

# تأثیر درصد $Al_2O_3$ بر خواص مکانیکی فوم کامپوزیتی $Al-(0-40\%)Al_2O_3$ تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی کم انرژی

مصطفی علیزاده و مرتضی میرزایی\*

گروه پژوهشی فلزات، پژوهشکده مهندسی مواد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۱۰/۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۸/۱۰)

**چکیده** - در این پژوهش، ابتدا پودرهای کامپوزیتی  $Al-Al_2O_3$  با مقادیر مختلف درصد حجمی  $Al_2O_3$  روش آلیاژسازی مکانیکی در یک آب کم انرژی تهیه و عنوان ماده فوم، مورد استفاده قرار گرفتند. سپس با استفاده از روش فضا ساز و بهره گیری از ذرات کرامید کروی با قطر / (بعنوان عامل فضا ساز) فوم های کامپوزیتهای مختلف درصد تخلخل تهیه و برای بررسی خواص فشاری فوم های تولیدی، از آزمون فشار تک محوری با نرخ کرنش  $S^{-1}$  استفاده شد. نشان داد خواص فشاری فوم تراز کسر  $Al_2O_3$  و درصد تخلخل است. ای که با کاهش درصد تخلخل، خواص فشاری بهبود می یابد. همچنین فوم های ساخته شده با درصد  $Al_2O_3$  در این پژوهش رین خواص فشاری را دارا بودند.

واژگان کلیدی: آلیاژسازی مکانیکی، آسیاب کاری کم انرژی، فضا ساز، کرامید

## Effect of $Al_2O_3$ Particles on Mechanical Properties of $Al-(0-40\%)Al_2O_3$ Composite Foams Produced by Low Energy Mechanical Alloying

M. Alizadeh and M. Mirzaei\*

1. Metals Research Group, Department of Materials Engineering, Kerman Graduate University of Technology

**Abstract:** In this study, at first  $Al-Al_2O_3$  composite powders having different volume fractions of  $Al_2O_3$  (0, 10, 20, 30 and 40 vol.%) were produced by low energy mechanical alloying, which were used as foam materials. Then, composite foams with 50, 60, and 70 percent of porosity were produced by space-holder technique. Spherical carbamide particles (1-1.4 mm) were used to achieve spherical porosities. In order to investigate the compressive behavior of foams, the compression test with strain rate of  $10^{-3} S^{-1}$  was performed on the foam samples. The results showed that the compressive properties depended on the volume fraction

\* مسئول مکاتبات پست الکترونیکی: m\_mirzaei1355@yahoo.com

of  $Al_2O_3$  and porosity fraction. Generally, by decreasing the porosity fraction, the compressive properties were improved. The composite foams containing 10 vol.%  $Al_2O_3$  showed superior compressive properties in comparison to other foams studied in this work.

**Keywords:** Mechanical alloying, Low energy milling, Space holder, Carbamide

## ۱- مقدمه

در روش فضا ساز با استفاده از یک ماده فضا ساز (معمولاً نمک طعام  $NaCl$ ) با اندازه و شکل مشخص، می توان فوم با سلول های هم شکل و هم اندازه و با توزیع یکنواخت تولید کرد [۱۲-۱۴]. نمک طعام به دلیل سختی بالا، شکل نامنظم و گوشه دار و از همه مهم تر بروز مشکلات خوردگی ناشی از نمک باقی مانده پس از فرایند حل شدن، پژوهشگران را بر آن داشته است که از مواد دیگری همچون کربامید استفاده کنند. کربامید کروی با قیمت ارزان قابل تهیه در بازار بوده، از طرفی حل شدن آن در آب به مراتب سریع تر از نمک است [۱۵-۱۹].

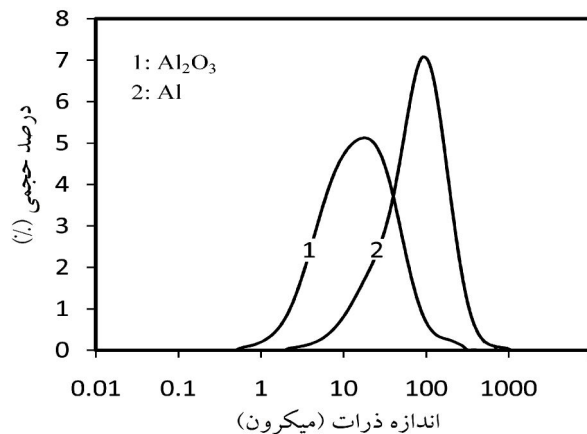
در این پژوهش از کربامید کروی به عنوان ماده فضا ساز استفاده شد. از آنجایی که این ماده در دمای بالای ۱۳۵ تا ۱۴۰ درجه سانتی گراد تجزیه می شود، به جای فرایند لیچینگ از یک سیکل گرمایی برای حذف آن استفاده شد. در این پژوهش ابتدا پودر کامپوزیت  $Al-Al_2O_3$  با استفاده از آلیاژ سازی مکانیکی با روش آسیاب کم انرژی تهیه و سپس فوم کامپوزیتی سلول باز  $Al-Al_2O_3$  با روش فضا ساز ساخته شد و تاثیر متغیرهایی همچون درصد فاز تقویت کننده  $Al_2O_3$  (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد حجمی) و کسر حجمی تخلخل (۵۰، ۶۰ و ۷۰) بر خواص فشاری مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش انجام کار

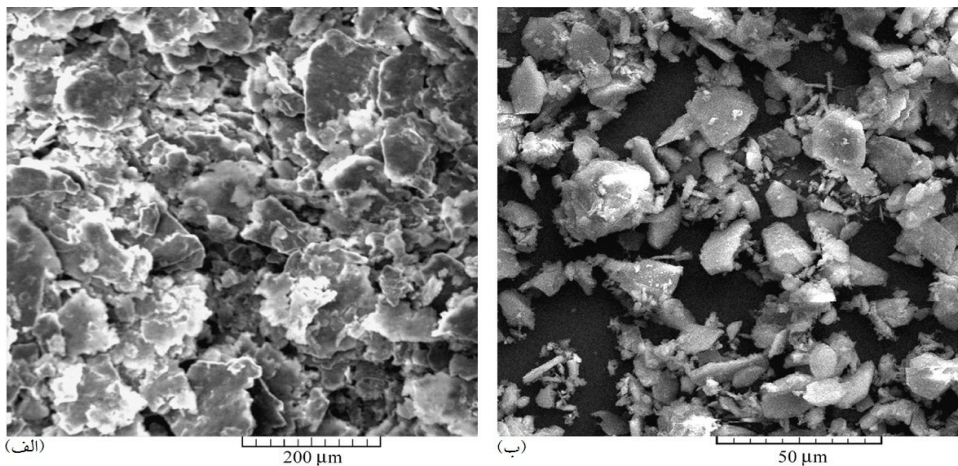
در این پژوهش برای ساخت پودر کامپوزیت از پودرهای آلومینیم و  $Al_2O_3$  خالص و با توزیع اندازه ذرات نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد. منحنی توزیع اندازه ذرات آلومینیم و  $Al_2O_3$  به صورت توزیع نرمال بوده، ولی ذرات  $Al_2O_3$  به مراتب ریزتر از ذرات آلومینیم هستند به گونه ای که میانگین اندازه ذرات پودرهای آلومینیم و  $Al_2O_3$  به ترتیب

در سال های اخیر فوم های آلومینیمی به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی ویژه ای همچون قابلیت بالای جذب انرژی، چگالی پائین، هدایت الکتریکی و گرمایی بالا به طور گسترده مورد مطالعه پژوهشگران قرار گرفته اند [۱ و ۲]. از آنجایی که در یک فوم فلزی افزایش استحکام فشاری و قابلیت جذب انرژی اهمیت به سزایی دارد، بررسی ها بیش تر در این جهت شکل گرفته است [۳ و ۴]. یکی از راه های افزایش استحکام فوم ها، تقویت دیواره های فوم با کمک ذرات سرامیکی است [۵-۷]. در بین مواد تقویت کننده سرامیکی  $Al_2O_3$  یک تقویت کننده مناسب برای آلومینوم است زیرا هیچ گونه واکنش شیمیایی با آن ندارد، با افزوده شدن به آلومینوم دمای کاری را افزایش می دهد و باعث بهبود مقاومت به خزش کامپوزیت می شود [۸].

برای ساخت پودر کامپوزیت  $Al-Al_2O_3$  روش آسیاب کردن مکانیکی بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است زیرا در این روش، توزیع یکنواختی از ذرات آلومینا در آلومینیم به دست می آید. در حین آلیاژ سازی مکانیکی ذرات آلومینیم در اثر ضربه ناشی از گلوله ها به شدت تغییر شکل یافته، به صورت پهن و ورقه ای در می آیند. اما ذرات  $Al_2O_3$  خرد شده در زمینه آلومینیم فرو رفته، توسط آن احاطه می شوند. با افزایش زمان آسیاب کردن ذرات آلومینیم دچار کار سختی شده، ذرات  $Al_2O_3$  در مرز بین لایه های جوش خورده آلومینیم محبوس می شوند. در ادامه، این ساختار لایه ای شکسته و ریزتر می شود و ذرات  $Al_2O_3$  نیز با توزیع یکنواخت تری در درون این ساختار قرار می گیرند [۸-۱۱]. به دلیل اینکه روش سلول فضا ساز برای ساخت فوم بر پایه متالورژی پودر است، تهیه کامپوزیت به شکل پودر برای استفاده از این روش اهمیت دارد.



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه ذرات پودرهای آلومینیم و  $Al_2O_3$

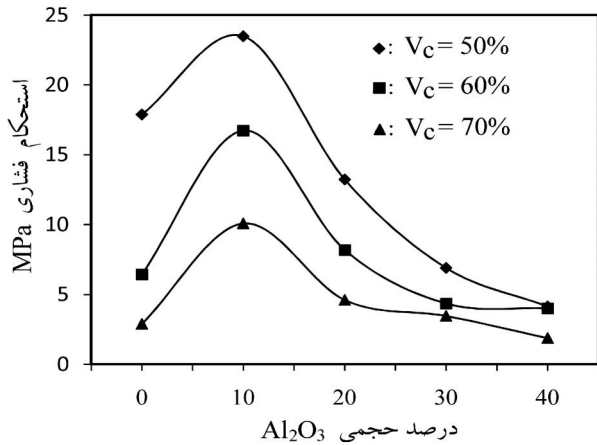


شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از پودرهای اولیه: الف) آلومینیم و ب)  $Al_2O_3$

ذرات کروی کربامید در یک مخلوط کن افقی به مدت ۱۵ دقیقه و در حضور ۰/۵ میلی متر مکعب اتانول مخلوط شدند. اتانول در این مرحله برای مرطوب و در نتیجه چسبناک شدن سطح ذرات کربامید استفاده شد. نسبت ذرات کروی کربامید (فضا ساز) به پودر کامپوزیت ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد حجمی در نظر گرفته شد. در نهایت این مخلوط با استفاده از یک دستگاه پرس تک محوره و با فشار ۴۰۰ مگاپاسکال به نمونه‌های استوانه‌ای با قطر و طول ۱۳ میلی‌متر تبدیل شدند. عملیات خروج کربامید از نمونه‌ها و سپس زیتتر شدن به صورت سیکل نشان داده شده در شکل ۴ و با استفاده از یک کوره الکتریکی و در اتمسفر کنترل شده صورت گرفت. برای بررسی رفتار فشاری نمونه‌ها و میزان جذب انرژی،

۷۸ و ۱۴ میکرون است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودرهای اولیه در شکل ۲ نمایش داده شده است. از کربامید کروی شکل تجاری با ابعاد ۱ تا ۱/۴ میلی‌متر به عنوان ماده فضا ساز استفاده شد (شکل ۳).

برای ساخت کامپوزیت  $Al-Al_2O_3$  پودر آلومینیم با ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد حجمی از  $Al_2O_3$  مخلوط و با استفاده از یک آسیاب افقی کم انرژی با سرعت ۸۰ دور در دقیقه به مدت ۲۴ ساعت و در اتمسفر آرگون و با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ آسیاب شدند. برای جلوگیری از کلوخه شدن پودرها و چسبیدن آنها به گلوله‌ها و جداره آسیاب حدود ۳ درصد وزنی پودر اتانول به مخلوط پودرها اضافه شد. برای ساخت نمونه‌های فومی، پودر کامپوزیت به همراه



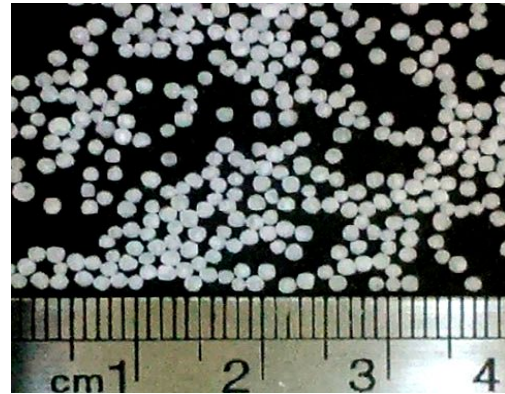
شکل ۶- استحکام فشاری نمونه‌ها بر حسب درصد حجمی  $Al_2O_3$  در کسرهای حجمی مختلف تخلخل

آزمون فشار با نرخ کرنش  $10^{-3} S^{-1}$  با استفاده از یک دستگاه (اینسترون ۵۵۸۶) و بر طبق استاندارد (ASTM E9-89a) انجام شد. درصد تخلخل نمونه‌ها با استفاده از روش ارشمیدس به دست آمد.

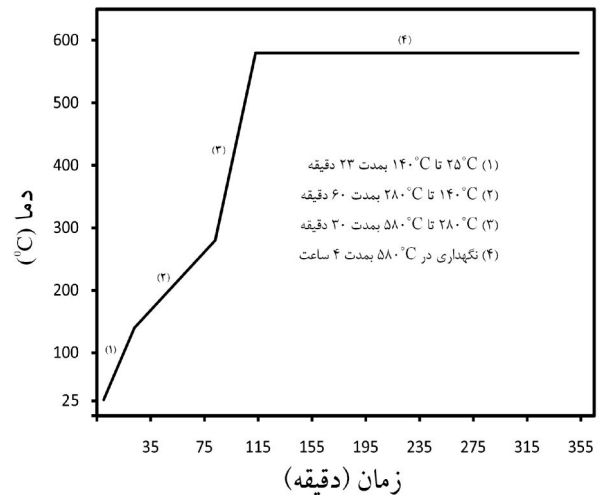
### نتایج و بحث

در شکل ۵ اثر درصد حجمی  $Al_2O_3$  بر منحنی تنش-کرنش فشاری در میزان تخلخل ثابت ۵۰٪ نشان داده شده است. این منحنی‌ها همانند منحنی عمومی فوم‌های فلزی از سه ناحیه تشکیل شده است. این ناحیه‌ها شامل ناحیه تغییر شکل الاستیک (که تغییرات تنش با کرنش به صورت خطی است)، ناحیه مسطح (که تنش به صورت دندان‌های با کرنش در یک محدوده وسیع از نمودار تنش-کرنش تغییر می‌کند) و ناحیه تراکم (که تمامی حفره‌ها به صورت متراکم در می‌آید و تنش به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد) می‌شوند.

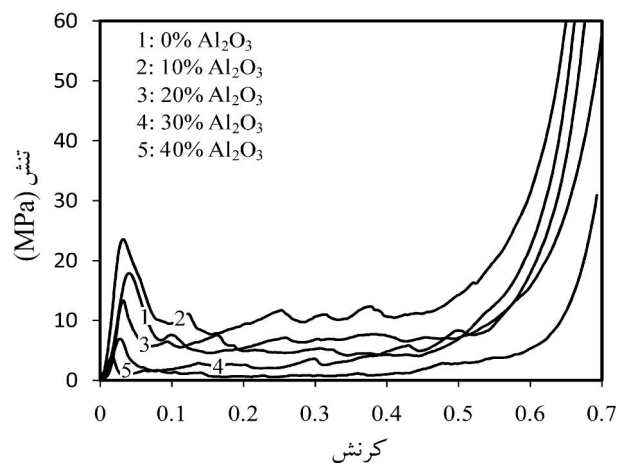
با افزایش کسر حجمی  $Al_2O_3$  تا ۱۰ درصد، استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح افزایش می‌یابد (شکل‌های ۶ و ۷). ولی در ادامه با افزایش کسر حجمی  $Al_2O_3$  تا ۴۰ درصد روند نزولی استحکام تسلیم و تنش ناحیه مسطح مشاهده می‌شود. افت خواص مکانیکی فوم‌ها با افزایش ذرات تقویت کننده سرامیکی به بیش از ۱۰٪ می‌تواند ناشی از رفتار ترد این



شکل ۳- تصویر ذرات کروی کربامید



شکل ۴- سیکل عملیات خروج کربامید و زینتر شدن نمونه‌ها

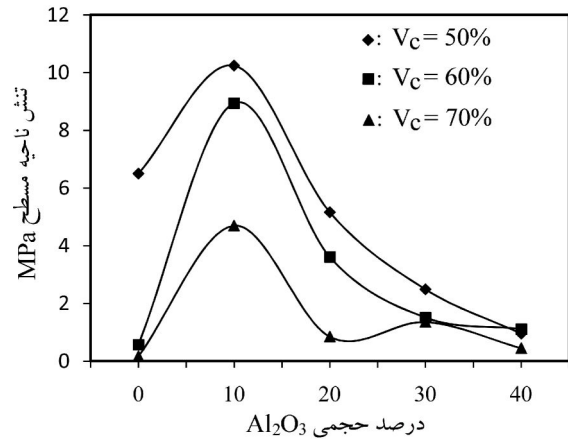


شکل ۵- منحنی تنش-کرنش فشاری نمونه‌های فومی بر حسب درصد حجمی  $Al_2O_3$  در تخلخل ۵۰٪

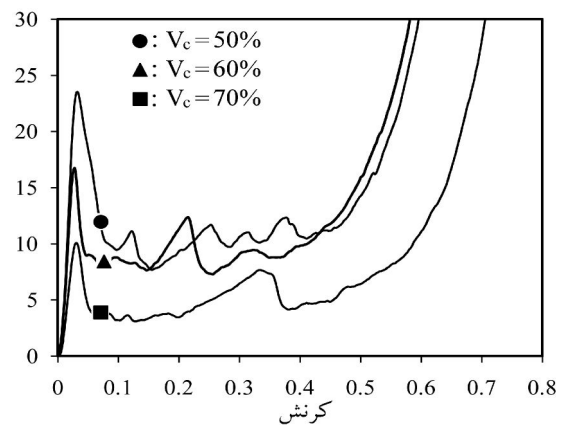
فوم‌های کامپوزیتی با درصد زیاد فاز تقویت کننده باشد. این مسأله در بررسی اثر ذرات SiC بر رفتار مکانیکی فوم‌ها نیز دیده شده است [۵]. به این صورت که با افزودن ۱۰ درصد وزنی از ذرات SiC به فوم کامپوزیتی، افزایش استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح مشاهده می‌شود ولی برای فوم با ۲۰ درصد وزنی از ذرات SiC افت استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح حتی نسبت به فوم بدون ذرات SiC دیده می‌شود. در واقع می‌توان عنوان نمود که خواص مکانیکی فوم‌ها با افزایش ذرات تقویت کننده  $Al_2O_3$  به بیش از ۱۰ درصد حجمی، به دلیل افزایش پدیده تمرکز تنش در مرز بین فاز زمینه آلومینیم با ذرات  $Al_2O_3$  افت محسوسی پیدا می‌کند.

در شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات منحنی تنش- کرنش فشاری با درصد تخلخل به ترتیب در درصد‌های حجمی ۱۰ و ۴۰ از  $Al_2O_3$  دیده می‌شود. به وضوح مشخص است که محدوده ناحیه مسطح در تخلخل‌های بالاتر به مراتب گسترش یافته است هر چند که تنش ناحیه مسطح کاهش یافته و حتی در نمونه شامل ۴۰ درصد حجمی  $Al_2O_3$  به صفر نزدیک شده است. این مسأله به دلیل زمان طولانی‌تر فشرده و بسته شدن حفره‌ها در نمونه‌های با تخلخل بیشتر است. این نتایج با مطالعات سایر پژوهشگران درباره اثر تخلخل بر خواص مکانیکی در فوم‌های فلزی مطابقت دارد به گونه‌ای که هر چه میزان تخلخل فوم‌ها افزایش یابد، محدوده ناحیه مسطح افزایش یافته و مقدار تنش در این ناحیه با افزایش کرنش، با یک شیب ملایم‌تری افزایش می‌یابد [۱۷].

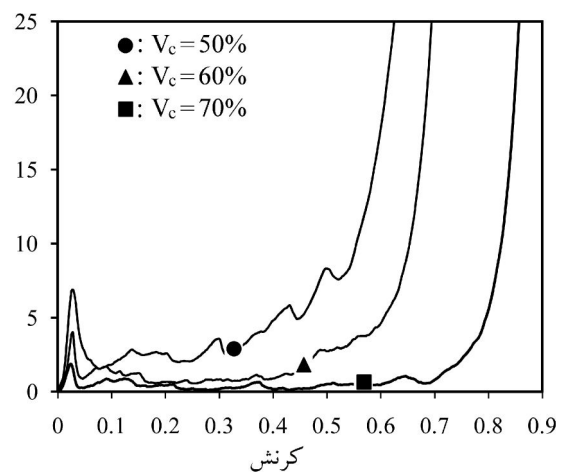
با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان دریافت شیب تغییرات تنش با کرنش در انتهای ناحیه دوم با کاهش درصد تخلخل افزایش می‌یابد. به عبارتی در مرز نواحی دوم و سوم در نمونه‌های با تخلخل کم‌تر تنش با نرخ شدیدتری افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ تغییرات شیب ناحیه مسطح نمونه‌ها با کسر حجمی تخلخل در درصد‌های مختلف حجمی  $Al_2O_3$  نشان داده شده است. در نمونه شامل ۱۰ درصد حجمی از  $Al_2O_3$  تنش با شیب به مراتب بیشتر تری با افزایش کرنش، زیاد می‌شود. این



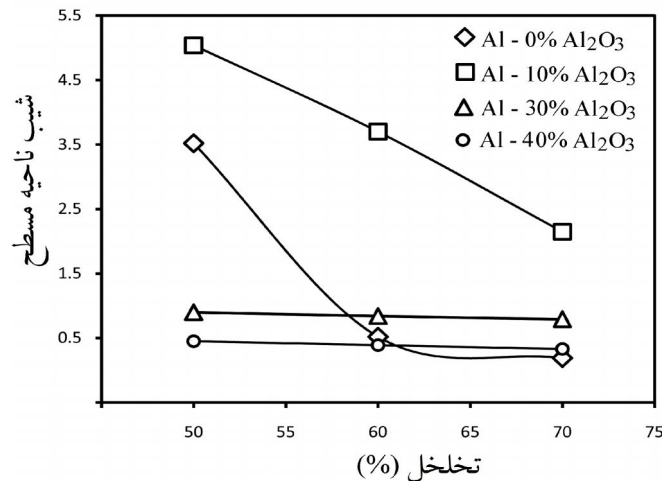
شکل ۷- تغییرات تنش ناحیه مسطح نمونه‌ها با درصد حجمی  $Al_2O_3$  در کسرهای حجمی مختلف تخلخل



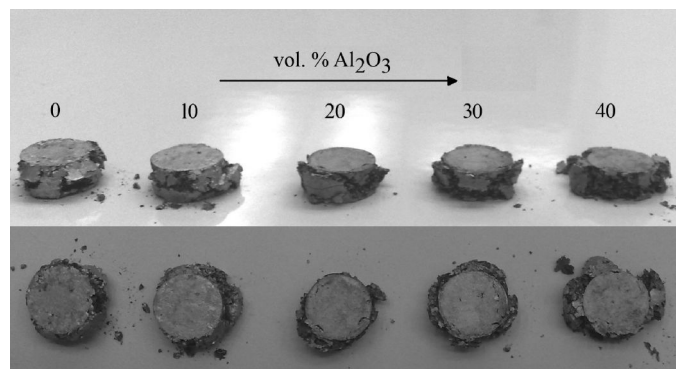
شکل ۸- تغییرات منحنی- تنش کرنش فشاری نمونه‌های فومی با درصد تخلخل در نمونه‌های با ۱۰٪ حجمی  $Al_2O_3$



شکل ۹- منحنی تنش- کرنش فشاری نمونه‌های فومی بر حسب درصد تخلخل در نمونه‌های با ۴۰٪ حجمی  $Al_2O_3$



شکل ۱۰- تغییرات شیب ناحیه مسطح نمونه‌ها با کسر حجمی تخلخل در درصد‌های مختلف حجمی  $Al_2O_3$



شکل ۱۱- تصویر نمونه‌ها پس از آزمون فشار در ۵۰٪ تخلخل

حجمی بیش‌تر  $Al_2O_3$  مکانیزم دوم غالب بوده، پس از هر مرحله تخریب سلول‌ها افت شدید تنش مشاهده می‌شود. مشاهدات حین آزمون فشار در نمونه‌های مختلف نیز این مکانیزم را تایید می‌کند به‌گونه‌ای که در نمونه‌های با درصد حجمی بیش‌تر  $Al_2O_3$  (۳۰ و ۴۰ درصد) در حین آزمون فشار، قسمت‌هایی از نمونه‌ها از آن جدا شده و فقط درصد کمی در نهایت به‌صورت متراکم شده در می‌آید (در واقع نمونه متلاشی می‌شود). این در حالی است که در نمونه‌های با درصد حجمی کم‌تر  $Al_2O_3$  نمونه کاملاً به‌صورت متراکم شده در می‌آید (شکل ۱۱).

در مقایسه رفتار فشاری نمونه کامپوزیتی شامل ۱۰ درصد حجمی  $Al_2O_3$  با نمونه آلومینیمی (بدون  $Al_2O_3$ ) مشخص می‌شود ذرات فاز تقویت کننده باعث افزایش استحکام دیواره

افزایش در درصد‌های مختلف تخلخل نیز وجود دارد. در نمونه فومی آلومینیم بدون ذرات تقویت کننده با افزایش درصد تخلخل کاهش بسیار شدیدی در شیب ناحیه مسطح دیده می‌شود در حالیکه در نمونه‌های شامل ۳۰ و ۴۰ درصد حجمی  $Al_2O_3$  این شیب تغییرات چندانی با میزان تخلخل نمونه‌ها ندارد. تغییر در رفتار فشاری نمونه‌های فوم کامپوزیتی توسط سایر پژوهشگران هم مورد مطالعه قرار گرفته است [۶ و ۷]. اصولاً تغییر شکل فوم‌ها در ناحیه مسطح با دو مکانیزم خمیدگی دیواره‌های سلول‌ها و از هم پاشیده شدن یا شکست ناگهانی دیواره‌های سلول‌ها اتفاق می‌افتد. در نمونه‌های با درصد حجمی کم‌تر  $Al_2O_3$  مکانیزم اول غالب است و در نتیجه در ناحیه مسطح با افزایش کرنش، تنش هم با شیب ملایمی افزایش پیدا می‌کند [۲۰]. اما در مقابل در نمونه‌های با درصد

ذرات کرومی کربامید مطلوب نمی‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت فوم کامپوزیتی آلومینیم با ۱۰ درصد حجمی  $Al_2O_3$  با استفاده از روش ساخت مورد استفاده در این پژوهش بهترین خواص فشاری را از خود نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش فوم کامپوزیتی  $Al-Al_2O_3$  با روش فضا ساز تولید شد. بررسی‌ها نشان داد افزایش درصد حجمی فاز تقویت‌کننده ( $Al_2O_3$ ) تا ۱۰٪ موجب افزایش استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح می‌شود. این افزایش می‌تواند به دلیل بهبود استحکام دیواره سلول فوم‌ها باشد که به صورت ساختار کامپوزیتی در آمده است. هم‌چنین افت خواص استحکام فشاری و تنش ناحیه مسطح در نمونه‌های با بیش‌تر از ۱۰٪ حجمی  $Al_2O_3$  به دلیل تغییر مکانیزم تغییر شکل و فشردن حفره‌ها و متغیرهای تولید است.

فوم شده و در نتیجه خواص فشاری و جذب بهبود پیدا کرده است. اما روند افت خواص فشاری با افزایش درصد حجمی  $Al_2O_3$  از ۱۰ به ۲۰، ۳۰ و ۴۰ می‌تواند به دلیل‌های زیر باشد:

- ۱- ترد شدن دیواره‌ها و تغییر مکانیزم بسته شده حفره‌ها
  - ۲- از آنجایی‌که با افزایش ذرات سرامیکی در یک کامپوزیت زمینه فلزی نیاز به فشردن نمونه‌های پودری با روش‌های پیشرفته‌تری همانند پرس گرم و پرس هیدرو استاتیک است، روش پرس تک محوره در دمای محیط نمی‌تواند نتیجه مناسبی را ایجاد کند [۲۱ و ۲۲].
  - ۳- با افزایش ذرات بسیار ریز فاز تقویت‌کننده تمایل به کلوخه شدن آنها بیش‌تر و یکنواختی توزیع ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه کم می‌شود. این مساله منجر به افت خواص مکانیکی می‌شود [۲۳].
- با توجه به استفاده از کربامید به‌عنوان ماده فضا ساز در این پژوهش، استفاده از روش‌های شکل‌دهی گرم به دلیل تبخیر کربامید و روش‌های شکل‌دهی با فشار بالاتر به دلیل تغییر شکل

### مراجع

1. Wang, Z., Ning, L.J., and Zhao, L., "Effect of Heat Treatments on the Crushing Behavior and Absorbing Performance of Aluminum Alloys Foams", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 977-982, 2009.
2. Campana, F., and Pilone, D., "Effect of Heat Treatments on the Mechanical Behaviour of Aluminum Alloy Foams", *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 679-682, 2009.
3. Kolluri, M., Kartheyan, S., and Ramamurty, U., "Effect of Lateral Constraint on the Mechanical Properties of a Closed-Cell Al Foam: 1. Experiments", *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. A 38, pp. 2006-2013, 2007.
4. Greene, S.A., Hall, I.W., and Guden, M., "Improving the Energy Absorption of Closed Cell Aluminum Foams", *Journal of Materials Science Letters*, Vol. 21, pp. 1591-1593, 2002.
5. Guden, M., and Yuksel, S., "SiC-Particulate Aluminum Composite Foams Produced from Powder Compacts: Foaming and Compression Behavior", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, pp. 4075-4084, 2006.
6. Yu, S., Luo, Y., and Liu, J., "Effects of Strain Rate and SiC Particle on the Compressive Property of SiCp/AlSi9Mg Composite Foams", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 487, pp. 394-399, 2008.
7. Zhao, N.Q., Jiang, B., Du, X.W., Li, J.J., and Shi, C.S., "Effect of  $Y_2O_3$  on the Mechanical Properties of Open Cell Aluminum Foams", *Materials Letters*, Vol. 60, pp. 1665-1668, 2006.
8. Prabhu, B., Suryanarayana, C., Ana, L., and Vaidyanathan., "Synthesis and Characterization of High Volume Fraction Al- $Al_2O_3$  Nanocomposite Powders by High-Energy Milling", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 425, pp. 192-200, 2006.
9. Razavi Hesabi, Z., Simchi, A., and Seyed Reihani, S.M., "Structural Evolution During Mechanical Milling of Nanometric and Micrometric  $Al_2O_3$  Reinforced Al Matrix Composites," *Materials Science and Engineering*, Vol. A 428, pp. 159-168, 2006.
10. Alizadeh, M., and Mirzaei Aliabadi, M., "Synthesis Behavior of Nanocrystalline Al- $Al_2O_3$  Composite During Low Time Mechanical Milling Process",

- Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 4978-4986, 2011.
11. Benajmin, J.S., and Volin, T.E., "The Mechanism of Mechanical Alloying", *Metallurgical Transactions*, Vol. 5, pp. 1929-1934, 1974.
  12. Ozan, S., and Bilhan, S., "Effect of Fabrication Parameters on the Pore Concentration of the Aluminum Metal Foam Manufactured by Powder Metallurgy Process," *International Journal of Advanced Manufactured Technology*, Vol. 39, pp. 257-260, 2008.
  13. Wang, Q.Z., Cui, C.X., Liu, S.J., and Zhao, L.C., "Open-Celled Porous Cu Prepared by Replication of NaCl Space-Holders", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 527, pp. 1275-1278, 2010.
  14. Surace, R., De Filippis, L.A.C., Ludocico, A.D., and Boghetich, G., "Influence of Processing Parameters on Aluminum Foam Produced by Space Holder Technique", *Materials and Design*, pp. 1878-1885, 2009.
  15. Wenjuan, N., Chenguang, B., Guibao, Q., and Qiang, W., "Processing and Properties of Porous Titanium Using Space Holder Technique", *Materials Science and Engineering*, Vol. A 506, pp. 148-151, 2009.
  16. Jiang, B., Zhao, N.Q., Shi, C.S., and Li, J.J., "Processing of Open Cell Aluminum Foams with Tailored Porous Morphology," *Scripta Materialia*, Vol. 53, pp. 781-785, 2005.
  17. Bin, J., Zejun W., and Naiqin, Z., "Effect of Pore Size and Relative Density on the Mechanical Properties of Open Cell Aluminum Foams," *Scripta Materialia*, Vol. 56, pp. 169-172, 2007.
  18. Jiang, B., Zhao, N. Q., Shi, C.S., Li, J.J., and Man, H.C., "A Novel Method for Making Open Cell Aluminum Foams by Powder Sintering Process", *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 3333-3336, 2005.
  19. Li, D.S., Zhang, Y.P., Eggeler, G., And Zhang, X.P., "High Porosity and High-Strength Porous NiTi Shape Memory Alloys with Controllable Pore Characteristics", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 470, pp. L1-L5, 2009.
  20. Alizadeh, M., and Mirzaei Aliabadi, M., "Compressive Properties and Energy Absorption Behavior of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Foam Synthesized by Space-Holder Technique", *Materials and Design*, Vol. 35, pp. 419-424, 2012.
  21. Eskandari, H., Ghasemi, H.M., and Emamy, M., "Microstructure and Interface Studies of Al/SiCp Composites Produced by Dynamic Compaction", *Materials Science Forum*, Vol. 465-466, pp. 213-218, 2004.
  22. Bond, G.M., and Inal, O.T., "Shock-Compacted Aluminum/Boron Carbide Composites", *Composites Engineering*, Vol. 5, pp. 9-16, 1995.
  23. Kim, K.T., Choi, S.W., and Park, H., "Densification Behavior of Ceramic Powder Under Cold Compaction", *Transactions of the ASME*, Vol. 122, pp. 238-244, 2000.