	سلول بسته
مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	۰/۵۳
نسبت پواسان	۰/۳
چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۴۳۲
تنش تسلیم (مگاپاسکال)	۲/۲
کرنش تراکم	۸۰ درصد

آمده است. با توجه به رابطه ۲، جرم قطعه فولادی ۲۴/۳۹۷ کیلوگرم خواهد بود. این قطعه با سرعت ۱۷/۷۷ متر بر ثانیه (۶۴ کیلومتر بر ساعت) به فوم برخورد می‌کند. سرعت برخورد برابر با یکی از مقادیر سرعت آزمون تصادف^۷ به‌هنگام برخورد خودرو با مانع از روبرو در نظر گرفته شده است [۱۲]. انرژی وارده توسط این قطعه به فوم فلزی از رابطه ۳ محاسبه خواهد شد [۳].

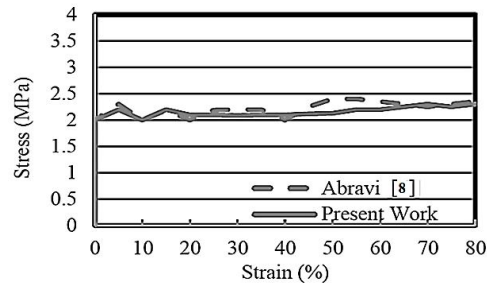
$$U = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

که در آن m جرم قطعه، v سرعت قطعه و U انرژی جنبشی آن است که معادل ۳۸۵۱/۹۵ ژول (۳/۸۵ کیلوژول) خواهد شد. به‌عنوان مثال یک خودروی سواری با جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم و با سرعت ۶۴ کیلومتر بر ساعت، طبق رابطه ۳ انرژی جنبشی معادل ۲۳۵ کیلوژول خواهد داشت؛ اما باید توجه داشت که سایر قطعات خودرو نیز در کاهش انرژی اعمالی تصادفات به انسان نقش مهمی دارند و لذا فوم به‌عنوان عاملی کمکی برای سایر قطعات خودرو جهت کاهش میزان انرژی وارده تلقی می‌شود و آنچه در این مطالعه بررسی شده، فقط توانایی فوم فلزی آلومینیومی برای جذب انرژی در تصادفات است، اما در واقعیت سایر قطعات خودرو نیز هر یک بخشی از انرژی را جذب می‌نمایند. برای جذب انرژی بیشتر می‌توان با توجه به فضاهای در دسترس، ضخامت فوم را افزایش داد یا از فومی با چگالی نسبی بیشتر استفاده نمود. همچنین می‌توان از فوم برای پرکردن ساختارهای توخالی استفاده کرد که این مسئله توانایی جذب انرژی توسط فوم‌های آلومینیومی را به‌صورت قابل توجهی افزایش می‌دهد [۴].



شکل ۷. مدل‌سازی قطعه فولادی

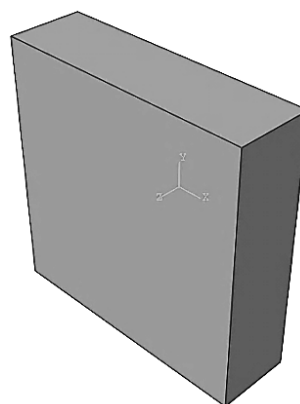
میلی‌متر، همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در نرم‌افزار تجاری آباکوس مدل‌سازی شده است. با توجه به ابعاد فوم که در بالا بیان شد و همچنین چگالی آن که در جدول ۱ آمده است، جرم فوم با استفاده از رابطه ۲ به‌دست خواهد آمد [۳].



شکل ۵. مقایسه نمودار تنش- کرنش فوم آلومینیومی مدل‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی (چگالی نسبی ۰/۱۶)

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی فوم و معادل ۴۳۲ کیلوگرم بر متر مکعب و V حجم فوم و معادل ۰/۰۰۲۳۲ متر مکعب می‌باشد و در نهایت m جرم فوم است که مقدار ۱/۰۰۲ کیلوگرم به‌دست خواهد آمد. برای بررسی انرژی برخورد، از یک قطعه فولادی به‌شکل مکعب مستطیل استفاده شده تا بخشی از انرژی وارده به فوم فلزی به‌هنگام تصادف را شبیه‌سازی نماید. ابعاد این قطعه ۲۰۰×۲۰۰×۷۷/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که در شکل ۷ مشاهده می‌شود. این قطعه به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده تا سطح آن به‌هنگام برخورد کاملاً با تمامی سطح فوم آلومینیومی برخورد نماید. مشخصات مکانیکی قطعه فولادی نیز در جدول ۲

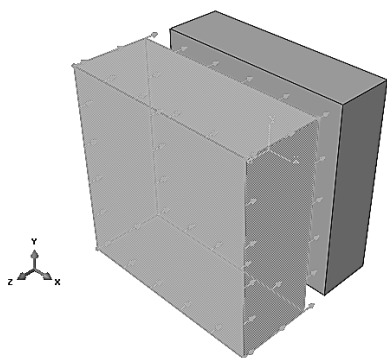


شکل ۶. مدل‌سازی فوم آلومینیومی

جدول ۲. خواص مکانیکی فولاد [۱۱]

۷۸۷۰	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)
۲۰۰	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)
۰/۳۳	نسبت پواسان
۲۵۰	تنش تسلیم (مگاپاسکال)

آلومینیومی ۳۷۵۰۰ المان است. حرکت فقط در جهت خلاف راستای محور Z صورت می‌گیرد و در بقیه جهات مقید شده است. نوع تماس دو قطعه از نوع برخورد سخت^۹ در نظر گرفته شده و برخورد نیز دینامیکی^{۱۰} تحلیل شده است. فوم به صورت فوم ضربه‌پذیر له‌شونده با سخت شونده‌گی همسانگرد^{۱۱} مدلسازی شده است [۱۳]. در شکل ۹ نمایی از دو قطعه مشاهده می‌شود که در آن قطعه فولادی در خلاف جهت محور Z با سرعت ذکرشده به سمت فوم در حرکت است. حرکت قطعه و فوم در سایر جهات محدود شده تا برخورد در راستای مورد نظر به صورت کامل انجام گیرد.



شکل ۹. جهت حرکت قطعه فولادی قبل از برخورد به فوم آلومینیومی

خلاف جهت محور Z برای قطعه فولادی نیز مقدار ۱۷/۷ متر بر ثانیه است. پس از انجام برخورد، فوم دچار تغییر شکل شده و به سمت داخل فشرده می‌شود. در این فشرده‌گی سلول‌های فوم، انرژی را جذب نموده و همچنین آن را به سلول‌های اطراف خود نیز انتقال می‌دهند که این موضوع عامل اصلی جذب مناسب انرژی در فوم‌ها حتی با توجه به وزن سبک آنهاست. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، تنش در برخی نقاط فوم از مقدار تنش تسلیم آن (۲/۲ مگاپاسکال) فراتر رفته که می‌توان گفت این سلول‌ها دچار فروپاشی شده و وارد ناحیه سوم نمودار تنش - کرنش شده‌اند.

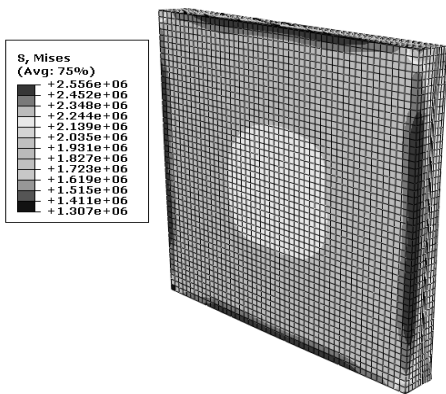
در شکل ۸ نمونه‌هایی از ساختارهای پرشده توسط فوم فلزی مشاهده می‌شود. نوع المان در لایه‌ها تنش سه‌بعدی استاندارد^{۱۲} (C3D8R) در نظر گرفته شده است. همچنین با انجام بررسی‌های مختلف اندازه مناسب مش برای هر دو قطعه مقدار ۴ میلی‌متر به دست آمده که این اندازه نتایج همگرایی را ارائه خواهد. دلیل یکسان در نظر گرفتن مش برای هر دو قطعه این است که با توجه به اندازه و شکل یکسان قطعات، نقاط مش‌ها متقارن بر هم خواهد بود و در تغییر شکل‌های بزرگ نتایج دقیق‌تری ارائه داده و زمان محاسبه را نیز کاهش می‌دهد [۱۰]. تعداد المان‌ها در لایه فولادی ۴۷۵۰۰ المان و در لایه فوم



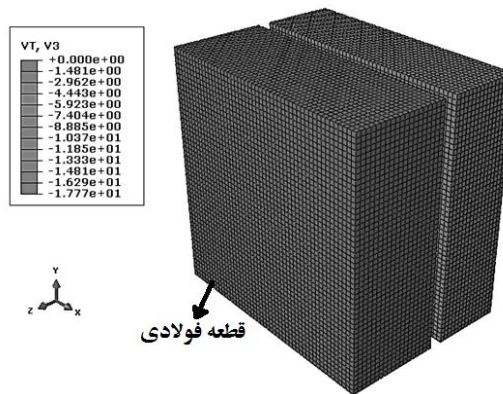
شکل ۸. نمونه ای از قطعات پرشده با فوم فلزی [۴]

۵. بحث و نتایج

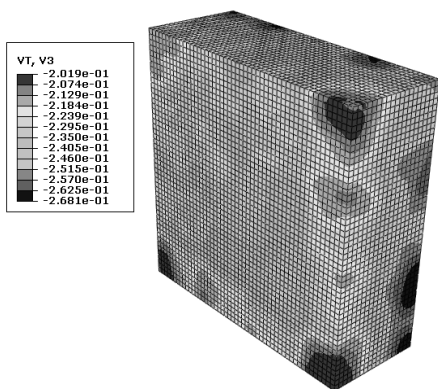
برای بررسی میزان و چگونگی جذب انرژی در فوم فلزی آلومینیومی از سرعت المان‌های مختلف قطعه فولادی در انتهای زمان برخورد استفاده می‌شود. به این صورت که با آگاه بودن از جرم قطعه و سرعت نهایی آن پس از برخورد، میزان انرژی جنبشی آن محاسبه خواهد شد؛ لذا می‌توان بررسی کرد که آیا انرژی برخورد قطعه فولادی توسط لایه فومی به صورت کامل جذب شده است یا نه؟ همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، فوم آلومینیومی چون هنوز ساکن است و برخوردی با آن صورت نگرفته، بدون سرعت است و مقدار عددی سرعت در



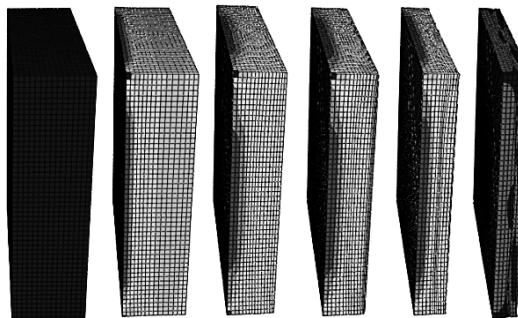
شکل ۱۱. توزیع تنش در فوم آلومینیومی
پس از برخورد قطعه فولادی



شکل ۱۰. سرعت قطعه فولادی و فوم آلومینیومی قبل از برخورد
(در خلاف جهت محور Z)



شکل ۱۳. سرعت در المان های مختلف قطعه فولادی
در انتهای زمان برخورد (در خلاف جهت محور Z)



شکل ۱۲. تغییر شکل فوم آلومینیومی
پس از برخورد قطعه فولادی

برخورد توسط نرم افزار آباکوس نیز اندازه گیری می شود که همان طور که در شکل ۱۴ مشاهده می گردد، میزان انرژی جنبشی در انتهای بازه زمانی مد نظر به 0.72 ژول رسیده است که با تقریب خوبی نزدیک به محاسبات انرژی جنبشی از طریق سرعت المان ها می باشد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، برخورد یک قطعه فولادی به جرم $24/397$ کیلوگرم و با سرعت $17/77$ متر بر ثانیه (64 کیلومتر بر ساعت) به یک لایه فوم فلزی آلومینیومی با جرم تقریبی 1 کیلوگرم بررسی شد تا توانایی فوم آلومینیومی مذکور تحلیل گردد. این فوم به صورت ضربه پذیر له شونده در نرم افزار المان محدود آباکوس مدل سازی و قطعه فولادی به آن برخورد کرده است. نتایج زیر از این مدل سازی حاصل شده است:

در شکل ۱۲ نیز تغییر شکل فوم آلومینیومی پس از برخورد مشاهده می شود که فشردگی قسمت میانی آن به دلیل فروپاشی سلول ها پس از رسیدن به تنش تسلیم مشهود است. برای بررسی میزان جذب انرژی توسط فوم، می توان انرژی باقیمانده در قطعه فولادی را محاسبه کرد. در شکل ۱۳ سرعت المان های مختلف قطعه فولادی در خلاف جهت محور Z مشاهده می شود که سرعت در این المان ها تقریباً در محدوده 0.2 تا 0.27 متر بر ثانیه می باشد، لذا با توجه به جرم قطعه فولادی و رابطه ۳، مشاهده می شود که میزان انرژی جنبشی این قطعه تقریباً در بازه 0.5 الی 0.88 ژول می باشد. با توجه به مقدار انرژی اولیه این قطعه قبل از برخورد می توان دریافت که فوم آلومینیومی با جرم تقریبی 1 کیلوگرم توانسته است که بیش از $99/99$ درصد از انرژی برخورد اولیه قطعه فولادی ($3851/95$ ژول) را به خوبی جذب نماید. گفتنی است میزان انرژی کل و انرژی جنبشی در

فوم فلزی آلومینیومی بیش از ۹۹/۹۹ درصد از انرژی وارده توسط قطعه فولادی (۳/۸۵ کیلوژول) را جذب نمود؛ در حالی که این لایه فوم جرم ناچیزی دارد و برای استفاده در خودرو به دلیل سبکی آن افزایش جرم چشمگیری در جرم خودرو رخ نخواهد داد. استفاده از فوم‌های آلومینیومی با چگالی بیشتر یا ابعاد بزرگتر در نواحی مختلف خودرو، با افزایش جرمی اندک می‌تواند عاملی مؤثر در جذب هرچه بهتر انرژی تصادفات به حساب آید. چنانچه بتوان از فوم فلزی برای پرکردن برخی ساختارهای موجود در خودرو استفاده کرد، می‌توان انتظار داشت میزان جذب انرژی در این ساختارها به‌طور چشمگیری افزایش یابد. با توجه به اینکه فوم‌های فلزی غیرسمی و قابل بازیافت می‌باشند، لذا در

صورت وقوع تصادف می‌توان آنها را نیز همانند سایر قطعات خودرو تعویض نمود و فوم‌های آسیب‌دیده را بازیافت و دوباره از آنها استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود جذب انرژی در ساختارهای پر شده با فوم فلزی مورد بررسی دقیق‌تر قرار گیرد، همچنین رابطه افزایش چگالی نسبی فوم با میزان جذب انرژی آن نیز می‌تواند موضوعی قابل بررسی باشد. با توجه به اینکه ساخت فوم‌های فلزی آلومینیومی در چند سال اخیر آغاز شده، لذا با افزایش تولید این ماده و استفاده از آن در نواحی مناسب خودرو در قبال افزایش وزن اندک (و احتمالاً افزایش مصرف سوخت) در خودروهای تولید داخل، می‌توان شاهد ایمن‌تر شدن این خودروها بود.

Step	Increment	Total Time	CPU Time	Step Time	Stable Time Inc	Kinetic Energy	Total Energy
1	424	0.000230057	15.4	0.000230057	5.5147e-07	3851.95	3851.95
1	841	0.000460016	30.2	0.000460016	5.51469e-07	3851.95	3851.95
1	1264	0.000690281	45.6	0.000690281	5.29199e-07	3748.78	3851.91
1	1699	0.000920494	63.1	0.000920494	5.29199e-07	3417.03	3851.98
1	2133	0.00115018	80.5	0.00115018	5.29199e-07	3103.28	3852.02
1	2568	0.00138039	97.7	0.00138039	5.29199e-07	2804.19	3852.06
1	3002	0.00161007	115.1	0.00161007	5.29199e-07	2519.78	3852.09
1	3437	0.00184029	132.4	0.00184029	5.29199e-07	2247.39	3852.12
1	3872	0.0020705	149.6	0.0020705	5.29199e-07	1988.9	3852.15
1	4306	0.00230018	167	0.00230018	5.29199e-07	1745.32	3852.19
1	4741	0.00253039	184.1	0.00253039	5.29199e-07	1515.45	3852.22
1	5175	0.00276008	201.3	0.00276008	5.29199e-07	1300.61	3852.26
1	5610	0.00299029	218.6	0.00299029	5.29199e-07	1100.3	3852.3
1	6045	0.0032205	236	0.0032205	5.29199e-07	915.657	3852.33
1	6518	0.00345042	255.1	0.00345042	4.23002e-07	747.472	3852.36
1	7119	0.00368028	278.8	0.00368028	3.48256e-07	596.032	3852.37
1	7844	0.00391	307.8	0.00391	2.91358e-07	461.638	3852.38
1	8833	0.00414009	347	0.00414009	2.21369e-07	344.031	3852.39
1	9926	0.00437002	390.1	0.00437002	2.09254e-07	243.585	3852.47
1	11028	0.00460021	433.7	0.00460021	2.09254e-07	160.164	3852.61
1	12128	0.00483017	476.1	0.00483017	2.09254e-07	94.0764	3852.74
1	13228	0.00506016	519.1	0.00506016	2.09254e-07	45.4139	3852.91
1	14328	0.00529015	561.9	0.00529015	2.09254e-07	14.2977	3853.07
1	15450	0.00552013	605.2	0.00552013	1.89695e-07	0.719657	3853.89

شکل ۱۴. روند کاهش انرژی جنبشی در قطعه فولادی پس از برخورد

۷. مآخذ

- [۱] ح. طباطبایی، نقش استانداردسازی تجهیزات ایمنی خودرو در تصادفات، مجله مهندسی مکانیک ارتعاشات، س. ۲، ش. ۴، ص. ۱۰-۷، زمستان ۱۳۹۰.
- [۲] ج. مرزبان راد، ح. خلیلی، بکارگیری پنل‌های چند لایه فلزی - کامپوزیتی در سازه و بدنه خودرو به منظور افزایش ایمنی عابر پیاده، فصلنامه مطالعات مدیریت ترافیک، س. ۵، ش. ۱۶، ص. ۳۶-۲۵، بهار ۱۳۸۹.
- [3] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, *Metal foams: a design guide*, Butterworth-Heinemann, Massachusetts, Boston, 2000.

- [4] I. Akseli, *The application of Aluminum foam for the heat and noise reduction in automobiles*, Master of Science Dissertation, Izmir Institute of Technology, Turkey, 2005.
- [5] B. A. Gama, T. A. Bogetti, B. K. Fink, C. J. Yu, T. D. Claar, H. H. Eifert, Jr. J. W. Gallespie, Aluminum Foam Integral Armor: A New Dimension In Armor Design, *Composite Structures*, Vol. 52, pp. 381-395. 2001.
- [6] K. Moo Ryu, J. Young An, W. S. Cho, Y. C. Yoo, H. S. Kim, Mechanical Modeling of Al-Mg Alloy Open-Cell Foams, *Materials Transactions*, Vol. 46, No. 3, pp. 622- 625, 2005.
- [7] ر. حصاری، مطالعه روش‌های ساخت و مدلسازی اجزاء محدود فوم‌های فلزی، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، ۱۳۹۳.
- [8] M. S. Abravi, M. Malekjafarian, M. Golestanipour, H. Amini Mashhadi, S. K.Sadrnezhaad, *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] SIMULIA. *Abaqus Analysis User's Manual*. Providence, RI: Dassault Systemes, 2012.
- [10] S. K. Panigrahi, K. Das, Ballistic impact analyses of triangular corrugated plates fille with foam core, *Advances in Computational Design*, Vol. 1, No. 2, pp. 139-154, 2016.
- [11] T. Vanichayangkuranont, K. Maneeratana, N. Chollacoop, *Numerical Simulations of Level 3A Ballistic Impact on Ceramic/Steel Armor*, The 20th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2006.
- [12] S. Hoffenson, M. P. Reed, Y. Kaewbaidhoon, P. Y. Papalambros, On the impact of the regulatory frontal crash test speed on optimal vehicle design and road traffic injuries, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 63, No. 1, pp. 39-60, 2013.
- [13] W. Yan, E. Durif, Y. Yamada, C. Wen, Crushing Simulation of Foam-Filled Aluminum Tubes, *Materials Transactions*, Vol. 48, No. 7, pp. 1901-1906, 2007.

پی‌نوشت

-
1. relative density
 2. crushable foam
 3. densification strain
 4. Plateau
 5. plastic Poisson's ratio
 6. compression yield stress ratio
 7. crash test
 8. 3D stress (Standard- Hexahedral Linear)
 9. hard contact
 10. explicit, dynamic
 11. crushable foam with isotropic hardening (CIH)