



## تحلیل تجربی و عددی پارامترهای مؤثر بر رفتار مکانیکی فوم آلومینیومی سلول بسته در ضربه سرعت پایین

بهزاد تیموری<sup>۱</sup>، مجتبی یزدانی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

\* شهر جدید سهند، صندوق پستی: ۱۹۹۶-۵۱۳۳۵، m.yazdani@sut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۵ تیر ۱۴۰۲

داوری اولیه: ۷ مرداد ۱۴۰۲

پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

آلومینیوم ۳۵۶

فوم سلول بسته

ضربه سرعت پایین

### چکیده

در این مقاله به بررسی پارامترهایی مانند قطر حفره‌های تشکیل‌دهنده فوم، ضخامت دیواره‌ها در راستای افقی و عمودی بر روی میزان جذب انرژی فوم‌های آلومینیوم ۳۵۶ سلول بسته تولیدی به روش فوم از دست رفته تحت ضربه سرعت پایین پرداخته شد. برای کاهش هزینه‌های تولید و تعداد آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش استفاده گردید. بر اساس طراحی انجام شده ۱۵ آزمایش پیشنهاد گردید. سپس طبق نتایج طراحی آزمایش، شبیه‌سازی فوم‌ها با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس انجام و بر اساس میزان جذب در حالت‌های مختلف، ۴ فوم برای تولید نهایی با دو ساختار مکعبی ساده و مکعبی مرکز پر انتخاب گردید. برای انجام آزمایش ضربه سرعت پایین از دستگاه وزنه سقوطی با وزنه ۵۰ کیلوگرم که از ارتفاع سه متر سقوط می‌کند، استفاده شد. نتایج نشان داد هر چه قطر حفره‌های فوم کوچک‌تر باشد میزان جذب انرژی بیشتر خواهد بود. همچنین ضخامت دیواره‌های فوم در راستای افقی تأثیر بیشتری نسبت به راستای عمودی بر میزان جذب انرژی فوم دارد. از بین دو نوع ساختار مورد مطالعه، ساختار مکعبی ساده عملکرد بهتری نسبت به ساختار مکعبی مرکز پر داشت. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان داد میزان اختلاف بین ۱۰-۳۰٪ است. بیشترین اختلاف مربوط به ساختارهای مکعبی مرکز پر بود که علت اصلی آن را می‌توان در سخت‌تر بودن ساخت این نمونه‌ها در واقعیت نسبت به حالت ایده‌آل شبیه‌سازی دانست.

## Experimental and numerical analysis of parameters affecting the mechanical behavior of closed cell aluminum foam in low-speed impact

Behzad Teimouri, Mojtaba Yazdani\*

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 51335-1996 Tabriz, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 26 June 2023

First Decision: 29 July 2023

Accepted: 22 August 2023

### Keywords:

Al 356

Closed Cell Foam

Low-Speed Impact

### Abstract

In this paper, the parameters such as the diameter of the foam forming hollows, the thickness of the walls in the horizontal and vertical directions were investigated on the energy absorption of aluminum 356 closed cell foams produced by the lost foam casting method under low-speed impact. To reduce production costs and the number of tests, the test design method was used. Based on the design, 15 experiments were proposed. Then, according to the results of the experiment design, the simulation of the foams was done using Abaqus finite element software and based on the amount of absorption in different states, 4 foams were selected for the final production with two simple cubic structures and body center cubic. To perform the low-speed impact test, a 50 kg drop weight device that falls from a height of three meters was used. The results showed that the smaller the diameter of the foam holes, the higher the energy absorption. Also, the thickness of the foam walls in the horizontal direction has a greater effect on the energy absorption of the foam than in the vertical direction. Among the two types of structures studied, the simple cubic structure performed better than the body center cubic structure. Comparison of simulation and experimental results showed that the difference is between 10-30%. Most of this difference was related to the body center cubic structure feather, the main reason of which can be seen in the fact that it is more difficult to make these samples in reality compared to the ideal state of simulation.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Teimouri, M. Yazdani, Experimental and numerical analysis of parameters affecting the mechanical behavior of closed cell aluminum foam in low-speed impact, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 12, pp. 43- 53, 2023 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2023.402611.1796>

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، ایمنی و مصرف انرژی خودروها مورد توجه زیادی قرار گرفته و تحقیقات دانشگاهی و صنعتی فراوانی را به خود جلب کرده است تا هم‌زمان بهبود خواص جذب انرژی ضربه و کاهش وزن اجزای خودرو در هنگام تصادف، محقق سازند. دو راهکار اصلی برای افزایش جذب انرژی و سبک‌تر شدن خودرو وجود دارد: بهبود ساختار و تعویض مواد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تعویض مواد مهم‌ترین عامل در افزایش جذب انرژی و کاهش وزن خودرو است [۱].

استفاده از مواد پیشرفته با استحکام بالا و خاصیت جذب انرژی مناسب، بهبود قابل توجهی در ایمنی و کارایی خودروها را به همراه دارد. فوم‌های فلزی، با خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی مناسب و چگالی کم، در صنایع خودروسازی و هوافضا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرند. در صنعت خودروسازی، این فوم‌ها به‌عنوان اجزای ساختاری در بدنه، تیرها و ستون‌های جذب ضربه استفاده می‌شوند. استفاده از این مواد پیشرفته، باعث کاهش وزن خودرو و افزایش توانایی جذب و تفکیک انرژی در صورت تصادف می‌شود [۲، ۳]. توجه به فوم‌های فلزی به دهه ۱۹۴۰ باز می‌گردد، زمانی که سوسنیک اختراعی در زمینه ساخت فوم‌های فلزی انجام داد [۴]. فوم‌های فلزی، با استحکام زیاد، تحمل دمای بیشتر نسبت به فوم‌های پلیمری و انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به فوم‌های سرامیکی و همچنین خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و صوتی مناسب، جایگاه مهمی در خودروسازی، هوافضا و صنایع دیگر یافته‌اند [۵]. با پیشرفت روش‌های تولید و بهبود فرایندها، مشکلات هزینه بالا و عدم توجیه اقتصادی استفاده از فوم‌های فلزی کاهش یافته است. رفتار فوم‌های آلومینیومی تحت تأثیر پارامترهای مختلف قرار می‌گیرد. ترکیب فلز، نوع سلول‌ها، ناهمسانگردی سلولی و چگالی از جمله پارامترهای مهم هستند. ترکیب و ویژگی‌های فلز تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی فوم دارند. فوم‌های مشتق شده از فلزات با استحکام بالاتر، خواص مکانیکی بهتری دارند. نوع سلول‌ها نیز نقش مهمی در تعیین خواص و رفتار مکانیکی فوم دارد؛ سلول‌های باز و بسته دارای خصوصیات متفاوتی هستند. ناهمسانگردی سلولی می‌تواند تغییراتی تا ۳۰ درصد در مدول فوم در جهات مختلف ایجاد کند. همچنین، چگالی فوم نیز به‌عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در عملکرد فوم محسوب می‌شود. افزایش چگالی منجر به افزایش قابلیت جذب انرژی و مقاومت فوم در برابر بارگذاری می‌شود. در طراحی و بهینه‌سازی فوم‌های آلومینیومی، شناسایی و کنترل

این پارامترها از اهمیت بالایی برخوردار است [۳]. کنترل اندازه و شکل حفره‌ها و اصلاح ضخامت دیواره‌های سلولی از جمله چالش‌های اصلی در تولید فوم‌های فلزی است. به دلیل ماهیت تصادفی فرایند تشکیل فوم در حالت فعلی، ایجاد حفره‌ها و دیواره‌های سلولی به‌طور تصادفی رخ می‌دهد و اندازه و شکل آن‌ها قابل پیش‌بینی نیست که باعث کاهش یکنواختی و کنترل خواص مکانیکی فوم می‌شود. همچنین، اصلاح ضخامت دیواره‌های سلولی نیز به دلیل مراحل پیچیده تشکیل فوم و تأثیر پارامترهای مختلف مانند دما، فشار، زمان و ترکیب فلز، مشکل است. تغییر در ضخامت دیواره‌های سلولی می‌تواند به تغییرات قابل توجهی در خواص مکانیکی فوم منجر شود [۶، ۷].

استفاده از کره‌های توخالی برای ایجاد فضای توخالی در تولید فوم‌ها، روشی است که به‌وسیله آن‌ها می‌توان پارامترهای مهم فوم را کنترل نمود. در این روش، کره‌های توخالی سرامیکی یا فلزی به‌عنوان فضا‌ساز استفاده می‌شوند. با استفاده از این کره‌ها، می‌توان اندازه و شکل حفره‌ها و دیواره‌های سلولی فوم را کنترل کرد و ضخامت دیواره‌ها را اصلاح نمود [۸، ۹]. تحقیقات نشان داده است که فوم‌های متشکل از این کره‌های منظم، خواص مکانیکی خاصی دارند؛ به‌خصوص در جهت‌های خاصی، تنش تسلیم آن‌ها سه برابر بیشتر از سایر فوم‌های فلزی با چگالی مشابه است [۱۰]. تمرکز تحقیقات قبلی بیشتر بر روی کنترل اندازه و شکل حفره‌ها از طریق ریخته‌گری در اطراف کره‌های توخالی بوده و به مسئله ترتیب چینش کره‌ها و نفوذ یکنواخت مذاب بین آن‌ها کمتر پرداخته شده است؛ اما با استفاده از این رویکرد، می‌توان به‌طور دقیق کره‌ها را درون ماتریس فوم قرار داد و ترتیب و چینش آن‌ها را کنترل کرد [۱۱].

به‌منظور دستیابی به خواص مورد نظر در تولید یک فوم، لازم است پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند تولید آن شناسایی شود. در این قسمت، به بررسی برخی از این پارامترها در پژوهش‌های گذشته پرداخته شده است. در سال ۲۰۱۵، گوش و همکاران [۱۲] تأثیر ریزگویی‌های توخالی شیشه‌ای با قطر ۲۰ تا ۴۰ میکرومتر بر پاسخ فشاری شبه‌استاتیکی و دینامیکی فوم‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که اندازه ریزگویی‌ها تأثیر چندانی بر رفتار شبه‌استاتیکی ندارد، اما در شرایط بارگذاری دینامیکی، تفاوت قابل ملاحظه‌ای ایجاد می‌کند. در واقع، ریزگویی‌های با اندازه کوچک‌تر از ۲۰ میکرومتر در مقایسه با ریزگویی‌های بزرگ‌تر از ۴۰ میکرومتر، در رفتار دینامیکی مواد تأثیر بیشتری دارند؛ بنابراین، فوم‌هایی که دارای ریزگویی با قطر

همچنین مقدار جذب انرژی با افزایش سرعت ضربه افزایش می‌یابد. با این حال، بازده جذب انرژی پس از مقادیر کرنش خاص کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش ناگهانی تنش یا نیرو در مرحله چگالش به‌طور قابل توجهی بازده جذب انرژی را کاهش می‌دهد.

در سال ۲۰۲۱، هدایتی و همکاران [۱۷] به بررسی رفتار دینامیکی فوم‌های آلومینیومی سلول بسته با اشکال سلولی مختلف پرداختند. پنج توپولوژی مختلف شامل کلون، Weaire-Phelan، لوزی مکعبی، هشت‌وجهی و مکعب ناقص برای ساختارهای شبکه در نظر گرفته شدند. تأثیر چگالی فوم و سرعت ضربه بر روی منحنی‌های تنش-کرنش و ظرفیت جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که توپولوژی سلول واحد نقش مهمی در سفتی، حالت شکست و ظرفیت جذب انرژی دارد. در میان تمام انواع سلول‌های واحد، سلول واحد کلون شباهت بیشتری با نتایج آزمایش تجربی داشت. سازه‌های شبکه‌ای با کسرهای بالای دیواره‌های عمودی (مکعب ناقص و لوزی مکعبی) نسبت به سازه‌های شبکه‌ای با کسرهای بالای دیواره‌های مایل (Weaire-Phelan و کلون) سفتی و مقادیر تنش بالاتری را نشان دادند. ساختارهای شبکه‌ای با سطح دیواره سلولی بالا نسبت به سازه‌های شبکه‌ای با سطح دیواره کم، ظرفیت جذب انرژی بالاتری داشتند.

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و مشخص کردن پارامترهای با تأثیر بالا در رفتار فوم‌ها است. برای این منظور، از روش‌های آزمایشگاهی و عددی به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است. این ترکیب روش‌ها، امکان تحلیل و بررسی دقیق رفتار فوم‌ها را در مقیاس آزمایشگاهی فراهم می‌کند و نتایج حاصله را با شبیه‌سازی‌ها مقایسه و تأیید می‌کند. به این ترتیب، پارامترهای کلیدی مرتبط با رفتار فوم‌ها شناسایی و فوم‌هایی با ویژگی‌های مورد نظر برنامه‌ریزی و تولید می‌شوند.

## ۲- طراحی آزمایش

در این پژوهش، برای کاهش تعداد آزمایش‌ها و بهبود صرفه‌جویی در زمان و هزینه، از طراحی آزمایش با استفاده از پاسخ سطح (RSM<sup>۱</sup>) استفاده شده است. این روش، امکان تخمین و پیش‌بینی رفتار فوم‌ها بر اساس تعداد محدودی از آزمایش‌های طراحی شده را فراهم می‌کند.

۲۰ میکرومتر هستند، ظرفیت جذب انرژی زیادی در نرخ کرنش بالاتر دارند. در سال ۲۰۱۸، انصاری و همکاران [۱۳] تغییر شکل فوم آلومینیومی با سلول بسته و ۱۰ درصد وزنی کاربید سیلیکون را تحت بارگذاری استاتیک و ضربه مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، مدول یانگ به مقدار ۶۶ مگاپاسکال، تنش مسطح حدود ۳/۴ مگاپاسکال و حداکثر کرنش فوم ۰/۳۴ به دست آمد. نتایج نشان داد که تغییرات قابل توجهی در نیروی ضربه و انرژی اتلافی بین نمونه‌های مختلف فوم وجود دارد که حدود ۱۰-۳٪ از این تغییرات به دلیل توزیع غیریکنواخت اندازه سلول کاربید سیلیکون در فوم است. همچنین، افزودن ذرات کاربید باعث افزایش شکنندگی فوم می‌شود. در سال ۲۰۲۰، اسلام و همکاران [۱۴] تأثیر شکل ضربه زننده نظیر تخت، نیم‌کره، مخروطی و مخروط ناقص بر تغییر شکل و جذب انرژی در فوم‌های آلومینیومی سلول بسته تحت ضربه با سرعت کم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که رفتار مکانیکی فوم‌های آلومینیومی سلول بسته تحت ضربه با سرعت کم به‌طور قابل توجهی به شکل ضربه زننده و انرژی اولیه ضربه وابسته است. جذب انرژی ویژه (انرژی جذب شده به ازای حجم واحد) با افزایش سرعت ضربه برای تمام شکل‌های ضربه زننده افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که جذب انرژی ویژه برای ضربه زننده تخت بالاتر از سایر ضربه زننده‌ها در همان سرعت ضربه است. در سال ۲۰۲۰، ساهو و همکاران [۱۵] به بررسی فوم‌های آلومینیومی سلول بسته با چگالی‌ها و ساختار سلولی متفاوت برای تعیین حساسیت نرخ فرورفتگی تحت ضربه، به‌عبارت‌دیگر افزایش مقاومت در برابر فرورفتگی با افزایش سرعت وزنه برخوردکننده، پرداختند. برای ارزیابی این مقاومت، نیروی انتقال دینامیکی (DTF) به‌عنوان یک معیار مورد استفاده قرار گرفت و مشخص شد که دارای وابستگی قابل توجهی به سرعت وزنه سقوط‌کننده و چگالی فوم است. همچنین نشان داده شد که وابستگی حساسیت نرخ فرورفتگی تحت ضربه به چگالی فوم به تفاوت در ساختار سلولی بین فوم‌های با چگالی کم و بالا مربوط بود و این تفاوت‌ها تأثیر قابل توجهی روی مکانیک تغییر شکل داشتند. در سال ۲۰۲۱، کادر و همکاران [۱۶] به بررسی وابستگی فوم‌های آلومینیومی سلول بسته به نرخ کرنش و دینامیک ضربه پرداختند. در این مطالعه، حساسیت نرخ کرنش و مکانیزم‌های تغییر شکل فوم‌های آلومینیوم سلول بسته تحت بارهای ضربه‌ای با سرعت کم مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی و نتایج تجربی نشان دادند که حساسیت نرخ مواد پایه عامل اصلی افزایش استحکام در هنگام ضربه است.

<sup>۱</sup> Response Surface Method

پارامترهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، عبارت‌اند از: قطر حفره‌ها (D)، (t) فاصله بین حفره‌ها در راستای محور X و (h) فاصله بین حفره‌ها در راستای محور Y. شکل ۱ نمایش دهنده این پارامترها است. برای هر یک از این پارامترها، مقادیر متغیر و سطوح مختلفی انتخاب شده است. این مقادیر پیشنهادی برای هر متغیر و آزمایش‌های پیشنهادی جهت بررسی در جدول‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده هستند. با استفاده از این طرح آزمایش‌ها، تأثیر هر پارامتر بر رفتار فوم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و تعیین می‌شود که آیا تغییرات در این پارامترها تأثیر قابل توجهی بر رفتار فوم‌ها دارند یا خیر.

بر اساس پارامترهای تعریفی، ۱۵ شبیه‌سازی ارائه گردید که به دلیل یکسان بودن سه آزمایش (۲، ۴ و ۷) با آزمایش‌های پیشنهادی دیگر، این تعداد به ۱۳ عدد کاهش یافت. ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۳۵۶ بکار رفته در این پژوهش در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳ ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۳۵۶

Cu (%)	Fe (%)	Si (%)	Al (%)
0.91	0.49	15.85	82.75

### ۳- شبیه‌سازی نمونه‌ها

برای شبیه‌سازی و ساخت نمونه‌های آزمایش از دو ساختار مکعبی ساده ( $SC^1$ ) مطابق شکل ۲ و ساختار مکعبی مرکز پر ( $BCC^2$ ) مطابق شکل ۳ استفاده شد.

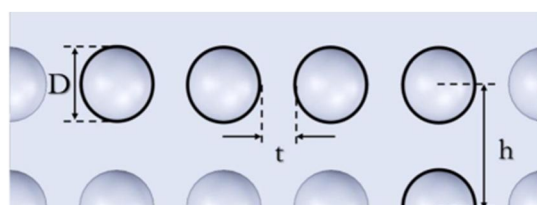


Fig. 1 Schematic of the tested parameters

شکل ۱ شماتیک پارامترهای مورد آزمایش

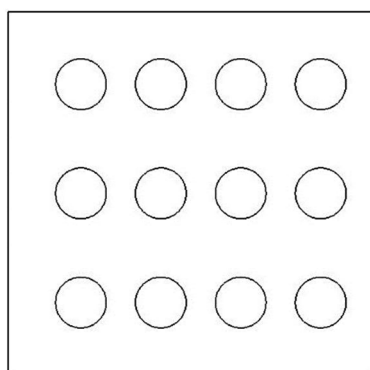


Fig. 2 Schematic view of SC structure

شکل ۲ نمای شماتیک از ساختار SC

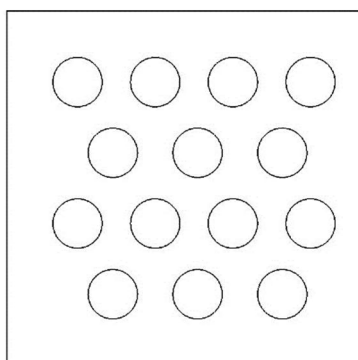


Fig. 3 Schematic view of BCC structure

شکل ۳ نمای شماتیک از ساختار BCC

جدول ۱ متغیرها و سطوح پیشنهادی برای هر متغیر

متغیر	سطوح
قطر حفره (mm)	3, 2, 1
فاصله حفره‌ها در راستای محور X (mm)	13, 10, 7
فاصله حفره‌ها در راستای محور Y (mm)	3, 2, 1

جدول ۲ طراحی آزمایش پیشنهادی بر اساس روش RSM

شماره آزمایش	t (mm)	h (mm)	D (mm)
1	2	1	13
2	2	2	10
3	1	2	13
4	2	2	10
5	1	1	10
6	2	3	7
7	2	2	10
8	2	1	7
9	3	3	10
10	3	2	13
11	1	2	7
12	3	1	10
13	3	2	7
14	1	3	10
15	2	3	13

<sup>1</sup> Simple Cubic

<sup>2</sup> Body Center Cubic

پایین در آباکوس می‌تواند شروع شکست، رشد آسیب و حالت‌های شکست مواد را پیش‌بینی کند که می‌تواند بینشی در مورد رفتار مواد در طول ضربه ایجاد کند. استفاده از روش آسیب جانسون-کوک<sup>۲</sup> در شبیه‌سازی ضربه سرعت پایین در آباکوس درک دقیقی از رفتار ماده در طول رویداد ضربه تا شکست آن ارائه می‌دهد. از این اطلاعات برای بهینه‌سازی مواد و بهبود مقاومت در برابر ضربه آن‌ها در کاربردهای مختلف خودرو، هوافضا و نظامی می‌توان استفاده کرد. با توجه به توضیحات داده شده از ضرایب جدول ۴ برای آلومینیوم ۳۵۶ در شبیه‌سازی استفاده شد.

جدول ۴ ضرایب آسیب جانسون-کوک برای آلومینیوم ۳۵۶ [۱۹]

Table 4 Johnson-Cook damage coefficients for aluminum 356 [19]

d1	d2	d3	d4	d5	T <sub>melt</sub>	T <sub>trans</sub>	Ref strain
0.1	0.2	-1.3	0.005	0	775°C	294°C	1

با توجه به اینکه اطلاعات خروجی گرفته شده از نرم‌افزار بر حسب انرژی-جابه‌جایی است برای مقایسه نمونه‌ها از مساحت زیر نمودارها استفاده شد. بر اساس تحلیل شبیه‌سازی بهترین عملکرد در بین نمونه‌ها برای هر دو حالت SC و BCC نمونه‌های آزمایشی پیشنهادی شماره‌های ۸ و ۱۱ است که از این به بعد برای اختصار 8SC، 11SC، 8BCC و 11BCC بیان شده‌اند.

#### ۴- نحوه ساخت فوم

روش ریخته‌گری با استفاده از فوم از دست رفته<sup>۳</sup>، مشکلات ریخته‌گری متداول در ساخت قطعات پیچیده را به‌طور قابل ملاحظه‌ای حل کرده است. با استفاده از این روش، نیاز به ریخته‌گری چندتکه، تغذیه و ماهیچه کاهش یافته و فرایندهای ثانویه مانند ماشین‌کاری نیز کاهش می‌یابد. به همین ترتیب، کیفیت قطعه افزایش می‌یابد و همچنین هزینه و زمان تولید کاهش می‌یابد. استفاده از قالب فومی باعث الگوبرداری دقیق از این روش می‌تواند یک راه‌حل ایده‌آل برای تولید قطعات پیچیده با کیفیت بالا و با کاهش هزینه و زمان تولید باشد [۲۰].

در روش ریخته‌گری با استفاده از الگوهای فومی پلیمری، از این الگوها برای ساخت اجزا فلزی استفاده می‌شود. در این روش، فوم‌های پلیمری با شکل‌های مورد نظر ساخته شده و سپس توسط مواد نسوزی پوشش داده می‌شوند [۲۱]. روش ریخته‌گری با فوم از دست رفته برای ساخت قطعات با دیواره نازک، هندسه پیچیده و سطح صاف استفاده می‌شود [۲۲].

به دلیل زمان‌گیر بودن تحلیل کل فوم تولیدی به شبیه‌سازی سلول واحد به دلیل تقارن نمونه‌ها استفاده شد که در شکل ۴ نمایی از آن در نرم‌افزار قابل مشاهده است. [۱۸]

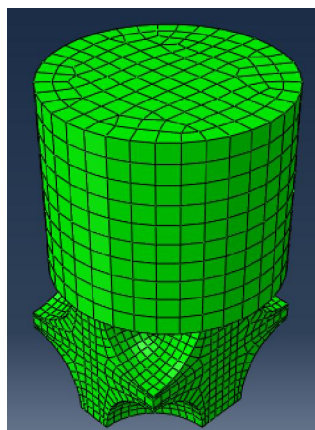


Fig. 4 A view of foam simulation

شکل ۴ نمایی از شبیه‌سازی فوم‌ها

برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس ۶/۱۴ استفاده و خواص مکانیکی آلومینیوم ۳۵۶ بر اساس نمودار شکل ۵ تعریف گردید.

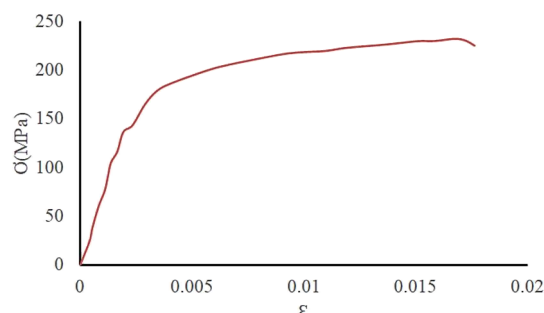


Fig. 5 True stress-strain diagram of aluminum 356

شکل ۵ نمودار تنش- کرنش حقیقی آلومینیوم ۳۵۶

از ساختار الاستیک-پلاستیک همسانگرد برای مدل‌سازی استفاده شد. برای اعمال سرعت نقطه مرجع<sup>۱</sup> برای جسم صلب ضربه زننده در نظر گرفته شد. برای مش بندی فوم از مش شش‌وجهی و حل‌گر صریح با تعداد مش حدوداً ۳۴۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای آسیب در شبیه‌سازی ضربه سرعت کم در آباکوس برای پیش‌بینی تکامل آسیب و شکست مواد در طول ضربه استفاده می‌شوند. شبیه‌سازی ضربه سرعت پایین در تحلیل پاسخ ضربه مواد و سازه‌های مختلف مانند مواد کامپوزیتی، صفحات فلزی و سازه‌های خودرو ضروری است. استفاده از پارامترهای آسیب در طول شبیه‌سازی ضربه سرعت

<sup>2</sup> Johnson-Cook Damage Model

<sup>3</sup> Lost Foam Casting

<sup>1</sup> Reference Point

سانتی‌گراد تنظیم می‌شود. قالب نهایی در حوالی دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، پس از آن که EPS در داخل گوی‌ها بخار می‌شود و فقط پوسته خارجی نسوز آن‌ها می‌ماند، از کوره خارج می‌شوند. علت شروع گرم کردن نمونه‌ها از دمای محیط این است که اگر EPS به‌طور ناگهانی و در دمای بالا وارد کوره شوند، متلاشی می‌شوند. تا زمان ذوب آلومینیوم، قالب هر یک از نمونه‌ها در ماسه قرار می‌گیرد و با استفاده از یک مشعل گاز، عملیات پیش گرم روی قالب‌ها انجام می‌شود. سپس مذاب از داخل کوره خارج شده و عملیات ریخته‌گری بر روی هر یک از نمونه‌ها انجام می‌شود. بعد از ریختن مذاب، حدود دو دقیقه صبر می‌شود تا آلومینیوم به‌طور کامل به داخل منافذ نفوذ کند و جامد شود. سپس نمونه‌های فوم درون یک محفظه آب غوطه‌ور شده و سرد می‌شوند. بعد از سرد شدن قالب نمونه‌ها، مفتول‌هایی که برای نگه‌داشتن EPSها داخل قالب قرار دارند، از کناره‌های قالب با استفاده از سنگ فرز دستی جدا شدند. سپس با استفاده از یک دستگاه پرس پیچی نمونه‌ها از داخل قالب‌ها خارج گردید. پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب و به دلیل اینکه اندازه نمونه‌ها کمی بزرگ‌تر از ابعاد مورد نیاز است، با استفاده از دستگاه تراش، مقدار اضافی برداشته شده تا سطح نمونه‌ها کاملاً صاف شود که در شکل ۷ قابل مشاهده است.



Fig. 7 Sample after turning operation

شکل ۷ نمونه بعد از عملیات تراش کاری

#### ۵- آزمون‌های تجربی

آزمون نمونه‌ها تحت ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه وزنه سقوطی<sup>۲</sup> در محل آزمایشگاه رفتار دینامیکی مواد دانشگاه صنعتی سهند انجام گرفت. برای این آزمایش از یک وزنه ۵۰ کیلوگرمی که از ارتفاع سه متر سقوط می‌کند استفاده شد که در

#### ۴-۱- پوشش دهی نمونه‌های پلی استایرن<sup>۱</sup>

برای تهیه گوی‌های توخالی، دوغاب سرامیکی از مخلوط مواد دیرگداز، آب و سیلیکات سدیم تهیه می‌شود؛ سپس محلول به مدت یک ساعت در حالت استراحت قرار داده می‌شود تا ترکیب به‌طور کامل در مواد دیرگداز نفوذ کند و غلظت اولیه محلول کاهش یابد. نسبت استفاده از هر ماده در دوغاب سرامیک به‌صورت زیر است: ۲۰٪ آب، ۶۵٪ مواد دیرگداز و ۱۵٪ سیلیکات سدیم [۲۳].

بعد از آماده شدن دوغاب، مفتول‌های فولادی با قطر ۰/۵ میلی‌متر از گوی‌های EPS (استایروفوم) عبور داده شده و به‌طور کامل درون محلول غوطه‌ور می‌شوند. گوی‌های پوشش داده شده از دوغاب خارج می‌شوند و در دمای اتاق قرار می‌گیرند. قبل از خشک شدن کامل، گوی‌های EPS از مفتول جدا شده و در صورت نیاز، با گوشه‌گیری به‌صورت کروی کامل می‌شوند. در شکل ۶، نمونه پوشش نهایی روی EPS با ضخامت تقریبی ۴۰۰ میکرون مشاهده می‌شود.



Fig. 6 Coating thickness 300-400 microns

شکل ۶ ضخامت پوشش ۳۰۰-۴۰۰ میکرون

#### ۴-۲- ریخته‌گری نمونه‌های فوم

برای قالب‌بندی نمونه‌ها، از پروفیل‌های آهنی با سطح مقطع مربعی به ابعاد ۳۰×۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۵ میلی‌متر (کمی بیشتر از ارتفاع مورد نیاز) استفاده شد. سپس با توجه به نوع نمونه‌های انتخابی، قالب‌ها با استفاده از دستگاه CNC سوراخ کاری شدند. به‌منظور نگه‌داشتن فضاها از مفتول‌های نازک فولادی استفاده شد. آلیاژ آلومینیوم مورد نظر در داخل قالب ذوب قرار می‌گیرد. سپس گوی‌های EPS پوشش داده شده نیز در قالب نهایی چیده می‌شوند و هر دو داخل کوره قرار می‌گیرند. برای کاهش ویسکوزیته ذوب، دمای کوره ۸۵۰ درجه

<sup>۲</sup> Drop Weight

<sup>۱</sup> EPS





Fig. 9 356 aluminum sample after testing

شکل ۹ نمونه آلومینیوم ۳۵۶ بعد از آزمایش

در شکل ۱۰ حفره‌های کروی ایجاد شده در داخل نمونه با استفاده از روش ریخته‌گری با فوم از دست رونده قابل مشاهده است.



Fig. 10 Cavities created by lost foam casting

شکل ۱۰ حفره‌های ایجاد شده با ریخته‌گری فوم از دست رونده

## ۶- بحث و نتایج

### ۶-۱- رفتار مکانیکی نمونه‌ها تحت آزمون

در این بخش به بررسی نتایج و مقایسه آن‌ها بر اساس نمودار انرژی-جابجایی مطابق شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ پرداخته شده است. فوم‌های سلول بسته با اندازه حفره کوچک‌تر و منظم‌تر در جذب انرژی بهتر از فوم‌هایی با اندازه حفره بزرگ‌تر و نامنظم عمل می‌کنند. این امر به دلیل این است که حفره‌های کوچک‌تر سطح بیشتری را برای اتلاف انرژی فراهم می‌کنند و همچنین اتصال بیشتری بین سلول‌های فوم ایجاد می‌کنند که قابلیت جذب و اتلاف انرژی را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، اندازه‌های کوچک‌تر حفره، احتمال تشکیل تمرکز تنش در فوم را کاهش می‌دهند که می‌تواند منجر به شکست و کاهش ظرفیت جذب انرژی فوم شود. بنا به توضیحات داده شده فوم‌های با قطر ۷ میلی‌متر عملکرد بهتری نسبت به سایر قطرها داشتند.

شکل ۸ نمونه آماده شده برای انجام آزمون قابل مشاهده است. نویسندگان روش‌های مختلفی مانند استفاده از لودسل (حس‌گر نیرو)، فشارسنج، شتاب‌سنج و تکنیک لیزر داپلر آنومتری<sup>۱</sup> (LDA) را برای به دست آوردن نیروی یک ضربه اعمال شده پیشنهاد داده‌اند [۲۴-۲۹]. با توجه به لوازم جانبی دستگاه آزمون، همچنین با توجه به اینکه در بیشتر موارد، نیروی به‌دست‌آمده از یک شتاب‌سنج با آنچه از کرنش‌سنج به دست می‌آید، مطابقت دارد [۳۰]، در مطالعه حاضر یک شتاب‌سنج (Sinocera CA-YD-111) با حساسیت  $0.0054\text{pC/ms}^2$  و محدوده فرکانس 2-10kHz برای اندازه‌گیری نیروی ضربه که دارای حد ضربه 50g است برای اندازه‌گیری شتاب ضربه اعمال شده بر روی ضربه‌گیر نصب شد تا شتاب ضربه اعمال شده را حس کند، به طوری که نمودار خروجی به‌عنوان شتاب  $\text{m/s}^2$  به دست آمد. از نمودار شتاب به‌دست‌آمده، اولین پیک شتاب ضربه اعمال شده با دقت میلی‌ثانیه تعیین شد. از تکنیک فیتینگ برای خلاص شدن از شر نوسانات ناخواسته استفاده شد؛ بنابراین، نمودار نیرو-جابجایی اندازه‌گیری شد. برای ارزیابی تکرارپذیری آزمایش‌ها و اطمینان از صحت داده‌های به‌دست‌آمده، برای هر مورد آزمایشی، پنج آزمایش انجام شد. در نهایت، نمودارهای نهایی با میانگین‌گیری نتایج به دست آمد.



Fig. 8 Sample prepared for testing

شکل ۸ نمونه آماده شده برای انجام آزمایش

تغییر شکل نمونه‌ها بعد از آزمایش ضربه در شکل ۹ قابل مشاهده است.

<sup>1</sup> Laser Doppler Anemometry

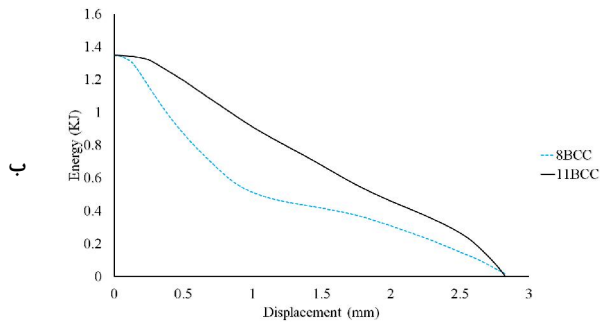


Fig. 11 Comparison of foam behavior for two structures a) SC and b) BCC

شکل ۱۱ مقایسه رفتاری فوم برای دو ساختار الف) SC و ب) BCC

پس از بررسی جداگانه فوم‌ها، در شکل ۱۲ رفتار تمامی فوم‌ها قرار گرفت که بر اساس توضیحات داده شده بهترین عملکرد برای فوم با ساختار 11SC است.

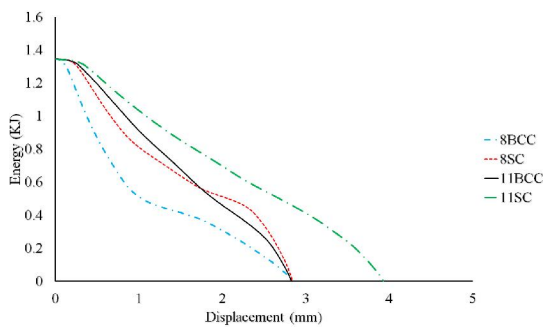


Fig. 12 Behavioral comparison of all tested samples

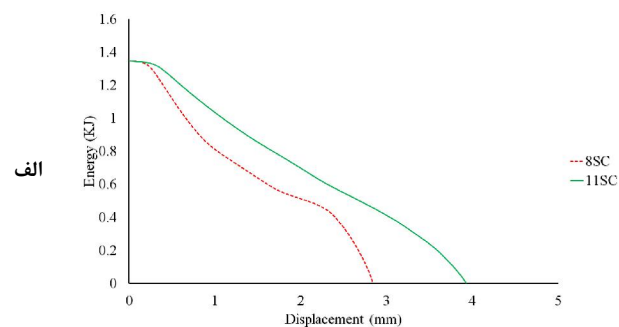
شکل ۱۲ مقایسه رفتاری تمام نمونه‌های مورد آزمایش

سطح زیر نمودار نیرو-جاب‌جایی در فوم سلول بسته در طول ضربه سرعت کم می‌تواند برای تخمین مقدار انرژی جذب شده توسط فوم در طول ضربه استفاده شود. همان‌طور که فوم دچار تغییر شکل می‌شود، در برابر نیروی وارد شده به آن مقاومت می‌کند. از این رو، ناحیه زیر نمودار نیرو-جاب‌جایی نشان دهنده کار انجام شده توسط نیروی اعمال شده بر روی فوم است. در فوم‌هایی که ضربه‌ای با سرعت کم را تجربه می‌کنند، ناحیه زیر نمودار نیرو-جاب‌جایی نشان‌دهنده انرژی جذب‌شده توسط فوم در طول ضربه است؛ بنابراین، هر چه مساحت زیر نمودار نیرو-جاب‌جایی بزرگ‌تر باشد، انرژی بیشتری توسط فوم در طول رویداد ضربه جذب می‌شود.

بر اساس مطالب بیان‌شده، به دلیل این‌که مقدار مساحت زیر سطح نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه ۱۱ در شکل ۱۳ الف بیشتر از نمونه ۸ است، عملکرد بهتری دارد. این مقدار در شکل ۱۳ ب نیز همان‌گونه بوده و نمونه ۱۱ عملکرد بهتری نسبت به نمونه ۸ دارد.

هنگامی که فوم در معرض ضربه‌ای با سرعت کم قرار می‌گیرد، سلول‌های فوم شروع به تغییر شکل الاستیک می‌کنند تا نقطه بحرانی را که در آن دچار تغییر شکل پلاستیکی می‌شوند، برسند. نمودار انرژی-جاب‌جایی برای فوم مقدار انرژی جذب شده توسط فوم را به‌عنوان تابعی از تغییر شکل فوم در طول ضربه نشان می‌دهد. در ابتدا، زمانی که فوم دچار تغییر شکل الاستیک می‌شود، تنها مقدار کمی انرژی جذب می‌شود و این منجر به شیب کم در نمودار انرژی-جاب‌جایی می‌شود. با این حال، زمانی که فوم به نقطه تغییر شکل پلاستیکی خود می‌رسد، مقدار بیشتری انرژی جذب می‌شود که منجر به شیب تندتری می‌شود. هنگامی که فوم وارد فاز تغییر شکل پلاستیکی خود می‌شود، سلول‌های فوم شروع به فروریختن می‌کنند و فرایند تغییر شکل پلاستیک بیشتر ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی فوم را اشغال می‌کند. این منجر به کاهش شیب نمودار انرژی-جاب‌جایی می‌شود. هنگامی که فوم به‌طور کامل فشرده می‌شود، شیب نمودار انرژی-جاب‌جایی با ورود فوم به فاز متراکم شدن به صفر می‌رسد. سطح زیر نمودار انرژی-جاب‌جایی نشان دهنده کار مورد نیاز برای تغییر شکل فوم است. این کار معمولاً به‌عنوان انرژی جذب شده توسط فوم در طول تغییر شکل نامیده می‌شود.

بر اساس شکل ۱۱ برای هر دو ساختار مورد مطالعه، حالت ۱۱ عملکرد بهتری نسبت به حالت ۸ دارد که علت اصلی آن تفاوت در ضخامت دیواره‌ها در راستای X و کم بودن این مقدار در حالت ۱۱ است (ضخامت دیواره ۱ میلی‌متر). هنگامی که یک فوم تحت ضربه یا نیروی فشاری قرار می‌گیرد، ضخامت دیواره‌ها تعیین می‌کند که چه مقدار انرژی توسط فوم جذب می‌شود. دیواره‌های نازک‌تر انعطاف‌پذیرتر هستند و بنابراین تغییر شکل بیشتر ساختار سلول را ممکن می‌سازند که این امر منجر به افزایش توانایی فوم برای توزیع و اتلاف انرژی در حجم بزرگ‌تر می‌شود.





حالت شبیه‌سازی و تجربی در کمترین حالت ۱۰ و در بیشترین حالت حدود ۳۰٪ می‌باشد.

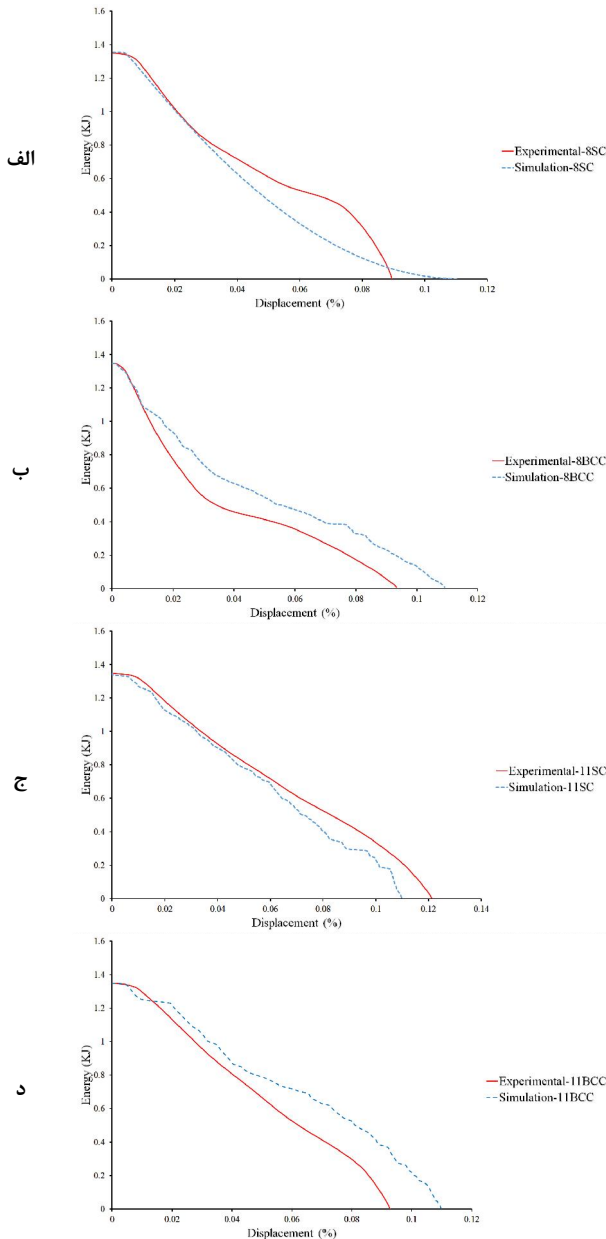


Fig. 15 Comparison of simulation and experimental mode a) 8SC b) 8BCC c) 11SC d) 11BCC

شکل ۱۵ مقایسه حالت شبیه‌سازی و تجربی الف) 8SC ب) 8BCC ج) 11SC د) 11BCC

جدول ۵ درصد اختلاف بین حالت شبیه‌سازی و تجربی

Table 5 Difference percentage between simulation and experimental mode

نام نمونه	8SC	8BCC	11SC	11BCC
اختلاف (%)	14	29	9.6	22

دلیل این‌که شبیه‌سازی و نتایج تجربی ممکن است متفاوت باشد، این است که شبیه‌سازی‌ها بر اساس فرضیات و

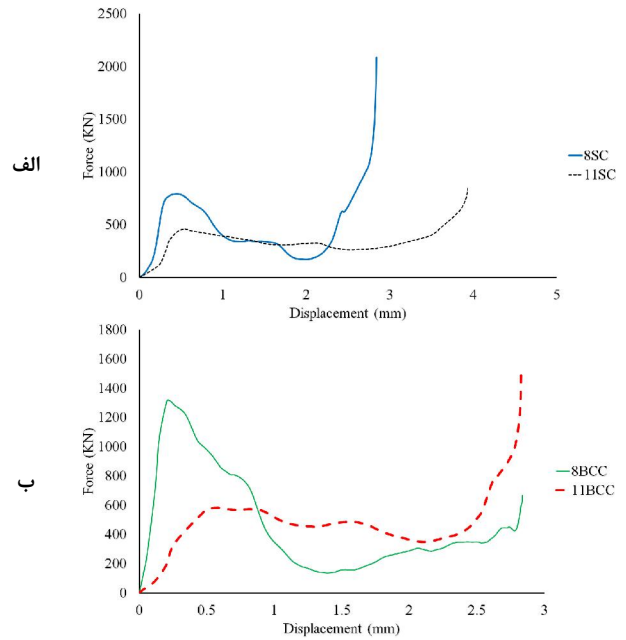


Fig. 13 Behavioral comparison of all tested samples

شکل ۱۳ مقایسه رفتاری تمام نمونه‌های مورد آزمایش

پس از بررسی جداگانه فوم‌ها، در شکل ۱۴ تمامی فوم‌ها قرار گرفت که بر اساس توضیحات داده شده بهترین عملکرد برای فوم با ساختار 11SC است.

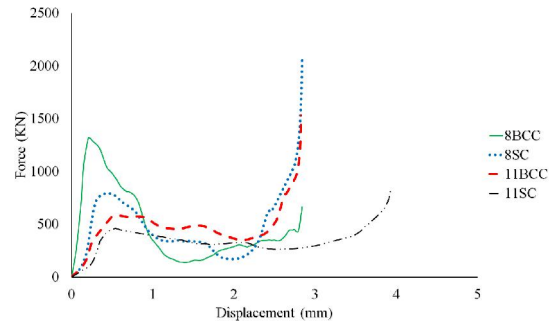


Fig. 14 Behavioral comparison of all tested samples

شکل ۱۴ مقایسه رفتاری تمام نمونه‌های مورد آزمایش

## ۷- صحه سنجی نتایج شبیه‌سازی

پس از شبیه‌سازی نمونه‌ها و تولید فوم‌ها برای بررسی میزان خطای دو حالت از نمودار انرژی-جاب‌جایی مطابق شکل‌های ۱۵ استفاده شد. علت اینکه بخش افقی نمودار که مربوط به جاب‌جایی می‌باشد به صورت درصد بیان شده است این امر می‌باشد که چون در شبیه‌سازی فقط یک سلول در نظر گرفته شده است برای آن‌که بتوان مقایسه درستی انجام داد از نسبت کل طول نمونه به میزان تغییر شکل پس از آزمایش استفاده شد. بر اساس محاسبات انجام شده از مساحت زیر نمودار انرژی-جاب‌جایی که در جدول ۵ قابل مشاهده است، میزان خطای دو

## ۹- مراجع

- [1] Y. Hangai, M. Saito, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa, Fabrication of aluminum foam-filled thin-wall steel tube by friction welding and its compression properties, *Materials*, vol. 7, pp. 6796-6810, 2014.  
<https://doi.org/10.3390/ma7096796>
- [2] J. Banhart, Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Progress in materials science*, vol. 46, pp. 559-632, 2001.  
[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00002-5)
- [3] M.F. Ashby, T. Evans, N. Fleck, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, L.J. Gibson, *Metal foams: a design guide*, Elsevier, 2000.
- [4] S. Benjamin, *Process for making foamlike mass of metal*, Google Patents, 1948.
- [5] H.P. Degischer, B. Kriszt, *Handbook of cellular metals*. vol. 71, Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
- [6] A.E. Simone, L.J. Gibson, Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams, *Acta Materialia*, vol. 46, pp. 2139-2150, 1998.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(97\)00421-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00421-7)
- [7] E. Andrews, W. Sanders, L.J. Gibson, Compressive and tensile behaviour of aluminum foams, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 270, pp. 113-124, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00170-7)
- [8] L.J. Vendra, A. Rabiei, A study on aluminum-steel composite metal foam processed by casting, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 465, pp. 59-67, 2007.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.037>
- [9] A. Rabiei, A.T. O'Neill, A study on processing of a composite metal foam via casting, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 404, pp. 159-164, 2005.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.05.089>
- [10] W.S. Sanders, L. Gibson, Mechanics of hollow sphere foams, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 347, pp. 70-85, 2003.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00583-X](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00583-X)
- [11] X. Xia, X. Chen, Z. Zhang, X. Chen, W. Zhao, B. Liao, B. Hur, Compressive properties of closed-cell aluminum foams with different contents of ceramic microspheres, *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 353-358, 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.040>
- [12] D. Ghosh, A. Wiest, R.D. Conner, Uniaxial quasistatic and dynamic compressive response of foams made from hollow glass microspheres, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 36, pp. 781-789, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.10.018>
- [13] S. Sahu, D.P. Mondal, J.U. Cho, M.D. Goel, M.Z. Ansari, Low-velocity impact characteristics of closed cell AA2014-SiCp composite foam, *Composites Part B: Engineering*, vol. 160, pp. 394-401, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.054>
- [14] M. Islam, M.A. Kader, P.J. Hazell, J.P. Escobedo, A.D. Brown, M. Saadatfar, Effects of impactor shape on the deformation and energy absorption of closed

ساده‌سازی‌ها هستند درحالی‌که آزمایش‌ها در معرض منابع مختلف خطاها قرار دارند. در شبیه‌سازی‌ها، شخص فرضیاتی را در مورد خواص مواد، شرایط مرزی و سایر عوامل مرتبط برای ساده‌سازی مدل و امکان‌پذیر ساختن محاسبات ایجاد می‌کند. باین‌حال، برخی از این فرضیات ممکن است دقیق نباشند و رفتار فیزیکی واقعی ساختار فوم سلول بسته را منعکس نکنند. از سوی دیگر، آزمایش‌ها تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله تغییرات در آماده‌سازی نمونه، تجهیزات اندازه‌گیری، شرایط محیطی و خطای انسانی قرار دارند. این عوامل می‌توانند بر نتایج تجربی تأثیر بگذارند یا منجر به اختلاف بین رفتار پیش‌بینی شده و واقعی ساختار فوم سلول بسته شوند. همچنین همان‌گونه که در جدول ۵ قابل مشاهده است، کمترین میزان اختلاف بین حالت شبیه‌سازی و تجربی برای ساختارهای SC و بیشترین اختلاف برای ساختارهای BCC می‌باشد که علت آن را در سخت‌تر بودن ساخت نمونه‌های BCC در عمل و تفاوت آن با حالت ایده‌آل شبیه‌سازی می‌توان جست‌وجو کرد.

## ۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سه پارامتر تأثیرگذار در فرایند ریخته‌گری برای آلومینیوم ۳۵۶ به روش مدل فومی فدا شونده بررسی و تأثیر آن‌ها بر رفتار ضربه سرعت پایین قطعات مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار و کاهش هزینه و تعداد نمونه‌ها از روش پاسخ سطح برای طراحی آزمایش استفاده شد. نتایج پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- هر چه اندازه دانه‌های تشکیل‌دهنده فوم کوچک‌تر باشد عملکرد بهتری داشته و جذب انرژی بالاتری دارد.
- در بین نمونه‌های با ساختار SC، بهترین عملکرد مربوط به نمونه ۱۱ است.
- در مقایسه بین نمونه‌های دارای مشخصات ساختاری شماره ۸، ساختار SC عملکرد بهتری دارد.
- در مقایسه بین نمونه‌های دارای مشخصات ساختاری شماره ۱۱، ساختار SC عملکرد بهتری دارد.
- با توجه به مقایسه انجام شده بین تمامی نمونه‌های تولیدی ساختار HSC بهترین عملکرد را دارد.
- میزان اختلاف بین حالت شبیه‌سازی و تجربی حدود بین ۱۰-۳۰٪ است.
- نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای ساختارهای SC همخوانی بهتری نسبت به ساختارهای BCC دارد.

- [22] M. Divandari, A.V. Golpayegani, Study of Al/Cu rich phases formed in A356 alloy by inserting Cu wire in pattern in LFC process, *Materials & Design*, vol. 30, pp. 3279-3285, 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.008>
- [23] F. Binesh, J. Zamani, M. Ghiasvand, Ordered structure composite metal foams produced by casting, *International Journal of Metalcasting*, vol. 12, pp. 89-96, 2018.  
<https://doi.org/10.1007/s40962-017-0143-x>
- [24] E. Wu, L. Chang, Woven glass/epoxy laminates subject to projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 16, pp. 607-619, 1995.  
[https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)00001-Q](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)00001-Q)
- [25] C. Shen, Z. Wu, Z. Gao, X. Ma, Sh. Qiu, Y. Liu, T. Sun, Impact protection behavior of NiTi shape memory alloy wires, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 700, pp. 132-139, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.097>
- [26] Y. Chen, I.M. May, Reinforced concrete members under drop-weight impacts, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, vol. 162, pp. 45-56, 2009.  
<https://doi.org/10.1680/stbu.2009.162.1.45>
- [27] F. Aymerich, P. Marcialis, S. Meili, P. Priolo, An instrumented drop-weight machine for low-velocity impact testing, *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 22, pp. 243-253, 1996.  
<https://doi.org/10.2495/SUSI960221>
- [28] J.L. Yu, X.Wang, Z.G. Wei, E.H. Wang, Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminum-foam core, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 28, pp. 331-347, 2003.  
[https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(02\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(02)00053-2)
- [29] H. Wang, K.R. Ramakrishnan, K. Shankar, Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores, *Materials & Design*, vol. 99, pp. 68-82, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.048>
- [30] H.M. Hsiao, I.M. Daniel, Strain rate behavior of composite materials, *Composites Part B: Engineering*, vol. 29, pp. 521-533, 1998.  
[https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(98\)00008-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00008-0)
- cell aluminium foams under low velocity impact, *Materials & Design*, vol. 191, pp. 108599, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108599>
- [15] S. Sahu, T.S. Reddy, G. Reddy, A. Gokhale, Low-velocity impact indentation rate sensitivity of aluminium foams, *Materials Today Communications*, vol. 24, pp. 101351, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101351>
- [16] M.A. Kader, P.J. Hazell, M.A. Islam, S. Ahmed, M.M. Hossain, J.P. Escobedo, M. Saadatfar, Strain-rate dependency and impact dynamics of closed-cell aluminium foams, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 818, pp. 141379, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141379>
- [17] S. Talebi, R. Hedayati, M. Sadighi, Dynamic crushing behavior of closed-cell aluminum foams based on different space-filling unit cells, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 21, pp. 99, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s43452-021-00251-1>
- [18] M.J. Nayyeri, S.M.H. Mirbagheri, D.H. Fatmehsari, Compressive behavior of tailor-made metallic foams (TMFs): Numerical simulation and statistical modeling, *Materials & Design*, vol. 84, pp. 223-230, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.116>
- [19] S. Khlifa, K. Homrani, L. Lammari, Y. Zayani, H. Kharroubi, Comparative Study Of The Effects Of Johnson Cook Parameters On The Constraints Applied To Metals During The Lamination Process By Numerical Modeling, *Journal Of Non-Oxide Glasses*, vol.13, no. 1, pp. 1-12, 2021.
- [20] H. Jafari, M.H. Idris, A. Shayganpour, Evaluation of significant manufacturing parameters in lost foam casting of thin-wall Al-Si-Cu alloy using full factorial design of experiment, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, pp. 2843-2851, 2013.  
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62805-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62805-8)
- [21] B. Xiao, Z. Fan, W. Jiang, X. Liu, W. Long, Q. Hu, Microstructure and mechanical properties of ductile cast iron in lost foam casting with vibration, *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 21, pp. 1049-1054, 2014.  
[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60182-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60182-5)