

# تحلیل عددی فوم‌های فولادی و آلومینیومی تحت بارگذاری محوری ضربه‌ای

سینا جبارزاده<sup>۱</sup>، امیر نجیبی<sup>۲</sup> و\* حمید عامری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

\*مسئول مکاتبات: a.najibi@semnan.ac.ir

## ◀ واژگان کلیدی

جاذب انرژی  
ضربه  
ایمنی سازه  
فوم ترکیبی  
تحلیل عددی  
روش اجزا محدود

## ◀ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶

## ▶ چکیده

جاذب‌های انرژی کاربردهای مختلفی در خودروها، صنایع نظامی، کشتی‌ها، قطارها، صنایع هوافضا و غیره دارند. در سال‌های اخیر، با توسعه علم و فناوری جاذب‌های مختلفی اختراع شده‌اند که برای تحمل ضربات و برای اطمینان از ایمنی سازه‌ها در مقابل ضربات مورد استفاده قرار می‌گیرند. در میان جاذب‌ها، فوم‌ها دارای مزایای قابل توجهی از جمله وزن سبک و جذب انرژی بر واحد جرم بالا هستند. فوم‌های ترکیبی در مقایسه با فوم‌های فلزی معمولی دارای قابلیت جذب انرژی بالاتری هستند؛ به همین دلیل در این مطالعه به بررسی عددی میزان جذب انرژی فوم‌های ترکیبی در سرعت بالا با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس پرداخته می‌شود. همچنین نمودار نیرو-جاب‌جایی، میزان جذب انرژی در واحد جرم، نیروی بیشینه اولیه و میانگین نیروی نمونه‌ها بررسی می‌شود. نمونه‌های مورد نظر از جنس فوم ترکیبی فولاد کم‌کربن، فوم ترکیبی آلومینیوم-۶۰۶۱ و آلومینیوم-۶۰۶۳ هستند. با توجه به نتایج، مشاهده می‌شود که میزان جذب انرژی، نیروی بیشینه و نیروی میانگین فوم ترکیبی از جنس فولاد کم‌کربن از فوم‌های ترکیبی آلومینیومی بیشتر است اما مقدار جذب انرژی در واحد جرم فوم ترکیبی آلومینیوم-۶۰۶۳ از دو نمونه تست شده بیشتر است.

## Numerically investigation of steel and aluminum foam under axial impact loading

Sina Jabbarzadeh<sup>1</sup>, Amir Najibi<sup>2</sup>, Hamid Ameri<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>3</sup> MSc, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

## ▶ Abstract

Energy absorbers have various applications in vehicles, military industries, ships, trains, aerospace industries, etc. In recent years, with the development of science and technology, multiple absorbents have been invented to absorb impact energy and ensure the safety of structures against impacts. Among absorbents, foams have significant advantages such as lightweight and high energy absorption per unit mass. Synthetic foams have a higher energy absorption capacity than conventional metal foams; For this reason, in this study, the energy absorption of synthetic foams at high-speed impact is investigated numerically using Abaqus finite element software. Also, the force-displacement diagram, the amount of energy absorption per unit mass, the initial maximum force, and the samples average force are investigated. Models are low carbon steel synthetic foam, aluminum-6061, and aluminum-6063 synthetic foam. According to the results, it is observed that the amount of energy absorption, maximum strength, and the average strength of low carbon synthetic foam is higher than aluminum synthetic foams, but the amount of energy absorption per unit mass of aluminum synthetic foam-6063 is higher than others.

## ▶ Keywords

Energy absorber  
Impact  
Safety of structure  
Synthetic foam  
Numerically investigation  
Finite element method

## ▶ Article history

Received: 10 Dec 2019

Accepted: 06 Dec 2020

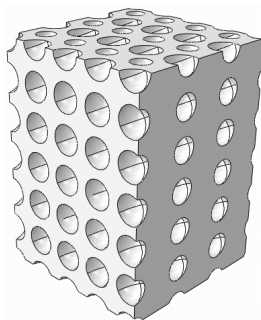
## ۱ مقدمه

محوری در حالت شبه‌استاتیک پرداختند. تأثیر هندسه، نوع ماده و پارامترهای بارگذاری بر پاسخ ضربه نیز بررسی شد. آن‌ها دریافتند که فوم باعث بهبود ظرفیت جذب انرژی در جاذب‌ها می‌شود [۶]. زارعی و کروگر (۲۰۰۸) به بهینه‌سازی جاذب‌های آلومینیومی پر شده با فوم با سطح مقطع مربعی پرداختند. تست‌ها به صورت تجربی و عددی برای نمونه‌ها انجام شد که نتایج بسیار به هم نزدیک بود. در این بررسی ارتفاع و ضخامت از جمله متغیرها در فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شده بودند و جذب انرژی در واحد جرم، جزو توابع بهینه‌سازی بود. نتایج نشان دادند که جاذب انرژی همراه با فوم جذب انرژی برابری با حالت بدون فوم دارد اما میزان جرم آن ۱۹٪ کمتر بود [۷]. وندرا و ربیعی (۲۰۰۹) به بررسی تجربی و عددی فوم فلزی کامپوزیتی برای بدست آوردن مدول الاستیسیته، پرداختند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مقایسه شد و تطابق خوبی بین آنها مشاهده شد [۸]. ژانگ و همکاران (۲۰۱۰) ویژگی‌های مکانیکی و خصوصیات جذب انرژی جاذب آلومینیومی مربعی پر شده با فوم را مورد بررسی قرار دادند.

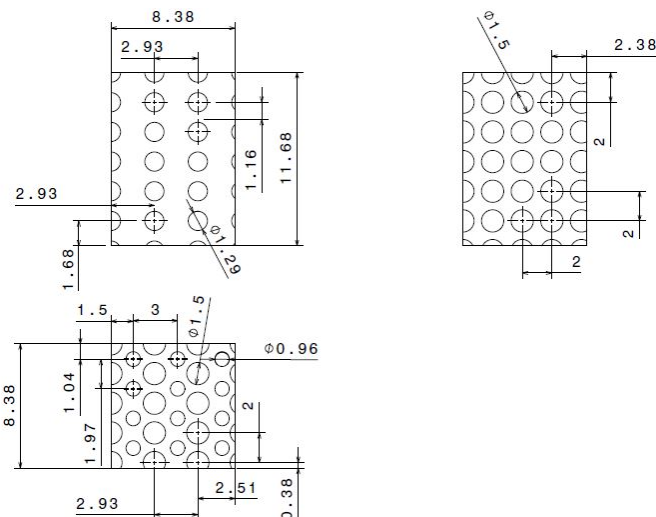
آزمایش‌ها به صورت شبه‌استاتیک انجام شده بود. آن‌ها جذب انرژی را در دو حالت طولی و عرضی انجام دادند. نتایج نشان داد که میزان جذب انرژی در حالت پر شده با فوم برابر جمع جذب انرژی در حالت جاذب بدون فوم و جذب انرژی در حالت فوم تنها بود. همچنین آن‌ها دریافتند که جذب انرژی در حالت عرضی کمتر از جذب انرژی در حالت طولی است [۹]. ملاطفی و مظفری (۲۰۱۵) به بررسی عددی رفتار پلاستیک هسته پر شده با فوم پلی اورتان را که به صورت لانه زنبوری بود، پرداختند. این تست در سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر نحوه پر کردن فوم پلی اورتان بر رفتار لانه زنبوری را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. مارور (۲۰۱۰) رفتار الاستیک فوم‌های ترکیبی را به صورت عددی و تئوری مورد بررسی قرار داد. او تأثیر پخش ذرات در فوم را با نرم افزار المان محدود در حالت سه بعدی مورد مطالعه قرار داد و همچنین مقدار مدول الاستیسیته را برای نمونه‌هایی با نحوه پخش متفاوت ذرات، بدست آورد [۱۱]. سویتا و کومار (۲۰۱۱) رفتار شبه‌استاتیک فوم ترکیبی که میکروبالن‌های آن از جنس گلس اپوکسی بود را تحت بارگذاری محوری بررسی کردند. تأثیر محتوا و حجم میکروبالن‌ها روی پاسخ مکانیکی این نوع فوم مورد مطالعه قرار گرفت [۱۲]. یو و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی خواص کششی و مکانیزم شکست کره‌های توخالی فوم‌های ترکیبی پرداختند؛ نتایج نشان داد که از دیدگاه میکرومکانیک، نقاطی که میزان میکروبالن‌ها در آن‌ها زیاد بوده، تمرکز تنش نیز در آن نواحی بیشتر است. این مسئله اثر منفی در میزان استحکام کششی و کرنشی دارد که در نهایت باعث شکست می‌شود [۱۳]. کاسترو و نات (۲۰۱۲) فوم ترکیبی از جنس فولاد و میکروبالن سرامیکی را مورد بررسی تجربی قرار دادند و میزان جذب انرژی را بررسی کردند. از پارامترهای مهم در روند ساخت این نوع فوم‌ها دمای ذوب و دمای پیش‌گرم میکروبالن‌ها قبل از اختلاط با فلز ذوب شده است [۱۴]. احمدی و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی تأثیر اندازه میکروبالن‌ها، بر خواص فشاری فوم‌های ترکیبی اپوکسی با میکروبالن سرامیکی با درصد‌های حجمی مختلف پرداختند. نتایج نشان داد که تنش حداکثری شکست، با افزایش درصد حجمی فوم ترکیبی کم می‌شود

جاذب‌های انرژی به منظور کاهش صدمه‌های ناشی از ضربه در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین تحقیقات جامع تئوری، عددی و تجربی بر روی جاذب‌های انرژی انجام شده است. جاذب‌های انرژی کاربردهای مختلفی از جمله در صنعت هوافضا و صنایع نظامی دارند و فقط به صنعت خودرو محدود نمی‌شوند. در سال‌های اخیر، یک نوع از جاذب‌های انرژی با عنوان فوم ترکیبی برای تحمل ضربات و برای اطمینان از ایمنی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. فوم‌های ترکیبی به دلیل وزن سبک و قابلیت فشرده شدن، دارای ظرفیت جذب انرژی بالا و نیروی بیشینه پایین هستند که از جنس‌های مختلفی چون آلومینیوم و فولاد ساخته می‌شوند. یکی از مزایای مهم این نوع فوم‌ها وزن کم به دلیل متخلخل بودن و وجود حفره‌ها و فضاهای خالی در داخل و روی فوم است. برای تولید فوم ترکیبی ابتدا فلز مورد نظر را در کوره ذوب می‌کنند، پس از آنکه فلز به طور کامل ذوب شد، میکروبالن‌ها را به آن اضافه می‌کنند؛ به دلیل چگالی کمتر، میکروبالن‌ها روی سطح شناور می‌شوند و در نهایت پیستونی آن‌ها را به داخل فلز ذوب شده هدایت می‌کند و میکروبالن‌ها داخل مواد مذاب غرق می‌شوند [۱]. کاسترو و نات (۲۰۱۲) به بررسی تجربی فوم‌های ترکیبی از جنس فولاد کم‌کربن و فولاد کربن متوسط پرداختند تا نمودار تنش-کرنش مربوط به آن‌ها را بدست آورند. آن‌ها همچنین به بررسی پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر روی این نوع فوم‌ها پرداختند و نتیجه گرفتند که فوم‌های ترکیبی در مقایسه با فوم‌های فلزی معمولی، توانایی فشرده شدن بالاتر و قابلیت جذب انرژی بیشتر در تنش‌های نسبتاً بالا را دارند [۱]. در مقایسه با آلیاژهای فولاد معمولی، فوم فولادی ترکیبی کاهش وزن تقریبی ۵۰٪ را نشان می‌دهد و همچنین از ظرفیت جذب انرژی ضربه در واحد حجم بالاتری برخوردار است. این ویژگی فوم‌های ترکیبی باعث شده است که گزینه مناسبی برای استفاده به عنوان زره در خودروهای نظامی باشند. همچنین این نوع فوم‌ها عملکرد فروریزش در وسایل نقلیه غیرنظامی را بهبود می‌بخشند [۱]. ردی و وال (۱۹۸۸) تأثیر فوم پلی اورتان با چگالی پایین را بر لوله جدار نازک دایره‌ای تحت بارگذاری دینامیکی و شبه‌استاتیک مورد بررسی قرار دادند. نتایج عددی در این مطالعه چگالی بهینه برای یک جاذب مناسب را تعیین کرد. همچنین نتایج عددی و تجربی تطابق قابل قبولی داشتند [۲]. سیزبرگر و همکاران (۲۰۰۰) به مطالعه تجربی جاذب استوانه‌ای آلومینیومی که با فوم پر شده بود و تحت بار شبه‌استاتیک قرار داشت پرداختند. بررسی‌ها بر روی جاذب‌های تک‌محور و هم‌محور دوتایی با سطح مقطع‌های مختلف در حالت با فوم و بدون فوم انجام شد [۳]. وانگ و همکاران (۲۰۰۶) به مطالعه تحلیلی جاذب‌های انرژی که با فوم پر شده بودند، پرداختند. تست‌ها به صورت دینامیکی انجام شد و پس از تحلیل معلوم شد که نتایج تئوری با نتایج تجربی انجام شده مطابقت خوبی دارند [۴]. احمد و تمبیراتنام (۲۰۰۸) به بررسی عددی جذب انرژی در جاذب‌های مخروطی پر شده با فوم در شرایط شبه‌استاتیک و به صورت محوری پرداختند. آنها تأثیر پارامترهایی چون ضخامت دیواره جاذب و چگالی فوم را بر روی پاسخ جذب انرژی، بررسی کردند [۵]. همچنین آن‌ها در همان سال به بررسی عددی و تجربی میزان جذب انرژی در جاذب‌های مخروطی پر شده با فوم تحت بار ضربه‌ای

پلاستیک در نرم افزار تعریف گردید. برای اعمال خواص پلاستیک فوم فولادی آلومینیوم-۶۰۶۱ از نمودار تنش- کرنش برای این فلز که توسط ژانگ و ژانگ بدست آمده بود، استفاده شد [۱۹]. به همین ترتیب برای خواص پلاستیک فوم آلومینیوم-۶۰۶۳ از نمودار تنش- کرنش بدست آمده توسط کاستاس و همکاران [۲۰] و برای فوم فولادی کم‌کربن از نمودار تنش- کرنش بدست آمده توسط فن و همکاران [۲۱] استفاده گردید؛ همچنین با توجه به اینکه تست در سرعت بالا انجام می‌شد، نرخ کرنش مرتبط با فلز مورد نظر در ماژول خصوصیات مواد وارد شد. پس از اعمال خواص در ماژول چیدمان قطعات، فوم بین صفحات قرار گرفت. برای رسیدن به جواب‌های دقیق برای تمامی نمونه‌ها شرایط بارگذاری دینامیکی به صورت کاملاً یکسان انجام شد. سرعت ضربه‌زننده ۷۰ متر بر ثانیه و به صورت ثابت در نقطه مرجع روی ضربه‌زننده قرار داده شد. زمان فروریزش ۸۳/۴ میکروثانیه بعد از چند نمونه مدل‌سازی در نظر گرفته شد. المان به‌کاررفته در نمونه‌ها از نوع جامد و نمونه‌ها به صورت شکل‌پذیر مدل شدند. نوع المان به‌کاررفته C3D10M بود و به منظور همگرایی جواب‌ها، اندازه‌های متفاوتی برای مش در نظر گرفته شد. المان‌های با اندازه کمتر از ۳/۸ دچار واگرایی شد اما برای اندازه ۳/۸ به همگرایی ختم شد. تعداد المان‌ها برای کلیه نمونه‌ها ۵۸۱۵۱ عدد بود. شکل ۳ طرح المان محدود را پس از مونتاژ شدن و مش‌زنی نشان می‌دهد. در قسمت تماس، نوع تماس بین کلیه سطوح به صورت تماس عمومی و اصطکاک بین قطعات مقدار ۰/۳ در نظر گرفته شد.



شکل ۱: فوم ترکیبی.



شکل ۲: نقشه ساخت فوم ترکیبی.

و همچنین آن‌ها دریافتند که هرچه میکروبالن‌ها بزرگ‌تر باشند، مقدار فشاری که فوم می‌تواند تحمل کند، کمتر است [۱۵]. همچنین آن‌ها تأثیر پارامترهای ساخت بر خواص مکانیکی فوم‌های ترکیبی اپوکسی با میکروبالن سرامیکی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها پارامترهای ساخت از جمله سرعت اختلاط، زمان اختلاط و ترتیب اختلاط اجزا را مورد بررسی قرار دادند، که متوجه شدند سرعت اختلاط و ترتیب اختلاط اجزا در مقاومت آنها تأثیر چندانی ندارد. نتایج نشان داد که افزایش شناوری میکروبالن‌ها و افزایش تخلخل ناخواسته در فوم، مقاومت مکانیکی فوم را کاهش می‌دهد [۱۶]. علوی نیا و کاظمی (۲۰۱۵) به بررسی تحلیلی پانل‌های ساندویچی تحت سرعت بالا که هسته آن‌ها از فوم و رویه‌ها از جنس آلومینیوم بود، پرداختند. آنها با اصلاح مدل تحلیلی هوفت و همکاران، به بررسی تحلیلی سرعت بالا بر روی پانل‌های ساندویچی با هسته فومی پرداختند؛ همچنین با روش تحلیلی توانستند سرعت باقی مانده پرتابه در برخورد با پانل‌ها را تعیین کنند [۱۷]. اسلانکسیک و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی عددی و تجربی فوم ترکیبی تقویت شده به وسیله میکروبالن‌های آهنی پرداختند. فلز ذوب شده آلیاژ آلومینیوم بود که با میکروبالن‌های آهنی اختلاط یافته بود؛ همچنین آنها در مطالعه خود از آنالیز المان محدود برای دستیابی به نتایج استفاده کردند. نتایج نشان داد که این نوع فوم‌ها قابلیت جذب انرژی بسیار بالایی دارند [۱۸]. با توجه به اهمیت کاربردی فوم‌های ترکیبی در صنایع مختلف، در سال‌های اخیر محققین متعددی [۱۲-۱۸] بر روی رفتار این نوع فوم‌ها، مطالعه کرده‌اند. هدف این مقاله بررسی میزان جذب انرژی فوم‌های ترکیبی، از جنس‌های فولاد کم‌کربن، آلومینیوم-۶۰۶۱ و آلومینیوم-۶۰۶۳ در سرعت بالا می‌باشد.

## ۲ معرفی نمونه

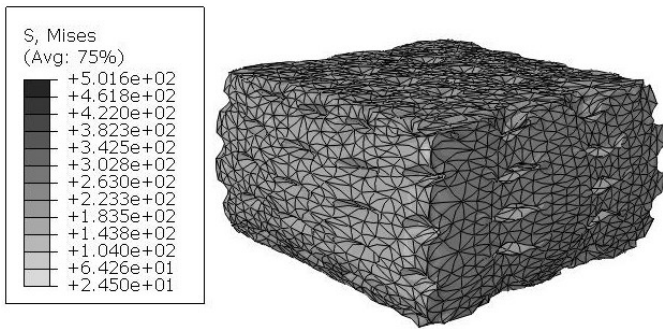
برای انجام شبیه‌سازی عددی از نمونه‌هایی با جنس‌های آلومینیوم-۶۰۶۱ و آلومینیوم-۶۰۶۳ و فولاد کم‌کربن استفاده گردید. فوم مورد نظر در نرم افزار کتیا طراحی شد و در نرم افزار المان محدود آباکوس مورد تحلیل قرار گرفت. نمونه مورد نظر سطحی به اندازه  $۸/۳۸ \times ۸/۳۸$  میلی‌متر و ارتفاع  $۱۱/۶۸$  میلی‌متر داشت. به دلیل اینکه فوم طراحی شده به فوم حالت واقعی نزدیک تر شود، از کره‌هایی با سه نوع اندازه مختلف استفاده شد و محل قرارگیری آنها به صورت تصادفی انتخاب گردید. کره‌های تو خالی با قطرهای  $۱/۵$ ،  $۱/۲۹$  و  $۰/۹۶$  میلی‌متر طراحی شدند. در شکل ۱، قطعه طراحی شده را مشاهده می‌کنید. شکل ۲، رویه قطعه را از سه نما نمایش می‌دهد.

## ۳ شبیه‌سازی عددی

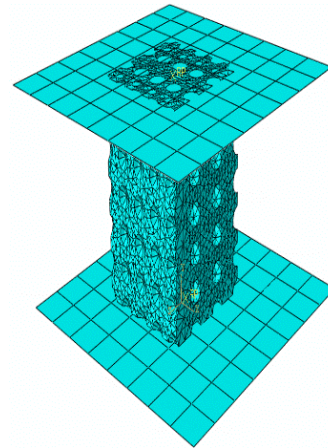
برای شبیه سازی عددی قطعات از نرم افزار آباکوس نسخه 14.6 استفاده گردید و روش حل صریح به صورت غیرخطی انتخاب شد. این آزمون در شرایط سرعت بالا انجام شد. برای شبیه‌سازی ضربه‌زننده، چکش و صفحه میز دستگاه به صورت صفحات صلب و پوسته مدل شدند.

پس از مدل‌سازی در نرم‌افزار کتیا، برای تعریف جنس نمونه‌ها در قسمت خواص مواد، مدول یانگ و ضریب پواسون و چگالی برای خواص الاستیک طبق جدول ۱ وارد شدند و نمودار تنش- کرنش مهندسی برای خواص





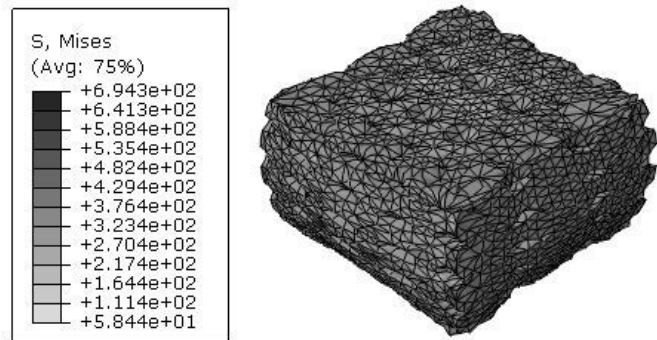
شکل ۵: تنش ون میسز برای آلومینیوم-۶۰۶۱.



شکل ۳: طرح تحلیل المان محدود فوم ترکیبی در اثر ضربه محوری.

جدول ۱: خواص مواد.

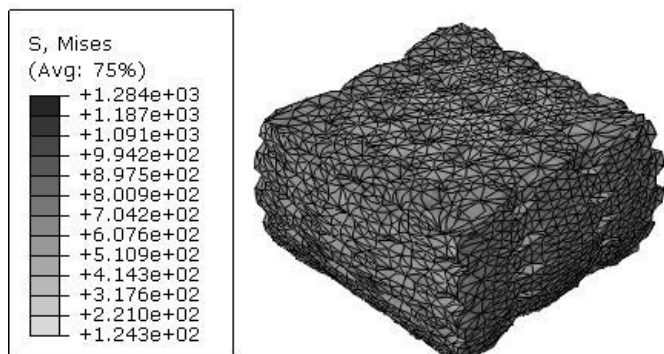
| نمونه‌ها       | چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ ) | ضریب پواسون | مدول الاستیسیته (GPa) |
|----------------|----------------------------|-------------|-----------------------|
| فولاد کم‌کربن  | ۷۸۰۰                       | ۰/۳         | ۲۱۰                   |
| آلومینیوم-۶۰۶۱ | ۲۷۰۰                       | ۰/۳۳        | ۶۸                    |
| آلومینیوم-۶۰۶۳ | ۲۵۶۰                       | ۰/۳۳        | ۵۳/۸۵                 |



شکل ۶: تنش ون میسز برای آلومینیوم-۶۰۶۳.

## ۴ نتایج و بحث

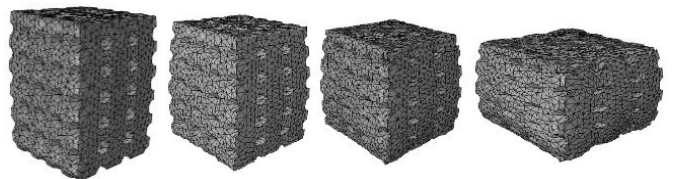
پس از بارگذاری، در نواحی توخالی در فوم تمرکز تنش به وجود آمد و در نهایت این تمرکز تنش باعث لهیدگی فوم شد. با بررسی تنش در فرایند لهیدگی، در ابتدا تنش به نزدیکی تنش نهایی می‌رسد و پس از آن سطح تنش کاهش می‌یابد. پس از کاهش جزئی سطح تنش، دوباره تنش افزایش می‌یابد. در طول فشرده‌سازی فوم‌ها کار انجام شده به صورت برگشت‌ناپذیر است و به صورت تغییر شکل پلاستیک جذب می‌شود و انرژی جذب شده در واحد حجم همان سطح زیر منحنی تنش- کرنش است. در این مطالعه سه نوع فوم مورد بررسی قرار گرفت. در تمامی مدل‌ها فروریزش به صورت متقارن بود که باعث ایجاد یک فروریزش کارآمد می‌شد. در طول فرآیند فشرده‌سازی، دیواره سلول‌ها به طور مداوم دچار لهیدگی و فروریزش یکنواخت شد. شکل ۴ مراحل فروریزش و لهیدگی را برای فوم آلومینیوم-۶۰۶۱ نمایش می‌دهد. در ادامه نتایج حاصل از آزمایش عددی فوم‌ها تحت بارگذاری محوری مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب کانتور تنش فون میسز فوم‌های ترکیبی از جنس آلومینیوم-۶۰۶۱، آلومینیوم-۶۰۶۳ و فولاد کم‌کربن را پس از انجام تحلیل المان محدود نشان می‌دهند. نمودار نیرو- جابه‌جایی میزان نیروی وارده به سطح زیرین فوم را نسبت به جابه‌جایی ضربه‌زننده نمایش می‌دهد. همچنین از این نمودار نیروی بیشینه وارده به سطح پایین نمونه مورد نظر قابل مشاهده است.



شکل ۷: تنش ون میسز برای فولاد کم‌کربن.

شکل ۸ نمودار نیرو- جابه‌جایی را برای سه نمونه فوم تست شده نمایش می‌دهد. برای توصیف نمودار نیرو- جابه‌جایی در آزمون‌های انجام شده می‌توان گفت که مرحله اول در این نمودار یک منطقه الاستیک خطی است. در ادامه منحنی به شکل زانویی تبدیل می‌شود و شیب آن به صفر می‌رسد؛ با افزایش مقدار جابه‌جایی برای آلومینیوم-۶۰۶۱ و فولاد کم‌کربن شیب منفی شده و در نهایت شیب افزایش می‌یابد؛ این نقطه نشانگر زمانی است که حفره‌های فوم شروع به فروریزش می‌کنند [۱].

با توجه به نتایج و مشاهدات صورت‌گرفته می‌توان بیان کرد که فوم فولادی کم‌کربن بیشترین میزان نیروی اوج و آلومینیوم-۶۰۶۱ کمترین میزان نیروی اوج را دارا هستند. این نیروی بیشینه به دلیل مقاومت قطعه در برابر تغییر شکل پلاستیک رخ می‌دهد. نیروی بیشینه فوم فولادی کم‌کربن حدود ۶٪ بیشتر از نیروی اوج فوم آلومینیوم-۶۰۶۳ است. مقدار نیروی اوج برای تمامی نمونه‌های تست شده در جدول ۲ قابل مشاهده است. روند لهیدگی،

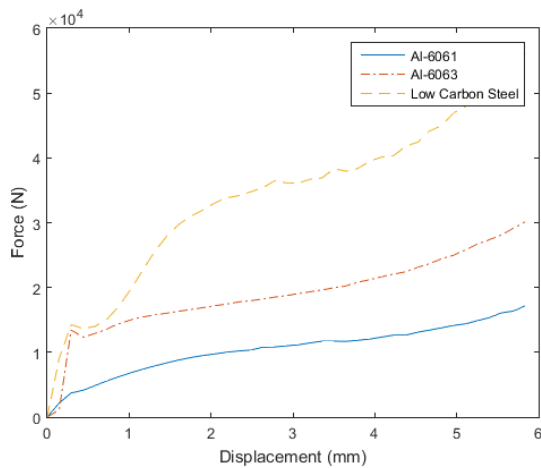


شکل ۴: مراحل انجام تست ضربه.

است. شکل ۹ نشان می‌دهد شیب نمودار برای فوم فولادی کم‌کربن از دو نمونه دیگر بیشتر است؛ بنابراین میزان جذب انرژی فوم فولادی کم‌کربن از دو نمونه دیگر بیشتر است و مقدار آن ۱۴۳۳۶/۳ ژول است. فوم فولادی آلومینیوم ۶۰۶۳- کمترین شیب و به طبع آن، کمترین میزان جذب انرژی را دارا است. پارامتر مؤثر دیگر که عملکرد جاذب را مورد بررسی قرار می‌دهد، انرژی بر واحد جرم (SEA) است. رابطه (۳) نشانگر رابطه جذب انرژی بر واحد جرم است.

$$SEA = \frac{E_a}{M} \quad (3)$$

در این رابطه  $E_a$  ظرفیت جذب انرژی و  $M$  جرم جاذب است. در جدول ۲ علاوه بر پارامترهایی که بیان شد، مقدار وزن نمونه‌ها و نیز مقدار جذب انرژی بر واحد جرم هم قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که فوم آلومینیوم-۶۰۶۳ بیشترین انرژی بر واحد جرم را دارا بود.

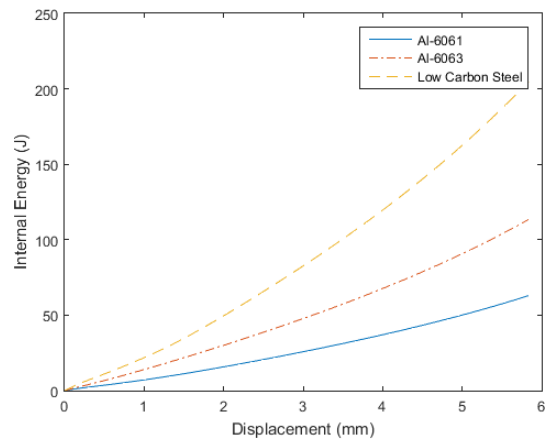


شکل ۹: منحنی انرژی جذب‌شده- جابه‌جایی حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی.

## ۵ نتیجه‌گیری

نمودار نیرو-جابه‌جایی این جاذب‌ها در مقایسه با جاذب‌های جدار نازک، افت و خیز بسیار کمتری دارد که این مسئله برتری آن‌ها را در مقایسه با جاذب‌های جدار نازک نمایش می‌دهد. علت نوسان زیاد در نمودار نیرو-جابه‌جایی جاذب‌های جدار نازک وجود تعداد لولاهای پلاستیک متعدد است؛ که در فوم‌ها به دلیل اینکه این اتفاق نمی‌افتد، این افت و خیز در نمودار نیرو-جابه‌جایی مشاهده نمی‌شود. نیروی میانگین فوم ترکیبی فولاد کم‌کربن به وضوح از دیگر نمونه‌ها بیشتر بود، که مزیت این نمونه را نشان می‌دهد. نیروی بیشینه فوم ترکیبی فولاد کم‌کربن بیشتر از دو نمونه دیگر است، اما مقدار آن به نیروی اوج فوم آلومینیوم-۶۰۶۳ بسیار نزدیک و حدود ۶٪ بیشتر بود. فوم ترکیبی فولاد کم‌کربن میزان جذب انرژی قابل قبولی را در مقایسه با دو نمونه دیگر دارا بود، که دلیل این امر مقاومت بالاتر فولاد کم‌کربن در مقابل لهیدگی در مقایسه با انواع مختلف آلومینیوم است. همه فوم‌ها به نسبت وزن پایینی دارند اما در مورد فوم‌های ترکیبی، به دلیل متخلخل بودن این نوع فوم‌ها وزن کمتری را شاهد هستیم و همین امر سبب بالا رفتن میزان جذب انرژی بر واحد جرم این نوع فوم‌ها می‌شود؛ که جزو مهمترین پارامترها در جاذب‌ها

در فوم فولادی به سرعت افزایش پیدا می‌کند ولی در فوم‌های آلومینیومی تست‌شده این روند صعودی با شیب کمتری طی می‌شود. برای آلومینیوم-۶۰۶۱ و فولاد کم‌کربن پس از آنکه تغییر شکل پلاستیک آغاز شد، نیرو افت پیدا می‌کند.



شکل ۸: منحنی نیرو-جابه‌جایی حاصل از نتایج مدل‌سازی عددی.

جدول ۲: جذب انرژی در واحد وزن و نیروی اوج.

| ردیف | نمونه‌ها       | جرم  | SEA   | نیروی اوج | جذب انرژی |
|------|----------------|------|-------|-----------|-----------|
| ۱    | فولاد کم‌کربن  | ۴/۹۵ | ۴۱/۴۳ | ۱۴۳۳۶/۳۰  | ۲۰۵/۰۷۵   |
| ۲    | آلومینیوم-۶۰۶۱ | ۱/۷۱ | ۳۶/۸۵ | ۳۸۹۳/۸۱   | ۶۳/۰۱۲    |
| ۳    | آلومینیوم-۶۰۶۳ | ۱/۶۳ | ۶۹/۶۴ | ۱۳۴۵۱/۳۰  | ۱۱۳/۵۱۷   |

یکی دیگر از نتایجی که می‌شود از این نمودار گرفت، مقدار نیروی متوسط فروریزش است. مقدار این نیرو برابر با سطح زیر نمودار نیرو-جابه‌جایی است که همان میزان جابه‌جایی ضربه زننده است. رابطه (۱) بیانگر همین موضوع است.

$$p_{\text{mean}} = \frac{1}{\delta} \int p d\delta \quad (1)$$

با بررسی جدول ۲ مشاهده می‌شود که میزان نیروی میانگین فروریزش برای فولاد کم‌کربن از نمونه‌های دیگر بیشتر است. در این میان آلومینیوم-۶۰۶۱ کمترین نیروی متوسط فروریزش را دارا می‌باشد. یکی دیگر از فاکتورهای مؤثر در جاذب‌ها، ظرفیت جذب انرژی است که در رابطه (۲) بیان شده است.

$$E_a = \int_{x_1}^{x_2} F(x) dx \quad (2)$$

مقدار نهایی میزان انرژی جذب‌شده توسط جاذب در جدول ۲ قابل مشاهده است. بیشترین میزان جذب انرژی برای فوم فولادی کم‌کربن است. شکل ۹ نمودار انرژی-جابه‌جایی را برای تمامی نمونه‌ها نمایش می‌دهد. این نمودار نسبت میزان انرژی جذب‌شده توسط جاذب، به جابه‌جایی ضربه‌زننده را نشان می‌دهد و می‌توان در هر میزان لهیدگی انرژی جذب‌شده را مشاهده کرد. رفتار نمودار در طول لهیدگی برای سه نمونه تست‌شده به صورت کاملاً صعودی

- [9] Zhang, Chun-Ji, Yi, Feng, and Zhang, Xue-bin. Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(8):1380-1386, 2010.
- [10] Molatefi, Habibollah and Mozafari, Hozhabr. Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method. *Modares Mechanical Engineering*, 14(15):177-185, 2014.
- [11] Marur, Prabhakar R. Numerical estimation of effective elastic moduli of syntactic foams. *Finite Elements in Analysis and Design*, 46(11):1001-1007, 2010.
- [12] Swetha, C and Kumar, Ravi. Quasi-static uni-axial compression behaviour of hollow glass microspheres/epoxy based syntactic foams. *Materials & Design*, 32(8-9):4152-4163, 2011.
- [13] Yu, Ming, Zhu, Ping, and Ma, Yingqi. Effects of particle clustering on the tensile properties and failure mechanisms of hollow spheres filled syntactic foams: A numerical investigation by microstructure based modeling. *Materials & Design*, 47:80-89, 2013.
- [14] Castro, G and Nutt, SR. Synthesis of syntactic steel foam using gravity-fed infiltration. *Materials Science and Engineering: A*, 553:89-95, 2012.
- [15] Ahmadi, Hamed and Shokrieh, Mahmoud Mehrdad. Volume fraction and microballoon size effects on the compressive properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foam. *Modares Mechanical Engineering*, 14(4):37-44, 2014.
- [16] Ahmadi, Hamed and Shokrieh, Mahmoud Mehrdad. Experimental investigation of fabrication parameter effects on the mechanical properties of epoxy/ceramic microballoon syntactic foams. *Modares Mechanical Engineering*, 14(2):47-54, 2014.
- [17] Nia, Ali Alavi and Kazemi, Mahdi. Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets. *Modares Mechanical Engineering*, 15(6), 2015.
- [18] Szlancsik, Attila, Katona, Bálint, Bobor, Kristóf, Májlínger, Kornél, and Orbulov, Imre Norbert. Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres. *Materials & Design*, 83:230-237, 2015.
- [19] Zhang, Xiong and Zhang, Hui. Axial crushing of circular multi-cell columns. *International Journal of Impact Engineering*, 65:110-125, 2014.
- [20] Costas, Miguel, Morin, David, Langseth, Magnus, Romera, L, and Díaz, J. Axial crushing of aluminum extrusions filled with pet foam and gfrp. an experimental investigation. *Thin-Walled Structures*, 99:45-57, 2016.
- [21] Fan, Z, Lu, G, and Liu, K. Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes. *Engineering Structures*, 55:80-89, 2013.
- است. با بررسی فوم‌های ترکیبی از جنس فولاد کم‌کربن و آلومینیوم-۶۰۶۱ و آلومینیوم-۶۰۶۳ نتیجه گرفته شد که میزان جذب انرژی در واحد جرم در فوم ترکیبی آلومینیوم-۶۰۶۳، ۴۷٪ بیشتر از فوم آلومینیوم-۶۰۶۱ و ۴۰/۵٪ بیشتر از فوم فولادی کم‌کربن است. در کل می‌توان گفت که این نوع از فوم‌ها قابلیت بالاتری نسبت به فوم‌های معمولی برای استفاده در صنایع مختلف به عنوان جاذب را خواهند داشت. به عنوان نتیجه کلی بهترین جاذب، جاذبی است که جذب انرژی در واحد جرم بالا و نیروی بیشینه اولیه پایین‌تری داشته باشد. اما چون این دو فاکتور رابطه معکوس با هم دارند در بین سه نمونه تست‌شده، فومی که بالاترین جذب انرژی در واحد جرم را داشت، کمترین نیروی بیشینه را نداشت. به همین دلیل به طور قطع نمی‌توان در بین این سه جاذب بهترین جاذب را انتخاب کرد. در واقع بهترین جاذب زمانی انتخاب می‌شود که کاربرد آن هم مشخص باشد. در کاربردهایی که میزان جذب انرژی و وزن دو فاکتور مهم‌تر از نیروی اوج باشند، استفاده از فوم ترکیبی آلومینیوم-۶۰۶۳ پیشنهاد می‌شود. اما کاربردهایی هم وجود دارند که نیروی اوج بسیار مهم است که در آن صورت فوم ترکیبی آلومینیوم-۶۰۶۱ پیشنهاد می‌شود. زمانی هم که در کاربرد مورد نظر مهم‌ترین فاکتور جذب انرژی بسیار بالا، مد نظر سازنده باشد و وزن و نیروی اوج از اهمیت کمتری برخوردار باشد قطعاً استفاده از فوم ترکیبی فولادی کم‌کربن توصیه می‌شود.

## مراجع

- [1] Castro, G and Nutt, SR. Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration. *Materials Science and Engineering: A*, 535:274-280, 2012.
- [2] Reddy, TY and Wall, RJ. Axial compression of foam-filled thin-walled circular tubes. *International Journal of Impact Engineering*, 7(2):151-166, 1988.
- [3] Seitzberger, Markus, Rammerstorfer, Franz G, Gradingner, R, Degischer, HP, Blaimschein, M, and Walch, Ch. Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam. *International Journal of Solids and Structures*, 37(30):4125-4147, 2000.
- [4] Wang, Qingchun, Fan, Zijie, and Gui, Liangjin. A theoretical analysis for the dynamic axial crushing behaviour of aluminium foam-filled hat sections. *International Journal of Solids and Structures*, 43(7-8):2064-2075, 2006.
- [5] Ahmad, Zaini and Thambiratnam, DP. Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading. *Materials & design*, 30(7):2393-2403, 2009.
- [6] Ahmad, Zaini and Thambiratnam, David P. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. *Computers & Structures*, 87(3-4):186-197, 2009.
- [7] Zarei, HR and Kröger, Matthias. Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application. *Thin-Walled Structures*, 46(2):214-221, 2008.
- [8] Vendra, L and Rabiei, A. Evaluation of modulus of elasticity of composite metal foams by experimental and numerical techniques. *Materials Science and Engineering: A*, 527(7-8):1784-1790, 2010.