



E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 8, No. 4, pp. 49-58, 2024



<https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.5>

Journal Homepage: <https://jtae.ari.ac.ir>



Original Research Paper

## Fabrication and Investigation of Mechanical Properties Aluminum Composite Foam Reinforced with Silicon Carbide Particles

Ali Alizadeh<sup>1\*</sup> , Mohsen Heydari Beni<sup>2</sup>, Mohammadreza Zahmatkesh<sup>3</sup>, and Mehdi Abdollahi Azghan<sup>4</sup> 

1, 2, 3. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran  
4. Composite Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 18 November 2023  
Revised 05 December 2023  
Accepted 10 December 2023  
Available Online 10 December 2023

#### Keywords:

Thermal barrier coating composite  
Foam  
A356 alloy  
Three-point bending test  
Compression test  
Stabilizing

### ABSTRACT

Due to their cellular structure, metal foams have properties such as low density, strength to weight, and high energy absorption under compressive stresses. Among the various metals used for foaming, aluminum, and its alloys are the most widely used due to their relatively low density, availability, and ease of foam formation. In this research, A356 aluminum and composite foams with different amounts of silicon carbide (SiC) particles as a reinforcing and stabilizing agent and calcium carbonate powder (CaCO<sub>3</sub>) as a foaming agent were produced using the direct foaming method from the melt. The density of the foam sample was measured between 0.493 and 0.863 g/cubic centimeter. Then, the microstructure of the foams was examined by OM and SEM microscopes, as well as the compressive and flexural properties of the foams in both conventional and sandwich panels. The relationship between flat stress and density with the weight percentage of CaCO<sub>3</sub> and SiC particles was investigated, which shows that the compressive behavior of foam products is not uniform. On the other hand, it was shown that at 10% by weight of the SiC boosting agent, plateau stress increases with decreasing CaCO<sub>3</sub> powder content from 6.89 to 11.62 MPa.

\* Corresponding Author's E-mail: [a\\_alizadeh@mut.ac.ir](mailto:a_alizadeh@mut.ac.ir)

#### How to Cite this Article:

A. Alizadeh, M. Heydari Beni, M. Zahmatkesh, and M. Abdollahi Azghan, "Fabrication and Investigation of Mechanical Properties Aluminum Composite Foam Reinforced with Silicon Carbide Particles," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 49-58, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.5>.

#### COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





## ساخت و بررسی خواص مکانیکی فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات کاربید سیلیسیم

علی علیزاده<sup>۱\*</sup>، محسن حیدری بنی<sup>۲</sup>، محمدرضا زحمتکش<sup>۳</sup>، و مهدی عبدالهی آذغان<sup>۴</sup>

- ۱- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
- ۲- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
- ۳- کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
- ۴- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد مرکب، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

### چکیده

در پژوهش حاضر به ساخت و بررسی خواص مکانیکی فوم کامپوزیتی زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات کاربید سیلیسیم پرداخته شده است. فوم‌های فلزی به واسطه ساختار سلولی خود دارای ویژگی‌هایی از قبیل چگالی پایین، استحکام به وزن و جذب انرژی بالا در تنش‌های فشاری می‌باشند. در میان فلزات مختلف که به منظور فوم‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن چگالی نسبتاً پایین، در دسترس بودن و سهولت تشکیل فوم، بیشترین کاربرد را دارند. در این تحقیق فوم‌های آلومینیومی A356 و کامپوزیتی با مقادیر مختلف از ذرات کاربید سیلیسیم (SiC) به عنوان عامل تقویت کننده و پایدار ساز و پودر کربنات کلسیم (CaCO<sub>3</sub>) به عنوان عامل فوم‌ساز با استفاده از روش فوم‌سازی مستقیم از مذاب تولید شد. چگالی نمونه فومی بین ۰/۴۹۳ تا ۰/۸۶۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد. پس از آن ریزساختار فوم‌ها توسط میکروسکوپ‌های OM و SEM و خواص فشاری و خمشی فوم‌ها به دو صورت معمولی و ساندویچ پل مورد بررسی قرار گرفت. ارتباط بین تنش مسطح و چگالی با درصد وزنی CaCO<sub>3</sub> و ذرات SiC بررسی شد که نشان می‌دهد رفتار فشاری محصولات فومی، یکنواخت نیست. از سوی دیگر نشان داده شد که در ۱۰٪ وزنی از عامل تقویت کننده SiC، تنش مسطح (پایا) با کاهش مقدار پودر CaCO<sub>3</sub>، از ۶/۸۹ الی ۱۱/۶۲ مگاپاسکال افزایش می‌یابد.

### اطلاعات مقاله

#### تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۷ آبان ۱۴۰۲  
بازنگری ۱۴ آذر ۱۴۰۲  
پذیرش ۱۹ آذر ۱۴۰۲  
اولین انتشار ۱۹ آذر ۱۴۰۲

#### واژه‌های کلیدی:

فوم کامپوزیتی  
آلیاژ A356  
خواص خمشی  
خواص فشاری  
پایدار ساز

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [a\\_alizadeh@mut.ac.ir](mailto:a_alizadeh@mut.ac.ir)

#### How to Cite this Article:

A. Alizadeh, M. Heydari Beni, M. Zahmatkesh, and M. Abdollahi Azghan, "Fabrication and Investigation of Mechanical Properties Aluminum Composite Foam Reinforced with Silicon Carbide Particles," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 49-58, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.5>.

#### COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



استفاده از  $TiH_2$  مشکل و حساس است اما  $CaMg(CO_3)_2$  با زمان تجزیه بیشتر و امکان کنترل بهتر فرایند می‌تواند هم به عنوان عامل فوم‌ساز و هم عامل پایدارساز عمل نماید و باعث ایجاد سلول‌های کوچک‌تر و دیواره‌های نازک‌تر شود.

لی و همکاران [۹] به بررسی مقاومت فشاری فوم کامپوزیتی آلومینیومی پرداخته‌اند. در این مطالعه رفتار مقاومت فشاری فوم آلومینیومی پر شده با ترکیبات بین فلزی  $Mg_{17}Al_{12}$  با نمونه فوم آلومینیومی مقایسه شد. نویسندگان دریافتند که مقاومت فشاری کامپوزیت‌ها ۴/۹ برابر بیشتر از فوم‌های آلومینیومی است.

مگی و تورنتون [۱۰] نشان داده‌اند که تنش پایای فوم‌های آلومینیومی که دارای سلول‌های بسته هستند، با تغییر ترکیب شیمیایی و عملیات حرارتی آن‌ها تغییر می‌کند؛ بنابراین با انتخاب یک فلز و یا اصلاح و تغییر ترکیب شیمیایی آن و انجام عملیات حرارتی مناسب می‌توان فلز یا آلیاژی را تهیه نمود که دارای تنش و کرنش پایای بالایی بوده و در نتیجه قابلیت جذب انرژی بیشتری را داشته باشد.

وانگ و همکارانش [۱۱] آزمایش‌های فشرده‌سازی در ارزیابی بر رفتار خردکننده و عملکرد جذب انرژی فوم‌های آلیاژی  $Al-Mg-Si$  و  $Al-Mg$  را در سه وضعیت انجام دادند که شامل حالت‌های ساخته شده خام، سخت شده تحت عملیات حرارتی T6 و پیرسختی شده بود. نتایج نشان داد که عملیات حرارتی می‌تواند توانایی‌های جذب انرژی و فشرده‌سازی فوم  $Al-Mg-Si$  را در هر دو حالت شبه استاتیک (نرخ کرنش  $s^{-1} 0.01$ ) و دینامیک (نرخ کرنش  $s^{-1} 2000$ ) افزایش دهد. لیو و همکارانش [۱۲] خواص فشاری فوم‌های  $22Al-Zn$  که از طریق فرایند فوم‌سازی با استفاده از عامل فوم‌سازی  $CaCO_3$  ساخته شده بود را مورد بررسی قرار دادند. آن مشاهده کردند با افزایش چگالی نسبی، سطح زیر نمودار که نشان دهنده قابلیت جذب انرژی است، افزایش یافت.

یو و همکارانش [۱۳] تأثیر قطر سلولی بر خواص فشاری و جذب انرژی فوم آلومینیوم را بررسی کردند. نتایج نشان داد زمانی که قطر سلول کوچک است، نمودار تنش-کرنش منطقه تنش پایا مسطح است، بازدهی جذب انرژی خوب است.

باتوجه به مطالب تحقیقات صورت‌گرفته، مهم‌ترین چالش‌های ساخت فوم‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیومی استحکام و انرژی جذب شده پایین فوم‌های تولید شده است. در مقاله حاضر، تأثیر درصد‌های وزنی مختلف عامل فوم‌ساز  $CaCO_3$  و ذرات  $SiC$  به‌عنوان فاز تقویت‌کننده بر ریزساختار و خواص مکانیکی فوم  $A356/SiC_p$  مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۱ مقدمه

فوم‌های فلزی<sup>۱</sup> گروهی از مواد مهندسی می‌باشند که به دلیل داشتن مجموعه‌ای از خواص جدید و بهینه شده در ردیف مواد پیشرفته قرار می‌گیرند. فوم‌های فلزی با دارا بودن خواص فیزیکی، مکانیکی، الکتریکی الکترومغناطیسی و آکوستیکی<sup>۲</sup>، جای خود را به سرعت در صنعت پیدا کرده‌اند [۱]. چگالی کم، نسبت استحکام به وزن بالا و قدرت جذب انرژی ضربه‌ای به دلیل ساختار متخلخل از جمله خواص مکانیکی این نوع مواد است [۲، ۳].

در میان فلزات مختلف که به‌منظور فوم‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن چگالی نسبتاً پایین، مقاومت به خوردگی بالا، نقطه ذوب پایین، در دسترس بودن و سهولت تشکیل فوم بیشترین کاربرد را دارند. فوم‌های آلومینیومی با روش‌های متعددی از جمله متالورژی پودر، دمیدن گاز به درون مذاب و استفاده از عامل فوم‌زا تولید می‌شوند. دسته جدید از فوم‌های آلومینیومی، فوم‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیومی هستند که با توجه به عامل تقویت‌کننده نسبت به فوم‌های غیر کامپوزیتی دارای استحکام و سختی بالاتر بدون اثرگذاری بر خواص زمینه می‌باشند [۴، ۵].

کوران [۶] از  $CaCO_3$  و  $TiH_2$  به عنوان عامل فوم‌ساز برای تولید فوم آلومینیومی استفاده کرد. نتایج آزمایش‌های او نشان داد فوم‌های تولید شده با  $CaCO_3$  نسبت به  $TiH_2$ ، تخلخل‌های ریزتر و ساختار یکنواخت‌تری داشتند. همچنین خواص فشاری بهتری در مقایسه با فوم‌های تولید شده با استفاده از  $TiH_2$  داشتند. کوران این اختلاف را ناشی از واکنش‌های انجام شده بین کربنات کلسیم و مذاب آلومینیوم که باعث پایداری فوم مذاب شده دانست که منجر به ساختار یکنواخت‌تری می‌شود.

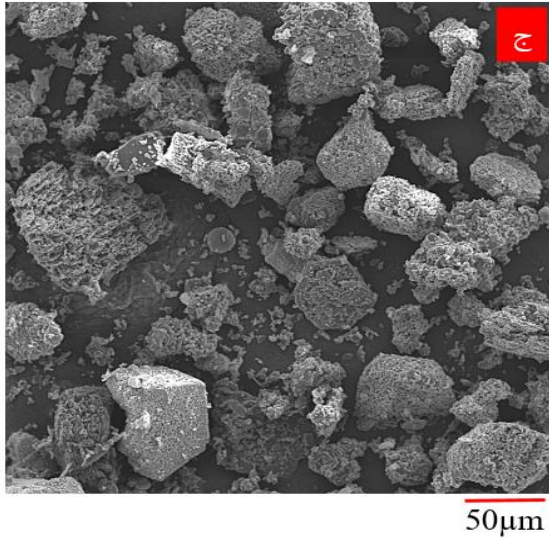
اثر متغیرهای فرایند تولید به روش ذوبی با عامل فوم‌ساز  $TiH_2$  و عامل پایدارساز اکسید منیزیم  $MnO_2$  و ترکیب آلیاژ پایه (آلومینیوم خالص و آلیاژ  $AlMn10$ ) بر روی ساختار تخلخل‌ها توسط فوشنگ و همکارانش [۷] بررسی شد. کاهش چگالی محصول فومی با افزایش زمان همزدن، افزایش چگالی با افزایش میزان  $MnO_2$ ، کاهش چگالی با افزایش دمای فوم‌سازی و نیز کاهش چگالی با افزایش مقدار  $TiH_2$  از جمله یافته‌های این بررسی است.

پاپادوپولوس و همکارانش [۸] از  $CaMg(CO_3)_2$  به عنوان عامل فوم‌ساز در تولید فوم آلومینیوم خالص به روش ذوبی با عامل پایدارساز  $Ca$  استفاده نمودند و محصولات را با فوم‌های تولیدی با عامل فوم‌ساز  $TiH_2$  از لحاظ تأثیر نوع عامل فوم‌ساز بر ریزساختار فوم‌های تولیدی مقایسه کردند. آن‌ها مشاهده کردند، کنترل فرایند با

## ۲ بخش تجربی

### ۱.۲ مواد

در تحقیق حاضر از آلیاژ A۳۵۶ به‌عنوان زمینه آلومینیومی کامپوزیت استفاده شد. دلیل استفاده از این آلیاژ وجود عنصر سیلیسیم در ترکیب آن و در نتیجه خواص سیلان و ذوب‌ریزی مطلوب‌تر و نیز وجود منیزیم در راستای افزایش قدرت ترکنندگی مذاب است. از عامل فوم‌ساز  $\text{CaCO}_3$  با اندازه ذرات متوسط  $1\ \mu\text{m}$  استفاده شد. همچنین از ذرات تقویت‌کننده SiC با اندازه ذرات کمتر از  $200\ \mu\text{m}$  و ذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با اندازه ذرات کمتر از  $50\ \mu\text{m}$  برای کاهش سیالیت مذاب (محصولات شرکت Merck) استفاده شد. شکل ۱ مورفولوژی ذرات  $\text{CaCO}_3$ ، SiC و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  را نشان می‌دهد.

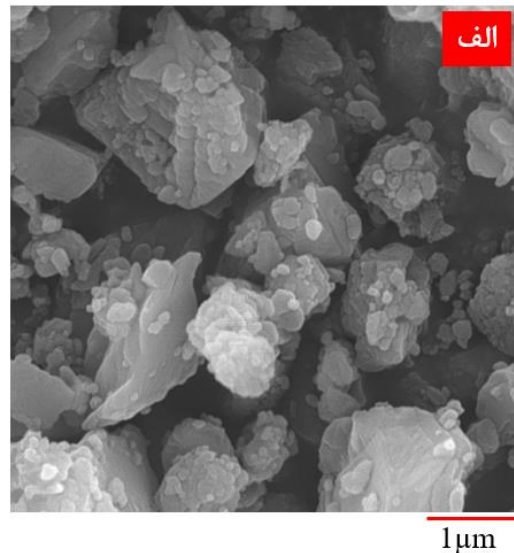


ادامه شکل ۱- تصاویر FESEM از ذرات الف)  $\text{CaCO}_3$ ، ب) SiC و ج)  $\text{Al}_2\text{O}_3$

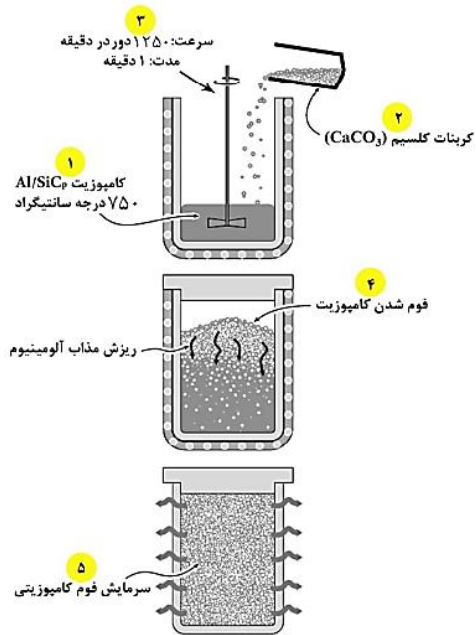
### ۲.۲ ساخت کامپوزیت‌ها و ساندویچ پنل

قبل از ساخت فوم‌های کامپوزیتی، به‌منظور حذف رطوبت، افزایش قدرت تجزیه ذرات  $\text{CaCO}_3$  و توزیع مناسب آن در داخل مذاب، این ذرات تحت فرایند آماده‌سازی حرارتی به مدت ۲ ساعت در دمای  $200^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و سرمایش در دمای محیط قرار گرفت. همچنین به منظور افزایش ترشوندگی ذرات SiC توسط مذاب، این ذرات تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند تا اکسیداسیون سطحی رخ دهد و لایه اکسیدی  $\text{SiO}_2$  تشکیل شده روی سطح ذرات، ترشوندگی با مذاب آلومینیوم را بهبود می‌بخشد. این فرایند شامل حرارت دادن به مدت ۲ ساعت در دمای  $950^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد و خنک کردن در دمای محیط بود.

به‌منظور آماده‌سازی شمش‌های کامپوزیتی ابتدا آلیاژ A356 در دمای  $690^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد ذوب شد و مذاب توسط همزن گرافیتی با سرعت  $460\ \text{rpm}$  هم‌زده شد. ذرات SiC در مقادیر ۵، ۷ و ۱۰ درصد حجمی، به صورت تدریجی داخل مذاب ریخته و به مدت ۲۰ دقیقه هم زده شد. پس از آن مذاب کامپوزیتی در داخل قالب ریخته‌گری شد. شکل ۲ شماتیک ساخت شمش کامپوزیتی را نشان می‌دهد. برای نمونه بدون تقویت‌کننده این مرحله اجرا نشد و آلیاژ A356 مستقیم وارد مرحله ساخت فوم شد. برای ساخت فوم ابتدا به مقدار لازم از شمش کامپوزیتی بریده و سپس در دمای  $750^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد ذوب گردید. پس از آن، مذاب به مدت یک دقیقه برای توزیع بهتر ذرات SiC با سرعت  $1250\ \text{rpm}$  هم‌زده شد بعد از آن عامل فوم‌ساز با مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی به مذاب افزوده و پس از یک دقیقه، هم‌زدن متوقف و مذاب به مدت ۵ دقیقه در



شکل ۱- تصاویر FESEM از ذرات الف)  $\text{CaCO}_3$ ، ب) SiC و ج)  $\text{Al}_2\text{O}_3$



شکل ۳- شماتیک ساخت فوم آلیاژی A356 و کامپوزیتی A356/SiCp

جدول ۱- کد نمونه، ذرات افزودنی و نوع فوم ساخته شده.

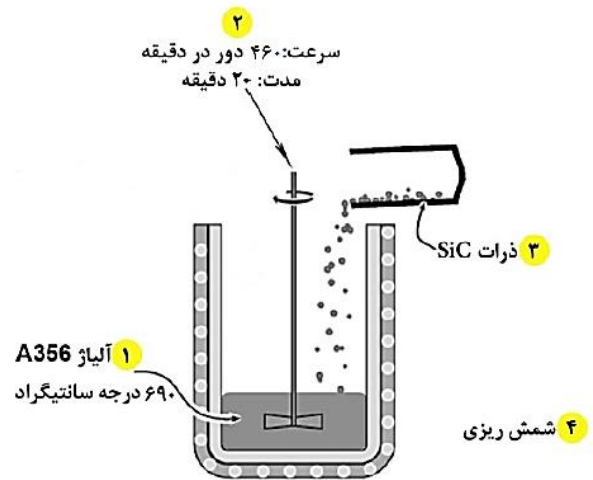
| کد نمونه | نوع نمونه | CaCO <sub>3</sub> (Wt.%) | SiC (Wt.%) |
|----------|-----------|--------------------------|------------|
| ۱        | آلیاژی    | ۱                        | —          |
| ۲        | آلیاژی    | ۳                        | —          |
| ۳        | آلیاژی    | ۵                        | —          |
| ۴        | کامپوزیتی | ۱                        | ۵          |
| ۵        | کامپوزیتی | ۳                        | ۵          |
| ۶        | کامپوزیتی | ۵                        | ۵          |
| ۷        | کامپوزیتی | ۱                        | ۷          |
| ۸        | کامپوزیتی | ۳                        | ۷          |
| ۹        | کامپوزیتی | ۵                        | ۷          |
| ۱۰       | کامپوزیتی | ۱                        | ۱۰         |
| ۱۱       | کامپوزیتی | ۳                        | ۱۰         |
| ۱۲       | کامپوزیتی | ۵                        | ۱۰         |

#### ۴.۲ بررسی ریزساختار

به منظور بررسی ریزساختار کامپوزیت‌ها از میکروسکوپ نوری<sup>۲</sup> اولایمپوس<sup>۳</sup> مجهز به دوربین دیجیتال BX61 و میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی<sup>۴</sup> (FESEM) مدل TESCANA MIRA3 مجهز به طیف‌سنج<sup>۵</sup> EDS استفاده شد.

دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد نگه داشته شد. پس از تکمیل واکنش‌های عامل فوم‌ساز، قالب از داخل کوره خارج و محصول متخلخل داخل آن در دمای محیط سرد و منجمد شد. شکل ۲ مراحل ساخت فوم آلومینیومی را نشان می‌دهد. شکل ۳ شماتیک ساخت فوم آلیاژی و کامپوزیتی و جدول ۱ کد نمونه، درصد افزودنی‌ها و نوع نمونه را نشان می‌دهند.

برای ساخت ساندویچ پنل با هسته فومی ابتدا از فوم‌های تولید شده، با ابعاد حدود ۱۵×۲×۲ cm<sup>3</sup> بریده شد. پس از آن ورق‌هایی به همان ابعاد و از جنس آلیاژ A6061 تهیه و جهت به فوم‌های تولید شده از چسب پایه اپوکسی در دمای محیط و تحت نیروی ۵۰N به مدت ۲۴ ساعت استفاده شد.



شکل ۲- شماتیک ساخت شمش کامپوزیتی A356/SiCp

#### ۳.۲ آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی

چگالی نمونه‌ها، به روش ارشمیدس طبق استاندارد ASTM B962 اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های تهیه شده از آزمون‌های فشار تک‌محوری، خمش سه نقطه‌ای استفاده شد. آزمون فشار به وسیله دستگاه سنتام<sup>۱</sup> مطابق استاندارد ASTM E8/E8M با سرعت ۰/۵ mm/min و آزمون خمش سه نقطه‌ای تحت استاندارد ASTM E90، با سرعت ۰/۵ mm/min، طول تکیه‌گاه‌ها ۲۲ میلی‌متر و به وسیله دستگاه سنتام انجام شد. آزمون‌های مکانیکی برای هر گروه از نمونه‌ها سه بار انجام و میانگین آن گزارش شد.

4. Field Emission Scanning Electron Microscopy  
5. Energy Dispersive Spectroscopy

1. SANTAM  
2. Optical Microscope  
3. Olympus

## ۳ نتایج و بحث

## ۱.۳ بررسی چگالی فوم‌های کامپوزیتی

نتایج حاصل از اندازه‌گیری چگالی و محاسبه چگالی نسبی و درصد تخلخل، در جدول ۲ آورده شده است. با افزایش میزان عامل پایدارساز و تقویت‌کننده SiC در یک مقدار مشخص از عامل فوم‌ساز  $\text{CaCO}_3$ ، چگالی فوم تولیدی افزایش می‌یابد. طبق رابطه ۱ هر حفراهی برای تشکیل و رشد در داخل مذاب، باید دارای فشار گاز بالاتر از مجموع فشار اتمسفر، فشار هیدرواستاتیکی مذاب و کشش سطحی باشد.

$$P_n > P_a + P_h + P_c \quad \text{معادله ۱}$$

در این رابطه  $P_n$  فشار داخل حفره،  $P_a$  فشار اتمسفر،  $P_h$  فشار هیدرواستاتیکی مذاب در عمق  $h$  از سطح مذاب و  $P_c$  فشار اضافی ناشی از کشش سطحی مذاب است [۷]. برای آلومینیوم و اغلب آلیاژهای آن معمولاً روند تغییرات کشش سطحی همانند تغییرات گرانیوی مذاب است. در صورتی که گرانیوی مذاب زیاد باشد جوانه‌زنی و رشد حفره مشکل می‌شود و به این ترتیب محصول فومی با اندازه کوچک‌تر سلول‌ها، دیواره‌های ضخیم‌تر و چگالی بالاتر حاصل می‌شود. برعکس اگر حفره به راحتی رشد نماید، اندازه سلول‌ها افزایش و چگالی محصول کاهش می‌یابد [۷]. از سوی دیگر داده‌های معادله ۲ نشان می‌دهند که با افزایش میزان  $\text{CaCO}_3$  در یک مقدار مشخص از عامل پایدارساز SiC، به سبب تولید حفراهای گازی بیشتر، درصد تخلخل فوم افزایش و درصد تخلخل چگالی محصول تولیدی کاهش می‌یابد.

گرگی و همکارانش [۱۴] با ارائه رابطه ترمودینامیکی ۲ نشان دادند که افزایش کسر حجمی پودر  $\text{CaCO}_3$  در داخل مذاب سبب افزایش میزان گاز تولیدی می‌شود.

$$f_{\text{CaCO}_3(C)} = \frac{P f_G M_{\text{CaCO}_3}}{RT f_L f_{\text{CaCO}_3(V)} \rho_{\text{CaCO}_3(V)}} \quad \text{معادله ۲}$$

در این رابطه،  $f_{\text{CaCO}_3(C)}$  کسر کرنات کلسیم تجزیه شده،  $P$  فشار گاز داخل حفره‌ها،  $f_G$  کسر حجمی گاز تولیدی در داخل مذاب،  $M_{\text{CaCO}_3}$  جرم حجمی کرنات کلسیم،  $R$  ثابت گازها،  $T$  دمای فوم‌سازی،  $f_L$  کسر حجمی مذاب،  $f_{\text{CaCO}_3(V)}$  کسر حجمی کرنات کلسیم اضافه شده به مذاب و  $\rho_{\text{CaCO}_3(C)}$  چگالی کرنات کلسیم است. مشخص است که در شرایط یکسان و کسر حجمی کرنات کلسیم تجزیه شده ثابت  $(f_{\text{CaCO}_3(C)})$ ، افزایش کسر حجمی کرنات کلسیم  $(f_{\text{CaCO}_3(V)})$  به معنای افزایش کسر حجمی گاز تولیدی  $(f_G)$  و به تبع آن افزایش تخلخل موجود در ساختار و در نتیجه کاهش چگالی محصول فومی است [۱۴].

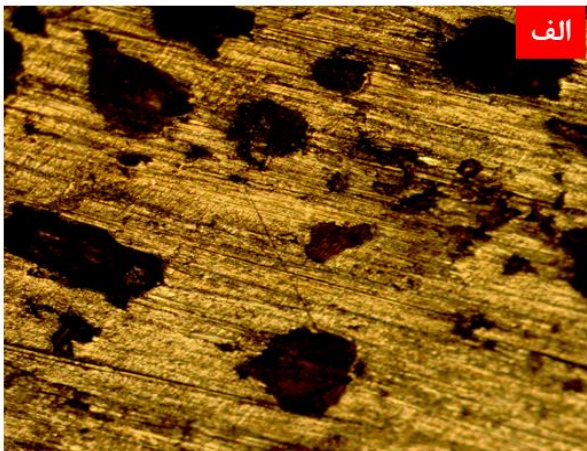
جدول ۲- چگالی، چگالی نسبی و درصد تخلخل فوم ساخته شده.

| کد نمونه | درصد تخلخل | چگالی نسبی ( $\rho/\rho_s$ ) | چگالی ( $\text{g/cm}^3$ ) |
|----------|------------|------------------------------|---------------------------|
| ۱        | ۸۱/۸       | ۰/۱۸۲                        | ۰/۴۹۳                     |
| ۲        | ۸۳/۵       | ۰/۱۶۵                        | ۰/۴۴۷                     |
| ۳        | ۸۴/۶       | ۰/۱۵۴                        | ۰/۴۱۸                     |
| ۴        | ۷۵/۴       | ۰/۲۴۶                        | ۰/۶۶۶                     |
| ۵        | ۷۸/۸       | ۰/۲۱۲                        | ۰/۵۷۴                     |
| ۶        | ۸۲/۵       | ۰/۱۷۵                        | ۰/۴۷۳                     |
| ۷        | ۷۲/۸       | ۰/۲۷۲                        | ۰/۷۳۵                     |
| ۸        | ۷۶/۳       | ۰/۲۳۷                        | ۰/۶۴۱                     |
| ۹        | ۸۰/۵       | ۰/۱۹۵                        | ۰/۵۲۶                     |
| ۱۰       | ۶۸/۱       | ۰/۳۱۹                        | ۰/۸۶۳                     |
| ۱۱       | ۷۳/۳       | ۰/۲۶۷                        | ۰/۷۲۳                     |
| ۱۲       | ۷۷/۹       | ۰/۲۲۱                        | ۰/۵۹۹                     |

## ۲.۳ بررسی ریزساختار فوم‌های کامپوزیتی

## ۱.۲.۳ ریزساختار فوم‌های آلیاژی

شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار فوم‌های آلومینیومی را با افزایش درصد عامل فوم‌ساز  $\text{CaCO}_3$  نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی  $\text{CaCO}_3$  ضخامت دیواره‌ها کاهش می‌یابد.



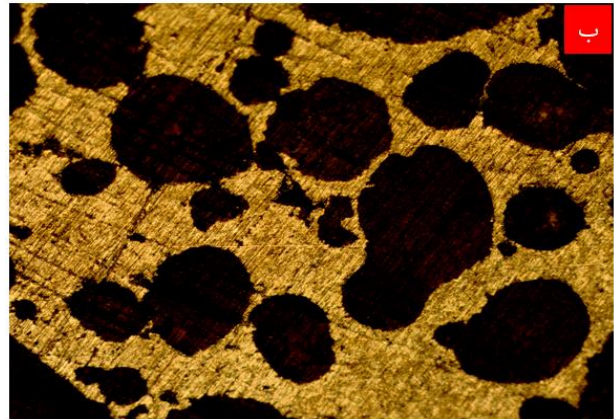
400 $\mu\text{m}$

شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ OM از فوم‌های آلیاژی حاوی الف (۱٪، ب) ۳٪ و ج) ۵٪ وزنی  $\text{CaCO}_3$ .

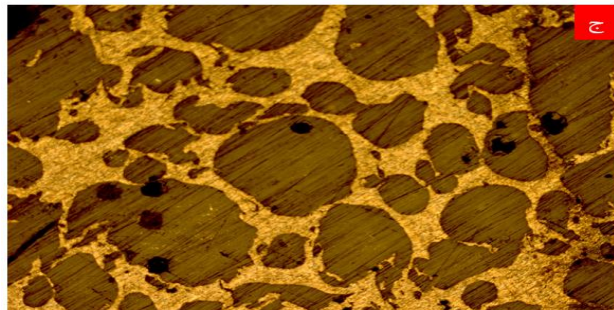
### ۲.۲.۳ ریزساختار فوم‌های کامپوزیتی

شکل ۵ تصاویر OM از ساختار و توزیع حفرات در نمونه فوم کامپوزیتی با افزایش مقدار ذرات SiC را نشان می‌دهد. ذرات SiC که در درون دیواره‌های سلول‌ها وجود دارند به وضوح قابل مشاهده است. ذرات SiC در ساختار فوم‌های کامپوزیتی نقش بسیار موثری در افزایش چگالی، پایداری و گرانبوی مذاب دارد و باعث ایجاد ساختار فومی مطلوب‌تر با خواص مکانیکی بهتر می‌شود. با افزایش میزان ذرات SiC و به تبع آن ارتقای عملکرد پایداری، ضخامت دیواره‌ها و در نتیجه چگالی افزایش و اندازه متوسط حفرات کاهش می‌یابد و از تخریب دیواره‌ها و به هم پیوستن تخلخل‌ها که در مقادیر کمتر ذرات پایداریزاس مشاهده است، ممانعت می‌شود. به عنوان مثال افزایش SiC از صفر تا ۱۰ درصد وزنی در مقدار ثابت ۱ درصد وزنی  $\text{CaCO}_3$ ، مطابق با داده‌های جدول ۲ سبب افزایش ۷۵ درصدی چگالی می‌شود. همچنین در مقدار ثابت ۱۰ درصد وزنی از ذرات SiC، افزایش مقدار  $\text{CaCO}_3$  از ۱ تا ۵ درصد وزنی با کاهش ۳۱ درصدی چگالی همراه است.

شکل ۶ تصاویر SEM نمونه حاوی ۳٪ وزنی  $\text{CaCO}_3$  و ۱۰٪ وزنی SiC را نشان می‌دهد. توزیع ذرات SiC در دیواره حفرات در شکل ۶-ب قابل مشاهده است همچنین در شکل ۶-ج آزمون EDS وجود ذرات SiC را تأیید می‌کند.

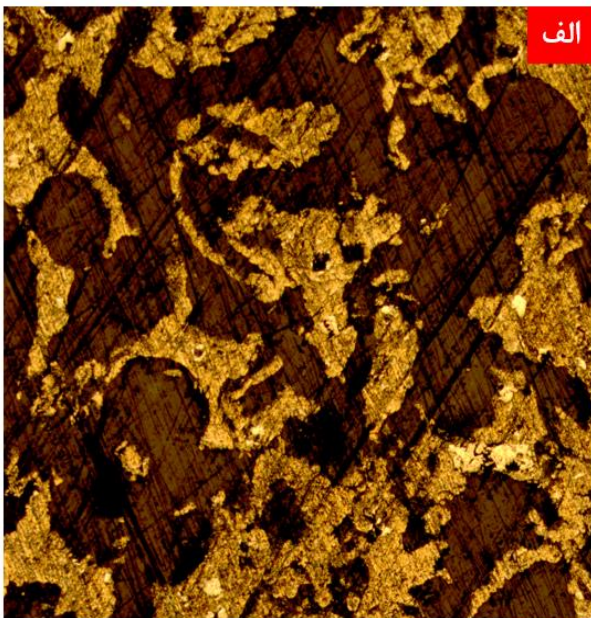


400µm



400µm

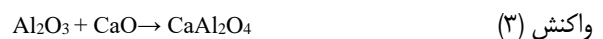
ادامه شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ OM از فوم‌های آلیاژی حاوی الف) ۱٪، ب) ۳٪ و ج) ۵٪ وزنی  $\text{CaCO}_3$ .

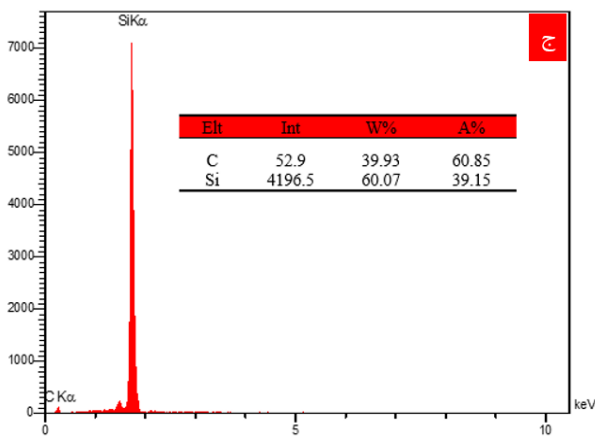
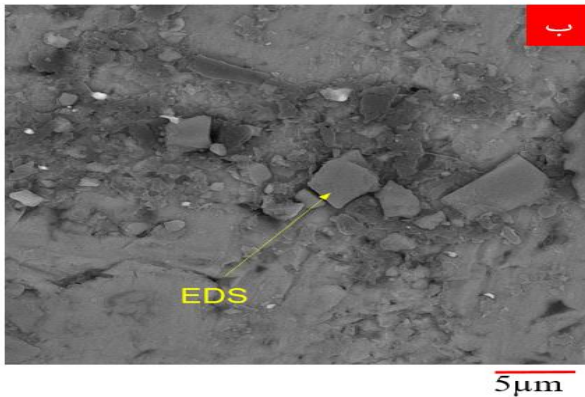


400µm

شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ OM از فوم‌های کامپوزیتی حاوی ۳٪ وزنی  $\text{CaCO}_3$  و الف) ۵٪، ب) ۷٪ و ج) ۱۰٪ وزنی SiC.

با افزایش مقدار  $\text{CaCO}_3$  به عنوان عامل فوم‌ساز، گاز تولید شده حاصل از واکنش  $\text{CaCO}_3$  با مذاب بیشتر بوده و به دنبال آن تعداد و اندازه متوسط حفرات افزایش و ضخامت دیواره‌ها کاهش می‌یابد. در طی فرایند ذوب آلومینیوم، واکنش بین آلومینیوم مذاب با گازهای  $\text{O}_2$ ،  $\text{CO}$  و  $\text{CO}_2$  طبق واکنش ۱ ممکن است رخ دهد. تجزیه کربنات کلسیم نیز با توجه به واکنش ۳ صورت می‌گیرد. در حفره که یک سلول بسته است، واکنش تجزیه به تعادل می‌رسد.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  تولید شده در واکنش ۱ و  $\text{CaO}$  در واکنش ۲ در مذاب ممکن است از طریق واکنش ۳ تشکیل  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  یا  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$  را منجر شوند. واکنش ۳ نقش مهمی در تثبیت منافذ ایجاد شده در طی فرایند انجماد دارد [۱۴].





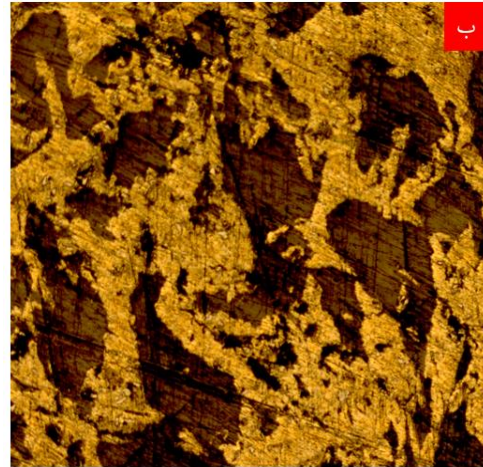
شکل ۶- الف و ب) تصاویر میکروسکوپ SEM از فوم‌های کامپوزیتی حاوی ۲٪ وزنی  $\text{CaCO}_3$  و ۱۰٪ وزنی  $\text{SiC}$  در بزرگمایی مختلف و ج) EDS حاصل در شکل ب.

### ۳.۳ بررسی خواص مکانیکی فوم‌های کامپوزیتی

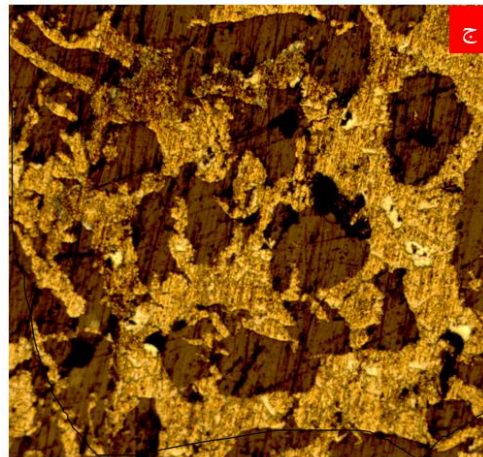
#### ۱.۳.۳ خواص فشاری

جدول ۲ نتایج حاصل از آزمون فشار را برای نمونه‌های تهیه شده نشان می‌دهد. سطح تنش در منطقه تنش مسطح (پایا) با افزایش چگالی افزایش می‌یابد چرا که استحکام ماده سازنده دیواره‌های سلول‌ها، افزایش یافته است. ذرات سرامیکی  $\text{SiC}$  توزیع شده در دیواره سلول‌ها (شکل ۶) تنش فشاری اعمالی را تا رسیدن به منطقه تنش مسطح و شرایط تسلیم تحمل می‌نماید. پس از آن و با رسیدن تنش به حد بحرانی، شکست در فصل مشترک ذرات و زمینه و یا شکست در خود ذرات رخ می‌دهد و منطقه تنش مسطح با تخریب دیواره‌های سلولی آغاز و به شکل دندانهای ادامه می‌یابد.

در بارگذاری فشاری تمامی انواع فوم‌های سلول بسته، به دلیل مورفولوژی سلولی، توزیع کرنش غیریکنواخت است و کرنش تمایل به موضعی شدن در لایه‌های نازک را دارد که این امر بسته به نرمی یا تردی ساختار به کماتش و یا پاره شدن دیواره‌های سلول‌ها منجر می‌شود. نقطه شروع تغییر شکل پلاستیک بستگی به ساختار سلولی دارد، اما عموماً تغییر شکل در سطح تماس با سطح بارگذاری آغاز می‌شود و لایه به لایه توسعه می‌یابد.

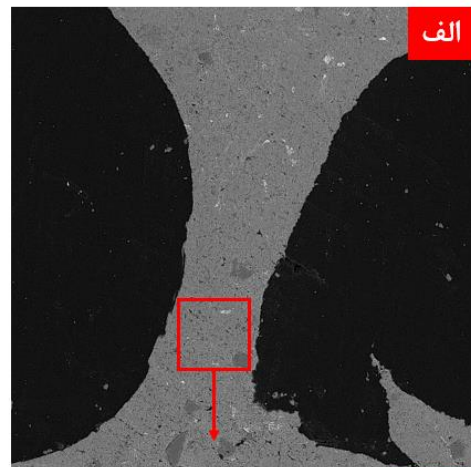


400μm



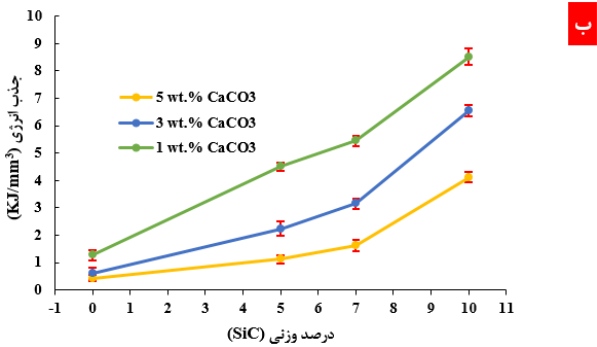
400μm

ادامه شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ OM از فوم‌های کامپوزیتی حاوی ۳٪ وزنی  $\text{CaCO}_3$  و الف) ۵٪، ب) ۷٪ و ج) ۱۰٪ وزنی  $\text{SiC}$ .



100μm

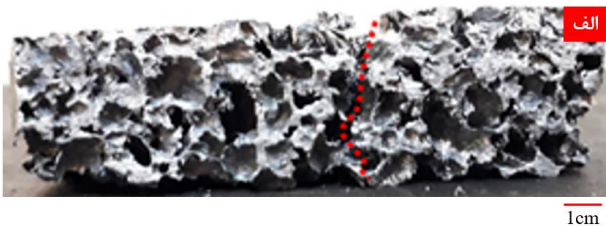
شکل ۶- الف و ب) تصاویر میکروسکوپ SEM از فوم‌های کامپوزیتی حاوی ۲٪ وزنی  $\text{CaCO}_3$  و ۱۰٪ وزنی  $\text{SiC}$  در بزرگمایی مختلف



شکل ۷- تأثیر درصد وزنی SiC و CaCO<sub>3</sub> بر (ب) میزان جذب انرژی کامپوزیت فومی.

### ۲.۳.۳ خواص خمشی

در شکل ۸ تصاویر تغییر فرم نمونه فوم کامپوزیتی و ساندویچ پنبلی حاوی ۱۰ درصد وزنی SiC و ۱ درصد وزنی CaCO<sub>3</sub> را نشان می‌دهد. بر اثر اعمال تنش نمونه‌ها دچار ترک شده و ترک ادامه پیدا کرده تا قطعه کاملاً خم و شکسته شود؛ اما در نمونه ساندویچ پنبلی نمونه دچار انحراف ترک شده و مسیر طی شده توسط ترک بیشتر می‌شود که این عامل افزایش انرژی شکست است. هر چه قدر عامل کامپوزیتی SiC در فوم بیشتر می‌شود استحکام در ساندویچ پنبلی‌ها نیز افزایش می‌یابد. به طور مثال استحکام خمشی ساندویچ پنبلی نمونه ۱۰ در مقایسه با ساندویچ پنبلی نمونه ۱، ۶۰٪ افزایش یافته است (شکل ۹). ساندویچ پنبلی‌های فومی، برخلاف نمونه فومی دارای استحکام خمشی بیشتری هستند.



(الف)



(ب)

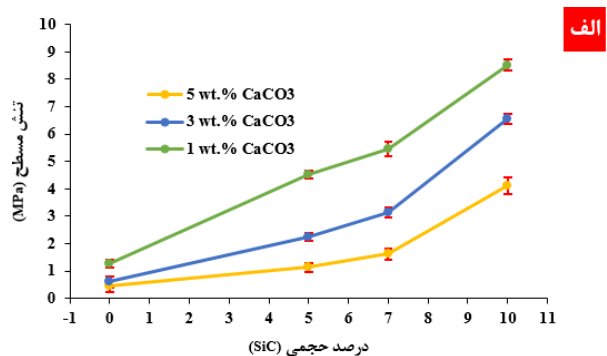
شکل ۸- تصاویر شکست نمونه (الف) فوم کامپوزیتی و (ب) ساندویچ پنبلی حاوی ۱۰ درصد وزنی SiC و ۱ درصد وزنی CaCO<sub>3</sub> تحت آزمون خمسه نقطه‌ای

ذرات SiC نقش قابل توجهی در افزایش استحکام فوم‌ها را دارند. به‌عنوان مثال حداکثر کرنش متراکم در فوم آلیاژی حدود ۴۵ درصد و مربوط به نمونه با ۱ درصد وزنی CaCO<sub>3</sub> است. در صورتی که در نمونه کامپوزیتی حاوی ۵ درصد ذرات SiC با مقدار ثابت CaCO<sub>3</sub> کرنش متراکم به حدود ۷۷ درصد می‌رسد که با افزایش ۷۱ درصدی همراه است.

شکل‌های ۷- الف و ب به ترتیب تنش مسطح و میزان جذب انرژی حاصل از شکست در آزمون فشار را نشان می‌دهند. با افزایش مقدار ذرات SiC به عنوان عامل تقویت‌کننده در زمینه و ارتقای عملکرد استحکام‌بخشی ذرات سرامیکی، تنش مسطح و ظرفیت جذب انرژی و به طور کلی عملکرد مکانیکی کامپوزیت فومی افزایش می‌یابد علاوه بر این افزایش محتوای ذرات سرامیکی SiC سبب افزایش ضخامت دیواره سلول‌ها می‌شود و به این ترتیب مقاومت در برابر نیروی فشاری اعمالی افزایش می‌یابد و دیواره‌ها در سطوح بالاتر تنش دچار شکست و پارگی می‌شوند. این افزایش در درصدهای وزنی کم‌تر از CaCO<sub>3</sub> به دلیل تشکیل دیواره‌های ضخیم‌تر و تولید فوم با حداقل میزان به هم‌پیوستگی تخلخل‌ها و ریزش دیواره‌ها حین تولید، با شیب بیشتری صورت خواهد گرفت.

جدول ۳- تنش مسطح، کرنش تراکم و درصد جذب انرژی

| کد نمونه | جذب انرژی (KJ/mm <sup>3</sup> ) | کرنش تراکم (%) | تنش مسطح (MPa) |
|----------|---------------------------------|----------------|----------------|
| ۱        | ۱/۲۷                            | ۴۶/۸۴          | ۲/۷۳           |
| ۲        | ۰/۶۱                            | ۴۲/۰۸          | ۱/۴۷           |
| ۳        | ۰/۴۴                            | ۳۵۰/۰۷         | ۱/۲۶           |
| ۴        | ۴/۵۱                            | ۷۷/۰۹          | ۵/۹۳           |
| ۵        | ۲/۲۴                            | ۶۸/۳۲          | ۳/۲۸           |
| ۶        | ۱/۱۳                            | ۶۰/۵۱          | ۱/۸۷           |
| ۷        | ۵/۴۵                            | ۷۴/۶۳          | ۷/۳۱           |
| ۸        | ۳/۱۵                            | ۶۵/۵۵          | ۴/۸۲           |
| ۹        | ۱/۶۳                            | ۵۷/۳           | ۲/۸۶           |
| ۱۰       | ۸/۵۱                            | ۷۳/۲۶          | ۱۱/۶۲          |
| ۱۱       | ۶/۵۵                            | ۶۶/۷۱          | ۹/۸۳           |
| ۱۲       | ۴/۱۲                            | ۵۹/۹           | ۶/۸۹           |



شکل ۹- تأثیر درصد وزنی SiC و CaCO<sub>3</sub> بر (الف) تنش مسطح

[3] Z. C. Huang, Y. K. Zhang, Y. C. Lin, and Y. Q. Jiang, "Physical property and failure mechanism of self-piercing riveting joints between foam metal sandwich composite aluminum plate and aluminum alloy," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 139-149, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.132>.

[4] A. Alizadeh and M. Abdollahi Azghan, "Investigation on the microstructure and tensile properties of Al5083-TiB2 nanocomposites produced by stir casting method," *Journal of Advanced Materials and Technologies*, vol. 10, no. 2, pp. 45-57, 2021, (in Persian), <https://doi.org/10.30501/jamt.2021.251930.1131>.

[5] O. Fomin, M. Gorbunov, A. Lovska, J. Gerlici, and K. Kravchenko, "Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills," *Materials*, vol. 14, no. 8, 2021, Art. no. 1915, <https://doi.org/10.3390/ma14081915>.

[6] D. C. Curran, "Aluminium foam production using calcium carbonate as a foaming agent," M.S.thesis, University of Cambridge, Massachusetts, U.S.A., 2004, <https://doi.org/10.17863/CAM.14286>.

[7] H. Fusheng, W. Jianning, C. Hefa, and G. Junchang, "Effects of process parameters and alloy compositions on the pore structure of foamed aluminum," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, no. 1-3, pp. 505-507, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00135-3).

[8] D. Papadopoulos, H. Omar, F. Stergioudi, S. A. Tsipas, and N. Michailidis, "The use of dolomite as foaming agent and its effect on the microstructure of aluminium metal foams—Comparison to titanium hydride," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 382, no. 1-3, pp. 118-123, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.005>.

[9] Y. G. Li, Y. H. Wei, L. F. Hou, C. I. Guo, and S. Q. Yang, "Fabrication and compressive behaviour of an aluminium foam composite," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 649, pp. 76-81, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.049>.

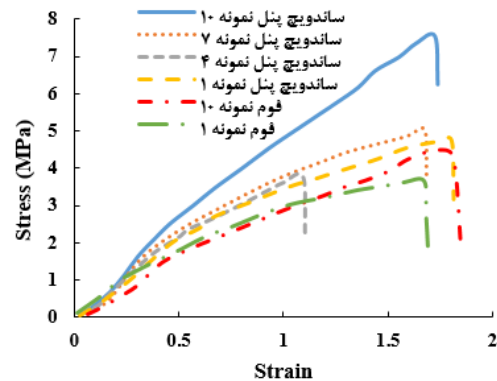
[10] C. L. Magee and P. H. Thornton, "Design considerations in energy absorption by structural collapse," *SAE Transactions*, vol. 87, no. 2, pp. 2041-2055, 1978.

[11] Z. Wang, Z. Li, J. Ning, and L. Zhao, "Effect of heat treatments on the crushing behaviour and energy absorbing performance of aluminium alloy foams," *Materials and Design*, vol. 30, no. 4, pp. 977-982, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.06.058>.

[12] J. Liu, S. Yu, X. Zhu, M. Wei, Y. Luo, and Y. Liu, "The compressive properties of closed-cell Zn-22Al foams," *Materials Letters*, vol. 62, no. 4-5, pp. 683-685, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.06.032>.

[13] H. Yu, Z. Guo, B. Li, G. Yao, H. Luo, and Y. Liu, "Research into the effect of cell diameter of aluminum foam on its compressive and energy absorption properties," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 454-455, pp. 542-546, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.091>.

[14] V. Gergely, D.C. Curran, and T.W. Clyne, "The FOAMCARP process: Foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors," *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 16, pp. 2301-2310, 2003, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00263-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00263-X).



شکل ۹- نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای برای فوم‌های کامپوزیتی و ساندویچ پنل.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر تغییر درصد عامل فوم‌ساز ( $\text{CaCO}_3$ ) و تقویت‌کننده و پایدارساز SiC بر ریزساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی فوم‌های کامپوزیتی زمینه آلومینیومی که به روش مستقیم از مذاب ساخته شده بود مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- با افزایش درصد وزنی  $\text{CaCO}_3$  از ۱ تا ۵ درصد، گاز تولید شده در اثر تجزیه عامل فوم‌ساز بیشتر بوده و در نتیجه حفرات بیشتر و بزرگ‌تر حاصل شد.

۲- با افزایش درصد وزنی ذرات سرامیکی SiC از ۵ تا ۱۰ درصد وزنی  $\text{CaCO}_3$  چگالی نمونه‌های فومی به ترتیب از ۰/۵۷۴ تا ۰/۷۲۳ درصد وزنی افزایش یافت.

۳- با افزایش درصد ذرات سرامیکی SiC از ۵ تا ۱۰ درصد وزنی، تنش سطح در ۱ درصد وزنی  $\text{CaCO}_3$  از ۵/۹۳ تا ۱۱/۶۲ درصد افزایش یافت.

۴- با افزایش درصد ذرات سرامیکی SiC، چگالی افزایش و به تبع آن استحکام محصولات فومی نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال ظرفیت جذب انرژی در فوم کامپوزیتی حاوی ۵ درصد SiC در ۳ درصد عامل فوم‌ساز در مقایسه با فوم کامپوزیتی ۱۰ درصد SiC از ۲/۲۴ تا ۶/۵۵ افزایش یافته است که با افزایش ۱۹۲ درصدی همراه است.

#### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

#### مراجع

[1] B. Buonomo, H. Celik, D. Ercole, O. Manca, and M. Mobedi, "Numerical study on latent thermal energy storage systems with aluminum foam in local thermal equilibrium," *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, 2019, Art. no. 113980, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113980>.

[2] H. P. Degischer and B. Kriszt, *Handbook of cellular metals Production, Processing, Applications*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2002.