

## تولید فوم منیزیمی با استفاده از فرآیند فشردن سازی اصطکاکی اغتشاشی

**چکیده:** با توجه به خواص منحصر به فرد فوم های فلزی نظیر چگالی پایین، استحکام مناسب، زیست سازگاری و قابلیت جذب انرژی، در این پژوهش ساخت فوم منیزیمی با استفاده از فرآیند فشردن سازی اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفت. در این روش، پودر منیزیم همراه با ذرات کلرید سدیم به عنوان ماده نگهدارنده فضا به صورت یکنواخت مخلوط شده و درون قالب فلزی ریخته شد. سپس با استفاده از ابزار چرخان، حرارت اصطکاکی و فشار اعمال شده موجب فشردن سازی و اتصال پودرها گردید. برای حذف ذرات نگهدارنده فضا، نمونه ها در حلال دی متیل فرم آمید قرار داده شدند که بدون ایجاد واکنش با منیزیم، امکان انحلال نمک و ایجاد ساختار فومی را فراهم نمود. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه ها شامل مقاومت فشاری، ریز ساختار، چگالی و تخلخل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد فوم های تولیدی دارای ساختاری یکنواخت و متخلخل بوده و دارای خواص مکانیکی قابل توجهی هستند. رفتار فشاری نمونه ها نیز بیانگر قابلیت مناسب جذب انرژی و پایداری مکانیکی بود. همچنین، تحلیل ریز ساختاری حاکی از توزیع نسبتاً یکنواخت تخلخل و عدم تشکیل نواحی متراکم یا ترک دار است.

**واژه های راهنما:** فشردن سازی اصطکاکی اغتشاشی، فوم فلزی، منیزیم، تخلخل، ریز ساختار، مقاومت فشاری

سید مرتضی عباسزاده

کارشناسی ارشد

رضا عبدی بهنق\*

دانشیار

سامان خلیل پور آذری

دانشیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی ارومیه،

ارومیه

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

Seyed Morteza  
Abaszadeh  
M.Sc.

Reza Abdi Behnagh\*  
Associate Professor

Saman  
Khalilpour Azari  
Associate Professor,  
Department of Mechanical  
Engineering, Urmia  
University of Technology,  
Urmia

## Production of magnesium foam using the friction stir consolidation process

**Abstract:** Due to the unique properties of metallic foams, such as low density, suitable strength, biocompatibility, and energy absorption capability, this study investigates the fabrication of magnesium foam using the Friction Stir Consolidation (FSC) process. In this method, magnesium powder was uniformly mixed with sodium chloride particles as a space holder and poured into a metal mold. Then, using a rotating tool, the applied frictional heat and pressure led to the compaction and sintering of the powders. To remove the space-holding particles, the samples were immersed in dimethylformamide (DMF), which, without reacting with magnesium, dissolved the salt and enabled the formation of the foam structure. The physical and mechanical properties of the samples, including compressive strength, microstructure, density, and porosity, were evaluated. The results showed that the produced foams exhibited a uniform and porous structure, along with significant mechanical properties. The compressive behavior of the samples indicated good energy absorption capability and mechanical stability. Moreover, microstructural analysis revealed a relatively uniform pore distribution with no dense regions or cracks.

**Keywords:** Friction stir consolidation, Metallic foam, Magnesium, Porosity, Microstructure, Compressive strength

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با هدف کاهش وابستگی به منابع حرارتی خارجی و ساده‌سازی فرآیند تولید، روش‌های حالت‌جامد نظیر فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی<sup>۳</sup> معرفی شده‌اند [۵]. در این روش که پیشتر به عنوان یک روش بازیافت حالت جامد شناخته شده است، گرمای مورد نیاز برای تف‌جوشی و اتصال پودرها یا براده‌های فلزی از طریق اصطکاک حاصل از ابزار چرخان و فشار مکانیکی اعمال‌شده تأمین می‌گردد. بدین ترتیب، بدون نیاز به کوره یا منابع حرارتی خارجی می‌توان پودرهای فلزی را فشرده و به ساختار نهایی نزدیک کرد. مزایای روش فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی شامل کاهش مصرف انرژی، عدم نیاز به اتمسفر کنترل‌شده، زمان فرآیند کوتاه، امکان انجام با دستگاه‌های ماشین‌کاری متداول و سازگاری بیشتر با محیط‌زیست است [۶]. در فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی، اتصال ذرات فلزی عمدتاً از طریق ترکیبی از تغییر شکل پلاستیک شدید، افزایش دمای موضعی ناشی از اصطکاک و شکست لایه‌های اکسیدی سطحی ذرات صورت می‌گیرد. تنش‌های برشی بالا و جریان پلاستیک مواد در ناحیه تماس ابزار موجب تماس فلز-فلز تازه، نفوذ اتمی محدود و در نهایت ایجاد پیوندهای حالت‌جامد بین ذرات می‌شود. همزمان، پدیده بازبلوری دینامیکی می‌تواند منجر به تشکیل دانه‌های ریز و بهبود پیوستگی ریزساختار گردد [۷]. این مکانیزم‌ها امکان اتصال مؤثر ذرات منیزیم را بدون نیاز به ذوب یا تف‌جوشی کوره‌ای فراهم می‌کنند.

بررسی پیشینه پژوهش‌ها در زمینه فرایند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی نشان می‌دهد که این روش در سال‌های اخیر به‌عنوان روشی نوین و کارآمد برای بازیافت براده‌های فلزی مورد توجه قرار گرفته است. برای نمونه، کاتالینی و همکارانش از این فرایند برای فشرده‌سازی پودر فولاد تقویت‌شده با ذرات اکسیدی استفاده کردند و قطعاتی با تخلخل پایین تولید نمودند [۷]. همچنین در پژوهشی دیگر توسط همان گروه، ریزساختار بازبلوری‌شده‌ای با دانه‌های ریز و توزیع یکنواخت حاصل شد که نشان‌دهنده کیفیت بالا و چگالی مناسب در کامپوزیت‌های زمینه فلزی تولیدی بود. والن و همکاران نیز توانستند پودرهای ترموالکتریک BizTe<sub>3</sub> را به کمک این روش به‌صورت قطعه حجیم و کم‌تخلخل درآورند [۸]. در ادامه، نارون و همکاران استفاده موفق از این روش را در تولید کامپوزیت پایه منیزیم با استفاده از براده‌های ماشین‌کاری و ذرات نانویی کاربید سیلیسیم گزارش کردند [۹].

فوم‌های فلزی به‌دلیل خواص منحصربه‌فردی نظیر چگالی پایین، استحکام ویژه بالا، قابلیت جذب انرژی، رسانایی گرمایی مناسب و در مواردی زیست‌سازگاری، در سال‌های اخیر مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. این مواد در کاربردهای مهندسی نظیر جذب ضربه، تبادل حرارت، فیلترسازی و همچنین در حوزه‌های زیست‌پزشکی نظیر ایمپلنت‌های موقت، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند [۱]. از میان فلزات مختلف، منیزیم به‌دلیل چگالی بسیار پایین، توانایی جذب انرژی ویژه بالا، زیست‌تخریب‌پذیری و در دسترس بودن، گزینه‌ای بسیار مناسب برای تولید فوم‌های فلزی سبک‌وزن و زیست‌سازگار محسوب می‌شود [۳].

روش‌های متعددی برای تولید فوم‌های منیزیمی وجود دارد که هر کدام مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. از جمله این روش‌ها می‌توان به متالورژی پودر، نفوذ مذاب و روش‌های مبتنی بر نگهدارنده فضا اشاره کرد. با این حال، بسیاری از این روش‌ها نیاز به تجهیزات پیچیده، هزینه‌های تولید بالا و یا کنترل دقیق پارامترهای فرآیندی دارند.

یکی از روش‌های رایج ساخت فوم‌های فلزی، فرآیند تف‌جوشی و انحلال<sup>۱</sup> است. در این روش، ترکیبی از پودر فلز پایه و ذرات محلول در آب نظیر کلرید سدیم به‌عنوان نگهدارنده‌های فضا با نسبت مشخص مخلوط شده، فشرده و سپس در کوره تحت شرایط کنترل‌شده تف‌جوشی می‌گردند. پس از تف‌جوشی، نمونه در آب یا حلال مناسب قرار می‌گیرد تا ذرات محلول حذف و ساختار متخلخل نهایی حاصل شود [۴]. با تنظیم نسبت اجزای مخلوط و انتخاب اندازه و شکل مناسب ذرات نگهدارنده فضا می‌توان به کنترل قابل‌قبولی بر تخلخل، اندازه حفرات و توزیع آن‌ها دست یافت. با این حال، برای فلزاتی مانند منیزیم که نقطه ذوب پایین و حساسیت بالایی به اکسیداسیون دارند، اعمال دماهای بالا در کوره می‌تواند منجر به واکنش‌های ناخواسته، احتراق و کاهش کیفیت نهایی شود. همچنین، این فرآیندها نیازمند تجهیزات خاص، مصرف بالای انرژی و زمان طولانی هستند. به عنوان نمونه در سال ۲۰۲۲، فوم‌های آلایژ منیزیم AZ91 با تخلخل بالا و با استفاده از فناوری ریخته‌گری دقیق توسط کاپلون و همکاران ساخته شدند [۴]. نتایج نشان داد فوم‌هایی با حفره کوچکتر و تخلخل کمتر خواص مکانیکی بهتری دارند و با پوشش‌دهی اکسیداسیون پلاسمای الکترولیتی<sup>۲</sup> قابلیت استفاده به عنوان ایمپلنت‌های موقت زیست‌جذب‌پذیر را دارند.

<sup>3</sup> Friction stir consolidation<sup>1</sup> Sintering and dissolution process<sup>2</sup> Plasma electrolytic oxidation

ابتدا اجزای قالب و ابزار هم‌زنی جهت انجام فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی با کمک نرم‌افزار سالدورکس<sup>۱</sup> طراحی شدند. قالب به صورت دو نیمه با برش طولی طراحی شد تا امکان جداسازی نمونه تولید شده به راحتی فراهم شود. این نیمه‌ها از فولاد ابزار گرم‌کار H13 ساخته شدند و پس از انجام عملیات حرارتی سختی آن‌ها به بیش از ۵۵ راکول افزایش یافته تا مقاومت لازم در برابر دما و فشارهای فرآیند حفظ شود. محفظه قرارگیری پودر در دو نیمه قالب به شکل حفره‌ای استوانه‌ای با قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر و عمق ۵۵ میلی‌متر در دو نیمه قالب ایجاد گردیده و با پیچ و پین راهنما به هم متصل شد. ابزار هم‌زنی چرخان نیز از جنس فولاد H13 به قطر داخلی ۲۰ میلی‌متر طراحی شد. برای ایجاد امکان حرکت ابزار چرخان در حفره قالب مقداری لقی به میزان ۰/۰۵ میلی‌متر بین آن‌ها در نظر گرفته شد. سطح پیشانی ابزار دارای الگوی مارپیچ با عمق ۱/۵ میلی‌متر و عرض ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد تا جریان مواد را تسهیل و دمای اصطکاکی را افزایش دهد. تصاویر مربوط به قطعات قالب و ابزار چرخان ساخته شده در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱ قالب دو تکه و ابزار چرخان

مخلوط پودر منیزیم و کلرید سدیم درون محفظه قالب ریخته شده و قالب در دستگاه فرز یونیورسال ثابت می‌شود. انتخاب پارامترهای فرآیند بر اساس مطالعات پیشین و آزمون‌های مقدماتی انجام شد. ابزار هم‌زنی چرخان با سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه وارد محفظه می‌شود و تا رسیدن به طول کورس نهایی حرکت می‌کند. ابزار پس از رسیدن به کورس مورد نظر به مدت ۳۰ ثانیه با حفظ سرعت دورانی توقف می‌کند و سپس به سمت بالا حرکت کرده و از درون حفره تا یک فاصله ایمن خارج می‌شود. در طی فرآیند، حرارت ناشی از اصطکاک باعث اتصال ذرات منیزیم شده و ساختار متراکم استوانه‌ای شکل می‌گیرد. در مرحله بعد، برای حذف کلرید سدیم از ساختار شکل گرفته، از

در تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۹، عبدی بهنق و همکاران از فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی برای بازیافت براده‌های منیزیم خالص استفاده کردند [۱۰]. نتایج آن‌ها بیانگر تولید قطعات بدون تخلخل با دانه‌بندی ریز، سختی افزایش یافته (حدود دو برابر فلز پایه) و رفتار سایشی بهتر نسبت به نمونه پایه بوده است. عدنان و همکاران، فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی را برای بازیافت براده‌های آلیاژ AZ31B منیزیم بررسی کرده و تأثیر زمان فرآیند بر کیفیت بیلت‌های تولیدی را ارزیابی کردند [۶]. استفاده از این روش در بازیافت براده‌ها با جنس‌های مختلف در سال‌های اخیر ادامه داشته است [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴]، [۱۵].

این پژوهش یک رویکرد نوین حالت جامد برای تولید فوم منیزیمی ارائه می‌دهد که در آن، فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی برای نخستین بار در کنار ذرات نگهدارنده فضا به کار گرفته شده است. همچنین، حذف کلرید سدیم با استفاده از حلال دی‌متیل‌فرم‌آمید به منظور جلوگیری از خوردگی منیزیم انجام شده است. در ادامه، ارتباط میان پارامترهای فرآیند، ریزساختار ایجاد شده و رفتار مکانیکی فشاری فوم منیزیمی به صورت تحلیلی بررسی شده است.

نتایج این پژوهش می‌تواند راهگشای توسعه روش‌های نوین و کم‌هزینه تولید فوم‌های فلزی، به‌ویژه در شرایطی باشد که کنترل ساختار نهایی و خواص مکانیکی اهمیت بالایی دارند.

## ۲- انتخاب مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از پودر منیزیم با خلوص ۹۹٪ و متوسط اندازه ذرات حدود ۳۵۰ میکرومتر به‌عنوان ماده پایه استفاده شده است. منیزیم به دلیل وزن سبک، استحکام مناسب و قابلیت تشکیل ساختارهای متخلخل برای تولید فوم‌های فلزی گزینه‌ای ایده‌آل محسوب می‌شود. برای ایجاد ساختار متخلخل در فوم از ذرات نگهدارنده فضا استفاده شد که پس از فرآیند فشرده‌سازی حذف می‌گردند. در این مطالعه، پودر کلرید سدیم با اندازه متوسط ذرات ۲۵۰ میکرومتر به عنوان ماده نگهدارنده فضا انتخاب شد. نسبت حجمی مخلوط پودر منیزیم و کلرید سدیم ۵۰/۵۰ بوده و به میزان ۳ گرم از هر پودر به همراه مقداری ایزوپروپیل الکل به عنوان چسب برای چسباندن ذرات به یکدیگر استفاده گردید؛ به‌گونه‌ای که امکان تشکیل فوم متخلخل بدون فروپاشی ساختار در حین فشرده‌سازی فراهم گردد.

<sup>۱</sup> SolidWorks

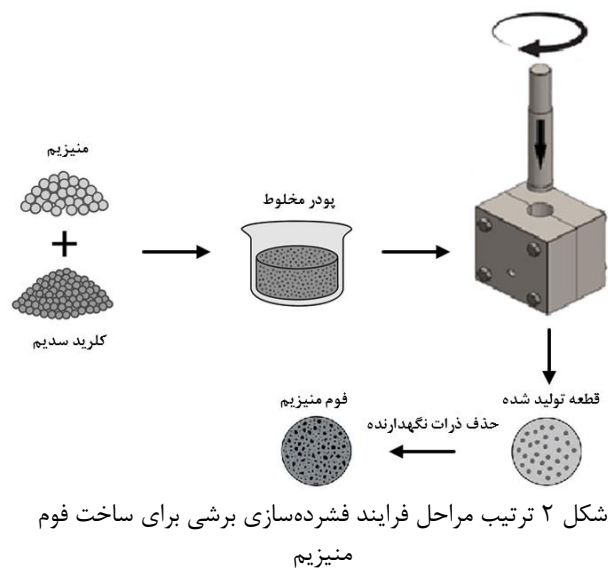
پیش از حذف ذرات نگهدارنده فضا (کلرید سدیم) برابر با ۴ گرم بود. با توجه به اینکه وزن کل مواد اولیه بیش از این مقدار بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که بخشی از ذرات نگهدارنده فضا در فرآیند فشرده‌سازی مشارکت نکرده‌اند یا در حین خروج قطعه از قالب از مخلوط جدا شده‌اند. همچنین، به دلیل وجود لقی میان ابزار و دیواره قالب، بخشی از مواد در هنگام فرآیند به صورت پلیسه از سیستم خارج شده‌اند. تصاویر ارائه‌شده در شکل (۳) نمایی کلی از نمونه تولیدی را پیش و پس از حذف نگهدارنده فضا را نشان می‌دهند. در شکل (۳-الف)، نمونه‌ی فوم منیزیم پیش از حذف نمک قابل مشاهده است. سطح خارجی که در تماس با دیواره قالب بوده، صاف و بدون چسبندگی است. در قسمت بالایی قطعه، آثار چرخش ابزار و تشکیل پلیسه‌های نازک قابل تشخیص است که به دلیل لقی ابزار در بخش فوقانی قالب پدید آمده‌اند. پلیسه شکل گرفته با فلش‌هایی بر روی تصویر نشان داده شده است. شکل (۳-ب) ساختار فوم پس از شست‌وشو و حذف کلرید سدیم را نمایش می‌دهد. ساختار متخلخل ایجادشده حاکی از موفقیت در حذف ذرات کلرید سدیم بوده و اغلب حفره‌ها به صورت باز و متصل به یکدیگر دیده می‌شوند. همچنین، ظاهر سطحی نمونه بیانگر شکل‌گیری پیوندهای مناسب بین ذرات منیزیم و وقوع فرآیند تفجوشی مؤثر است. با این حال، برخی نواحی ممکن است دارای تخلخل‌های ریز یا ناقص باشند که می‌تواند به عدم توزیع یکنواخت نگهدارنده فضا یا نوسان دمایی در حین فرآیند مرتبط باشد. در شکل (۳-ج) و (۳-د) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با دو بزرگنمایی مختلف از سطح مقطع فوم نهایی ارائه شده است. تخلخل‌ها به صورت شبه‌کروی و نسبتاً یکنواخت در سراسر تصویر توزیع شده‌اند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب ذرات کلرید سدیم در ایجاد فضای میان‌ذره‌ای است. میانگین قطر تخلخل‌ها حدود ۳۰۰ میکرومتر برآورد شده و میزان تخلخل سطحی بر اساس تحلیل تصویر حدود ۱۵ درصد محاسبه گردید. در ادامه، به منظور ارزیابی تخلخل حجمی نمونه، چگالی فوم بر پایه اصل ارشمیدس و با استفاده از روش جابجایی سیال اندازه‌گیری شد. جرم نمونه در هوا معادل ۲/۹ گرم و جرم آن در حالت غوطه‌وری در آب ۱/۰۱ گرم ثبت گردید. با استفاده از این مقادیر و معادلات زیر، چگالی فوم ( $\rho_f$ ) و درصد تخلخل محاسبه شد:

$$\rho_f = (W_a / (W_a - W_b)) \times \rho_{liquid} \quad (1)$$

$$Porosity = (1 - (\rho_f / \rho_{Mg})) \times 100 \quad (2)$$

که در آن  $W_a$  جرم نمونه در هوا،  $W_b$  جرم نمونه در آب و  $\rho_{liquid}$  چگالی آب است. حجم هندسی فوم نیز با استفاده از

دی‌متیل فرم‌آمید به عنوان حلال استفاده شد. دی‌متیل فرم‌آمید یک حلال قطبی غیرپروتونی است که قابلیت حل کردن نمک را دارد و در عین حال بر خلاف آب که منجر به خوردگی شدید و آزاد شدن هیدروژن می‌شود با فلز منیزیم واکنش شیمیایی نشان نمی‌دهد، بنابراین می‌تواند بدون آسیب رساندن به ساختار فوم، ذرات نمک را به طور مؤثر حذف کند. به این منظور، قطعات تولید شده برای حذف نمک به مدت ۴۸ ساعت درون ظرفی حاوی حلال مورد نظر قرار داده شدند. ترتیب انجام مراحل مختلف فرآیند در نمای شماتیک شکل (۲) ارائه شده است.



نمونه‌های تولید شده پس از حذف ذرات نگهدارنده برای انجام آزمون‌های مکانیکی، ریزساختاری و فیزیکی آماده شدند. به منظور بررسی رفتار مکانیکی و تعیین مقاومت فشاری آزمون فشار مطابق استاندارد ASTM E9 انجام شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی و نرم افزار Image J شکل، اندازه و توزیع سلول‌ها در فوم تحلیل گردید. چگالی نسبی فوم جهت ارزیابی کیفیت و سبک بودن محصول نهایی توسط روش ارشمیدس مورد ارزیابی قرار گرفت.

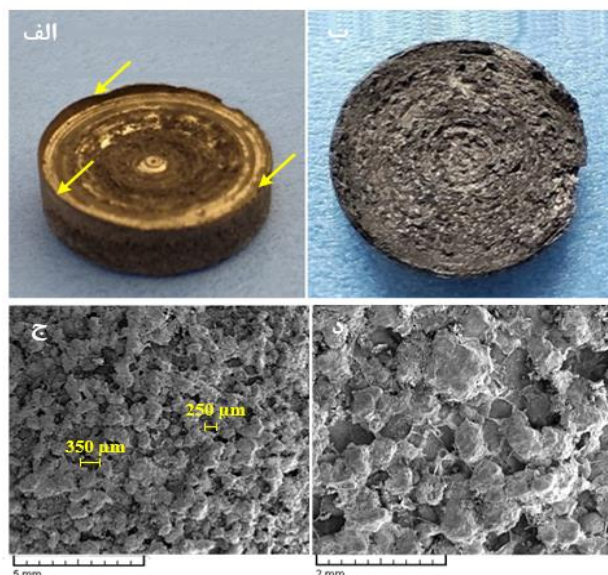
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- خواص فیزیکی و ظاهری فوم منیزیم

خواص فیزیکی فوم‌های فلزی به‌ویژه چگالی نقش مهمی در تعیین یکپارچگی ساختاری آن‌ها ایفا می‌کند. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که خواص مکانیکی، حرارتی و هدایت الکتریکی این فوم‌ها به پیکربندی نسبی و ساختار داخلی آن‌ها وابسته است [۱۶]. در این تحقیق، فوم منیزیم با استفاده از روش فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی تولید شد. جرم نمونه پس از شکل‌گیری،

اصلی است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. در بخش ابتدایی نمودار، رابطه‌ی بین تنش و کرنش تقریباً خطی است که بیانگر رفتار الاستیک نمونه در مقابل بارگذاری فشاری است. در این ناحیه، ساختار سلولی فوم نسبت به تغییر شکل مقاوم بوده و بیشتر انرژی اعمال شده به صورت برگشت پذیر در ماده ذخیره می‌شود. شیب این ناحیه معرف مدول یانگ فوم است. شیب ناحیه خطی اولیه منحنی تنش-کرنش بیانگر مدول یانگ فوم منبسطی است. بر اساس این ناحیه، مقدار مدول یانگ فوم تولید شده در حدود ۳۰ گیگاپاسکال برآورد می‌شود که در مقایسه با منیزیم بالک کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این کاهش مدول را می‌توان به حضور تخلخل، کاهش سطح مقطع مؤثر باربر و تمرکز تنش در دیواره‌های سلولی نسبت داد. با افزایش کرنش، نمودار به یک نقطه اوج (۴۹ مگاپاسکال) می‌رسد که نشان‌دهنده حداکثر تنش فشاری قابل تحمل توسط فوم است. این نقطه عموماً آغاز فروریزش یا کماتش موضعی دیواره‌های سلول‌ها است. پس از این نقطه، کاهش نسبی در مقدار تنش مشاهده می‌شود که معرف رفتار شکننده یا ترد در ساختار فوم است. نزولی شدن نمودار پس از نقطه اوج، برخلاف فوم‌های فلزی داکتیل که معمولاً دارای ناحیه‌ی پلاتو<sup>۱</sup> با تنش نسبتاً ثابت هستند، نشان می‌دهد که ساختار داخلی فوم منبسطی دچار فروپاشی سلولی ناگهانی شده است. به طور کلی، رفتار نزولی تنش پس از نقطه اوج در نمودار تنش-کرنش، شاخص خوبی برای شناسایی رفتار ترد و حساس به فروپاشی ناگهانی فوم است که بایستی در طراحی کاربردهای باربر مورد توجه قرار گیرد. مقدار نسبتاً پایین مدول یانگ همراه با افت ناگهانی تنش پس از رسیدن به تنش بیشینه، نشان‌دهنده محدود بودن قابلیت تغییر شکل پلاستیک دیواره‌های سلولی است. این رفتار می‌تواند ناشی از ماهیت اتصال ذرات در فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی، وجود نواحی تمرکز تنش در محل پیوند ذرات و نبود مکانیزم‌های مؤثر جذب انرژی پلاستیک در ساختار فوم باشد. مقایسه رفتار فشاری فوم تولید شده در این پژوهش با فوم‌های منبسطی ساخته شده به روش‌های متداول تر نظیر متالورژی پودر و روش‌های مبتنی بر نگهدارنده فضا نشان می‌دهد که تنش فشاری بیشینه در این مطالعه در محدوده گزارش شده توسط پژوهش‌های پیشین قرار دارد [۳، ۴]. با این حال، برخلاف بسیاری از فوم‌های منبسطی تولید شده به روش تف‌جوشی کوره‌ای که رفتار داکتیل‌تری همراه با ناحیه پلاتو مشخص از خود نشان می‌دهند، فوم حاصل از فرآیند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی رفتار شکننده‌تری بروز داده است. این تفاوت را می‌توان به ماهیت

اندازه‌گیری ابعاد و محاسبات هندسی برابر با ۱/۸۸ سانتی‌متر مکعب تعیین شد. چگالی نمونه تولیدی برابر با ۱/۵۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و چگالی نسبی آن حدود ۰/۸۶ محاسبه گردید.



شکل ۳ الف- قطعه قبل از حذف ذرات نگهدارنده، ب- قطعه پس از حذف ذرات نگهدارنده، ج- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس حذف ذرات نگهدارنده با دو بزرگنمایی مختلف

با مقایسه مقدار چگالی نسبی با چگالی منیزیم خالص ( $1/738 \text{ g/cm}^3$ )، تخلخل حجمی فوم برابر با ۱۱/۷ درصد به دست آمد. مقدار بالاتر چگالی نسبی نسبت به مقدار تئوری مورد انتظار (با فرض حذف کامل نمک) نشان می‌دهد که بخشی از ذرات کلرید سدیم احتمالاً در حفره‌های بسته یا نواحی عمیق فوم باقی مانده‌اند و به طور کامل حذف نشده‌اند. این موضوع می‌تواند دلیل اصلی اختلاف میان تخلخل سطحی (۱۵ درصد) و تخلخل حجمی (حدود ۱۲ درصد) باشد. لازم به ذکر است که در صورت نیاز به افزایش میزان تخلخل، می‌توان با افزایش درصد حجمی یا وزنی ذرات نگهدارنده فضا در مرحله ابتدایی فرآیند، ساختار متخلخل‌تری ایجاد کرد. افزایش مقدار این ذرات منجر به شکل‌گیری تعداد بیشتری حفره در ساختار فوم می‌شود و با بهینه‌سازی شرایط حذف می‌توان به تخلخل‌های بالاتر و ساختار سبک‌تر دست یافت.

### ۳-۲- مقاومت فشاری

نمودار تنش-کرنش به دست آمده از آزمون فشار فوم منبسطی رفتار مکانیکی مشخصی را نشان می‌دهد که شامل سه ناحیه

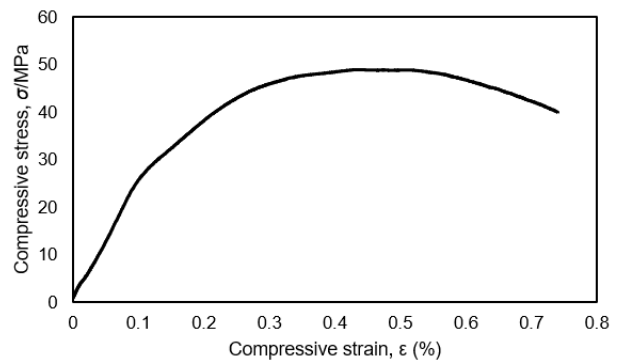
<sup>۱</sup> Plateau

نوآورانه، کم‌هزینه و محیط زیست دوست برای تولید فوم‌های فلزی سبک‌وزن به‌ویژه در مورد منیزیم مورد استفاده قرار گیرد. با وجود نتایج امیدوارکننده این پژوهش، برخی محدودیت‌ها نیز وجود دارد که باید مدنظر قرار گیرند. در این مطالعه، تعداد نمونه‌ها محدود بوده و تنها یک نسبت اختلاط مشخص بین پودر منیزیم و ذرات نگهدارنده فضا بررسی شده است. همچنین، اثر پارامترهای کلیدی فرآیند فشردن‌سازی اصطکاکی اغتشاشی نظیر سرعت دورانی ابزار، زمان توقف و نیروی فشاری به‌صورت سیستماتیک مورد بررسی قرار نگرفته است. این محدودیت‌ها می‌تواند بر قابلیت تعمیم نتایج تأثیرگذار باشد و بررسی آن‌ها در پژوهش‌های آتی ضروری است.

## ۵- مراجع

- [1] L. -P. Lefebvre, J. Banhart, and D. C. Dunand, "Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments," *Adv Eng Mater*, vol. 10, no. 9, pp. 775–787, Sep. 2008, doi: 10.1002/adem.200800241.
- [2] A. Hassan and I. A. Alnaser, "A Review of Different Manufacturing Methods of Metallic Foams," *ACS Omega*, vol. 9, no. 6, pp. 6280–6295, Feb. 2024, doi: 10.1021/acsomega.3c08613.
- [3] S.-O. Agbedor et al., "Recent progress in porous Mg-based foam preparation approaches: effect of processing parameters on structure and mechanical property," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 29, no. 3, pp. 371–402, Mar. 2022, doi: 10.1007/s42243-021-00671-6.
- [4] H. Kapłon, C. Blawert, J. Chęćmanowski, and K. Naplocha, "Development of open-porosity magnesium foam produced by investment casting," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 10, no. 7, pp. 1941–1956, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.jma.2022.01.003.
- [5] M. Akbari, P. Asadi, R. A. Behnagh, F. Bedir, N. Choupani, and T. Sadowski, "Process Parameters and Tool Design in Friction Stir Extrusion: A Sustainable Recycling Technique," *Engineering Reports*, vol. 7, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1002/eng2.13060.
- [6] M. Adnan, "Recycling magnesium alloy AZ31B chips via friction stir consolidation: A sustainable approach," 2025, pp. 2546–2555. doi: 10.21741/9781644903599-275.
- [7] D. Catalini, D. Kaoumi, A. P. Reynolds, and G. J. Grant, "Dispersoid Distribution and Microstructure in Fe-Cr-Al Ferritic Oxide Dispersion-Strengthened Alloy Prepared by Friction Consolidation,"

اتصال حالت جامد، محدودیت تغییر شکل پلاستیک دیواره‌های سلولی و ریزساختار حاصل از فرآیند فشردن‌سازی اصطکاکی اغتشاشی نسبت داد.



شکل ۴ منحنی تنش کرنش فوم تولید شده

## ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان‌سنجی ساخت فوم منیزیمی با استفاده از فرآیند فشردن‌سازی اصطکاکی اغتشاشی و ذرات کلرید سدیم به‌عنوان نگهدارنده فضا مورد بررسی قرار گرفت. روش پیشنهادی به‌عنوان یک فرآیند حالت‌جامد و بدون نیاز به منبع حرارتی خارجی، توانست ساختاری متخلخل با پیوندهای مناسب میان ذرات منیزیم ایجاد کند. استفاده از حلال دی‌متیل فرم‌آمید جهت حذف مؤثر ذرات نگهدارنده فضا بدون بروز خوردگی در ساختار فوم نیز در افزایش کیفیت نهایی مؤثر بود. بررسی‌های فیزیکی و ریزساختاری نمونه‌ها نشان داد که ساختار متخلخل با تخلخل حجمی حدود ۱۲ درصد و میانگین اندازه حفرات در حدود ۳۰۰ میکرومتر حاصل شد. مقایسه تخلخل سطحی با تخلخل حجمی نیز بیانگر پایداری ساختار فوم و توزیع نسبتاً یکنواخت تخلخل‌ها در سطح قطعه بود؛ هرچند احتمال باقی‌ماندن بخشی از ذرات نمک در حفرات بسته وجود دارد.

نتایج آزمون فشار حاکی از آن بود که نمودار تنش-کرنش فوم تولیدی دارای سه ناحیه مشخص شامل رفتار الاستیک اولیه، نقطه اوج تنش و کاهش تنش پس از آن است. رفتار مکانیکی نمونه، برخلاف فوم‌های فلزی داکتیل با ناحیه پلاتو، نشان‌دهنده فروپاشی موضعی ساختار سلولی و رفتار شکننده تحت فشار است. این ویژگی می‌تواند به نوع اتصال بین ذرات، ریزساختار حاصل از فرآیند، و توزیع تخلخل وابسته باشد.

به‌طور کلی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از روش فشردن‌سازی اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند به‌عنوان روشی

- Mixed Waste Chips,” *Adv Eng Mater*, vol. 26, no. 16, Aug. 2024, doi: 10.1002/adem.202401172.
- [14] H. Lai, Y. Zhang, C. Wang, J. Hu, F. Yu, and D. Zhang, “Achieving an excellent combination of tensile properties of recycled H13 steel prepared by thermomechanical consolidations of chips,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 926, p. 147964, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.msea.2025.147964.
- [15] A. Latif, G. Ingarao, M. Gucciardi, and L. Fratini, “A novel approach to enhance mechanical properties during recycling of aluminum alloy scrap through friction stir consolidation,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 3–4, pp. 1989–2005, Mar. 2022, doi: 10.1007/s00170-021-08346-y.
- [16] S. S. Salins, S. Kumar, S. Shetty, H. K. Sachidananda, and M. S. A. Khan, “Characterization of the Aluminium-Based Metal Foam *Properties for Automotive Applications*,” *Arab J. Sci Eng*, vol. 50, no. 12, pp. 9247–9260, Jun. 2025, doi: 10.1007/s13369-024-09399-3.
- Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 46, no. 10, pp. 4730–4739, Oct. 2015, doi: 10.1007/s11661-015-3059-1.
- [8] S. Whalen, S. Jana, D. Catalini, N. Overman, and J. Sharp, “Friction Consolidation Processing of n-Type Bismuth-Telluride Thermoelectric Material,” *J. Electron Mater*, vol. 45, no. 7, pp. 3390–3399, Jul. 2016, doi: 10.1007/s11664-016-4454-0.
- [9] M. Narvan, R. Abdi Behnagh, N. Shen, M. K. Besharati Givi, and H. Ding, “Shear compaction processing of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites directly from magnesium chips,” *J. Manuf Process*, vol. 22, pp. 39–48, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.jmapro.2016.01.010.
- [10] P. M. K. H. A. Reza Abdi Behnagh, “Recycling of Magnesium Machining Chips via Shear Consolidation Processing,” *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 95–99, 2019.
- [11] P. Asadi, M. Akbari, A. Armani, M. R. M. Aliha, M. Peyghami, and T. Sadowski, “Recycling of brass chips by sustainable friction stir extrusion,” *J. Clean Prod*, vol. 418, p. 138132, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138132.
- [12] R. A. Behnagh, H. Abdollahi, M. A. M. Pour, and B. Shahbazi, “Microstructure, mechanical properties, and electrical conductivity of the solid-state recycled pure copper machining chips,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 235, no. 1, pp. 195–201, Jan. 2021, doi: 10.1177/1464420720957366.
- [13] S. Lei, H. Xu, B. Jiang, Y. Wang, M. Hu, and Z. Ji, “Effect of Extrusion Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Mg–Al–Zn Alloy Prepared by Solid-State Recycling of