

## Investigating the Effect of the Amount of Reinforcement on the Compressive Strength of A380 Aluminum Alloy Nanocomposite Reinforced with Silicon Carbide Nanoparticles

Research Article

Ali Mohammadi<sup>1</sup>, Mohammad Alipour<sup>2</sup> 

DOI: [10.22067/jmme.2022.77789.1064](https://doi.org/10.22067/jmme.2022.77789.1064)

### 1. Introduction

Aluminum is one of the engineering materials that have special importance in various industries. Aluminum is widely used due to its properties such as low density, high thermal conductivity, high strength to weight ratio, and good corrosion resistance, however, it has low hardness and low wear resistance. Increasing the mechanical properties of aluminum has always been considered by many researchers in various fields, including the automotive, aerospace, and electronic industries. Adding ceramic reinforcing agents to aluminum and its alloys increases mechanical properties, including hardness, wear resistance, and strength. Most of the reinforcing particles that are added to aluminum alloys are cheap particles such as SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Therefore, the production and application of metal matrix composites (MMC) have increased in recent years.

### 2. Experimental

#### 2.1. Materials

Commercially, aluminum alloy (A1A380) powder with the size of ~30–50 μm and 99.95% purity was used as the matrix. The chemical composition of the A1A380 powder as cited by the manufacturer is shown in table 1 and figure 1. SiC nanoparticles with a size of 40–100 nm and 99% purity were used as the reinforcement phase (figure 1).

Table1. Al A380 chemical compositions

Al	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Fe	Ni	Sn
balance	8.5	3.5	0.5	0.5	3	1.3	0.5	0.35

#### 2.2. Fabrication of A1A380-SiC nanocomposites

AL A380 powder and SiC nanoparticles were milled with (0, 0.5, 1, and 2 wt.%) in a planetary ball mill with balls of different diameters (4-10 mm) in an argon atmosphere for 10 hours. To protect the powder from agglomeration and

cold welding, 2w% of stearic acid was added to the mixtures as a process control agent. The ball-to-powder weight ratio was 10:1 at the rotation speed of 250 rpm. After milling, a hot press was used for the preparation of samples. The products were placed in a hot press machine using a graphite mold with a 15 mm diameter; the rate of temperature increase was 10 °C/min up to the final curing temperature of 510 °C (30 min at vacuum and under 50 MPa pressure).

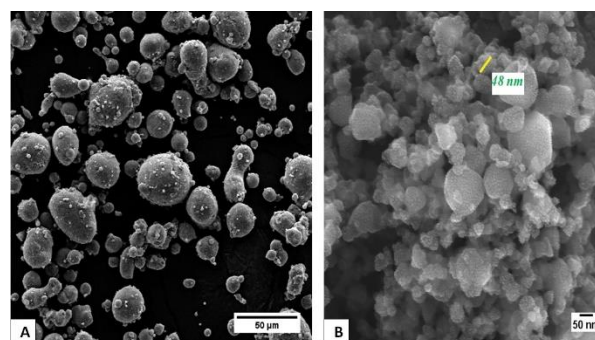


Figure 1. SEM micrograph of raw materials used in this research: (A) A1A380 alloy and (B) SiC nanoparticles.

### 3. Result and discussion

#### 3.1 Compressive strength

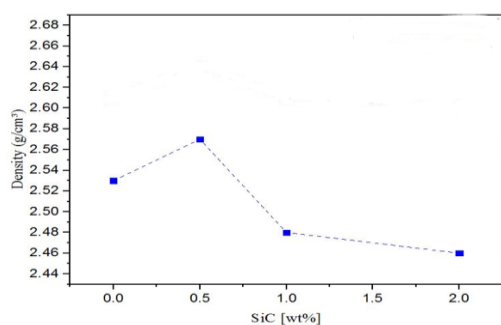
- 1) The coefficient of thermal expansion of silicon carbide is  $4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  and the coefficient of thermal expansion of A380 aluminum alloy is  $21.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . The thermal expansion coefficient of aluminum alloy is approximately 5.5 times that of silicon carbide. During cooling, due to the difference in length reduction, microcracks are formed around the reinforcement particle. These microcracks increase the density of dislocations and as a result the compressive strength increased.
- 2) Nanoparticles act as barriers to crack growth and prevent crack growth. Adding nanoparticles increases compressive strength.

\*Manuscript received: July 20, 2022, Revised, October 15, 2022, Accepted, December 17, 2022.

<sup>1</sup> Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran

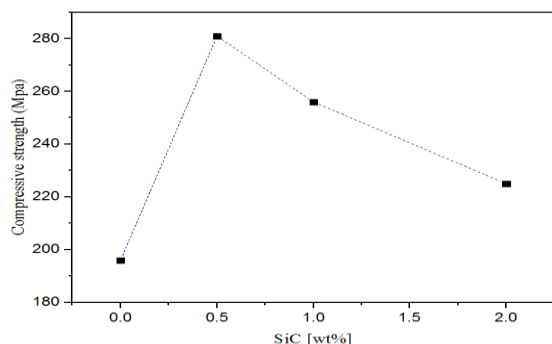
<sup>2</sup> Corresponding author: Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran. **Email:** alipourmo@tabrizu.ac.ir

3. Aluminum alloy powders become finer with increasing the amount of SiC nanoparticles, because hard SiC particles, similar to mill balls, can lead to energy transfer to the metal substrate.
- 4) The addition of hard particles leads to a decrease in the fracture toughness of aluminum alloy powders, for this reason, the failure mechanism in the grinding process of composite powders with 2% by weight of SiC is activated earlier and the powders become finer. According to the Hall-patch effect, grain boundaries prevent the movement of dislocations. The number of dislocations inside a grain affects the generation of stress. Therefore, by changing the grain size, it is possible to affect the accumulation of dislocations inside the grain and consequently the compressive strength increases with the reduction of the grain size.



**Figure 2. Graph of changes of density (g/cm<sup>3</sup>) values with increasing the silicon carbide wt.%.**

According to the diagram of Figure 3, it can be seen that with the addition of silicon carbide nanoparticles, the compressive strength of the samples increases because, with the increase of silicon carbide nanoparticles, the average size of aluminum alloy powders decreases according to the results of Image J software and according to the Hall-Patch effect. Silicon carbide nanoparticles as prevent the growth of cracks due to the difference in the thermal expansion coefficient of silicon carbide nanoparticles and aluminum alloy powders. It can be seen in the graph with the further increase of silicon carbide nanoparticles to one and two percent by weight, due to the agglomeration of nanoparticles and the decrease in the density and porosity values, the compressive strength decreases.



**Figure 3. The change of compressive strength values (MPa) with the increase of silicon carbide wt.%.**

#### 4. Conclusion

In this study, the effect of the addition of SiC nanoparticles and heat treatment on the mechanical properties of the aluminum blend A380 was investigated. The main results of this study are as follows:

- 1) Because the amount of nanoparticles is small, adding silicon carbide nanoparticles does not change the constituent phases of the samples.
- 2) The highest compressive strength occurs with the addition of half a weight percent of silicon carbide, and with the increase of nanoparticles due to agglomeration and decrease in density, the compressive strength decreases.



## بررسی تأثیر مقدار تقویت کننده بر روی استحکام فشاری نانوکامپوزیت زمینه آلیاژ آلومینیوم A380 تقویت شده با نانو ذرات کاربید سیلیسیم

مقاله پژوهشی

علی محمدی<sup>(۱)</sup> محمد علی پور<sup>(۲)</sup>

DOI: 10.22067/jmme.2022.77789.1064

**چکیده** در این مقاله ریز ساختار و استحکام فشاری آلیاژ آلومینیوم A380 با افزودن نانو ذرات SiC (Silicon carbide) مورد بررسی قرار گرفت. پودر آلومینیوم A380 و نانوذرات SiC با مقادیرهای (۰، ۰/۵، ۱، ۲ درصد وزنی) در یک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای در اتمسفر آرگون به مدت ۱۰ ساعت آسیاب شدند. نسبت وزن توپ به پودر ۱:۱۰ و سرعت چرخش روی ۲۵۰ دور بر دقیقه تعیین شد. پس از فرآیند آسیاب، از پرس گرم برای تولید نمونه‌ها استفاده شد، محصولات از طریق قالب گرافیتی به قطر ۱۵ میلی متر همزمان با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه تا دمای پخت نهایی ۵۱۰ درجه سانتیگراد با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه تحت خلا در فشار ۵۰ مگاپاسکال در دستگاه پرس گرم قرار گرفت. ریز ساختار و فازهای تشکیل شده نمونه‌های تولید شده با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) (Scanning electron microscope) و پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) (X-ray diffraction) مورد بررسی قرار گرفت. برای آزمایش استحکام فشاری از دستگاه آزمایش کشش/ فشار یونیورسال (UTM) (universal testing machine) استفاده شد. مشاهده شد با افزایش نانو ذرات SiC اگلومره شدن اتفاق افتاده باعث کاهش خواص مکانیکی شد. بهترین چگالی و استحکام فشاری نمونه‌ها مربوط به آلیاژ آلومینیوم با ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات SiC به دست آمد همچنین به علت پایین بودن دمای زینترینگ، تجزیه SiC اتفاق نیفتاد و ترکیب بین فلزی آلومینیوم با کربن یا آلومینیوم با سیلیسیم تشکیل نشد. **واژه‌های کلیدی** آلیاژ آلومینیوم، کاربید سیلیسیم، کامپوزیت، متالورژی پودر (Powder metallurgy)، استحکام فشاری.

## Investigating the Effect of the Amount of Reinforcement on the Compressive Strength of A380 Aluminum Alloy Nanocomposite Reinforced with Silicon Carbide Nanoparticles

Ali Mohammadi

Mohammad Alipour

**Abstract** In this article, the microstructure and compressive strength of A380 aluminum alloy with the addition of SiC (Silicon carbide) nanoparticles were investigated. A380 aluminum powder and SiC nanoparticles with amounts (0.5, 1, and 2 wt%) were milled in a planetary ball mill in an argon atmosphere for 10 hours. The weight ratio of ball to powder was 1:10 and the rotation speed was set at 250 rpm. After the grinding process, a hot press was used to produce samples, the products through a graphite mold with a diameter of 15 mm at the same time with a heating rate of 10 °C/min to a final baking temperature of 510 °C with a holding time of 30 minutes under vacuum at a pressure of 50 MPa was placed in a hot press. The microstructure and formed phases of the produced samples were investigated using scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Universal testing machine (UTM) was used to test the compressive strength. It was observed that agglomeration occurred with the increase of SiC nanoparticles, which decreased the mechanical properties. The best density and compressive strength of the samples related to aluminum alloy with 0.5% by weight of SiC nanoparticles were obtained. Also, due to the low sintering temperature, SiC did not decompose and the intermetallic compound of aluminum with carbon or aluminum with silicon was not formed

**Key Words** Aluminum alloy, Silicon carbide, Composite, Powder metallurgy, Compressive strength.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۴/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۶ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

(۲) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز.

## مقدمه

آلومینیوم یکی از مواد مهندسی است که اهمیت ویژه‌ای در صنایع مختلف دارد. آلومینیوم به دلیل داشتن خصوصیات مثل چگالی کم، هدایت حرارتی بالا، استحکام نسبت به وزن بالا، مقاومت به خوردگی خوب و اقتصادی بودن به طور گسترده کاربرد دارد، با این حال دارای سختی کم و مقاومت به سایش پایین است [1-3]. افزایش خواص مکانیکی آلومینیوم همواره مد نظر بسیاری از محققین در حوزه‌های مختلف از جمله صنعت خودرو و هوا فضا و الکترونیکی بوده است [4,5]. اضافه کردن عوامل تقویت کننده سرامیکی به آلومینیوم و آلیاژهای موجب افزایش خواص مکانیکی از جمله سختی و مقاومت به سایش و استحکام می‌شود [6,7]. عمده ذرات تقویت کننده که به آلیاژهای آلومینیوم اضافه می‌شوند ذرات ارزان قیمت نظیر  $\text{SiC}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  هست. بنابراین، تولید و کاربرد کامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC) (metal matrix composite) در سال های اخیر افزایش یافته است [1,5]. مسئله پیچیده در ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات سرامیکی، توزیع یکنواخت ذرات در سراسر زمینه بدون تجمع و حداقل واکنش‌های شیمیایی است [8]. متالورژی پودر به عنوان یک روش خوب در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی در نظر گرفته می‌شود. امروزه استفاده از روش متالورژی پودر برای آلیاژهایی که از دو یا چند فلز با دماهای ذوب متفاوت تشکیل شده است، ساخت قطعات پیچیده با کیفیت و استحکام بالا و توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده، بسیار گسترده است [2,4,9]. این روش شامل سه مرحله مخلوط کردن عناصر پودری، متراکم کردن آن عناصر پودری در قالب در دمای اتاق و سپس حرارت دادن در یک کوره اتمسفر کنترل شده برای ایجاد پیوند بین عناصر پودری است. البته در روش پرس گرم متراکم کردن و حرارت

دادن برای ایجاد پیوند بین عناصر، همزمان در محیط خلا اتفاق می‌افتد که باعث افزایش چگالی و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی می‌شود [2,10].

کاروانیس و همکارانش [11] با بررسی تولید کامپوزیت Al-SiC با روش ریخته‌گری سانتریفیوژ با درصدهای مختلف کاربید سیلیسیم مشاهده کردند با افزایش کاربید سیلیسیم استحکام فشاری و کششی نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. محمود جان شنل و همکارانش [12] با بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی Al-SiC-GNPs (graphene nanoplatelets) به این نتیجه رسیدند با افزایش کاربید سیلیسیم استحکام فشاری نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. هدف از این تحقیق بهبود استحکام فشاری آلیاژ آلومینیوم A380 با کمک ذرات تقویت کننده SiC تولید شده به روش متالورژی پودر است. شرایط بهینه پارامترهای پردازش و مکانیزم‌های تقویت کننده را می‌توان از این مطالعه استخراج کرد.

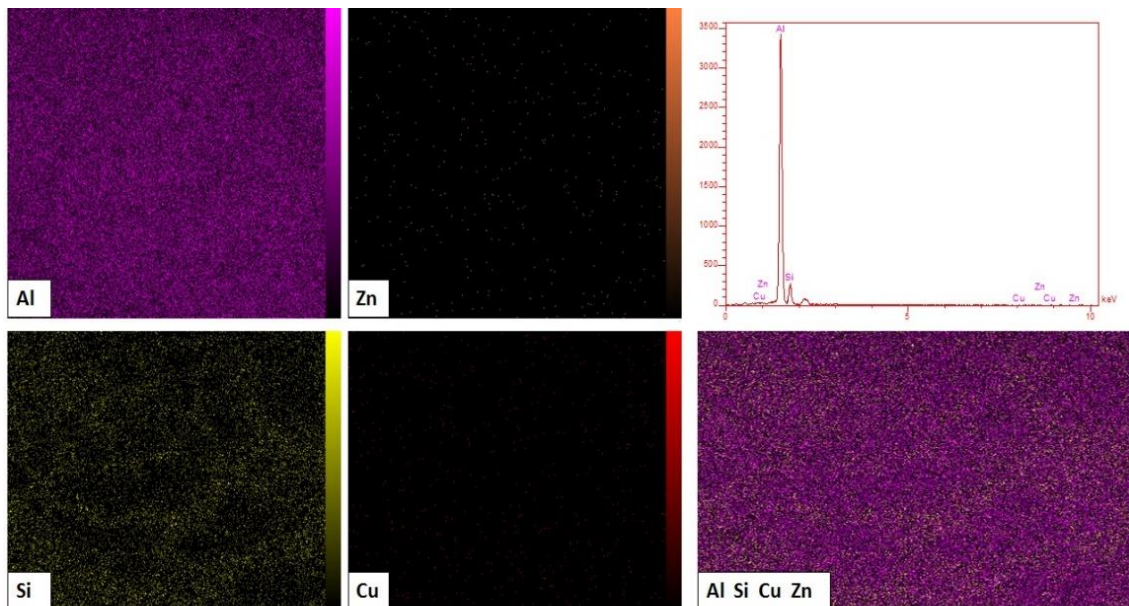
## مواد و روش تحقیق

## مواد

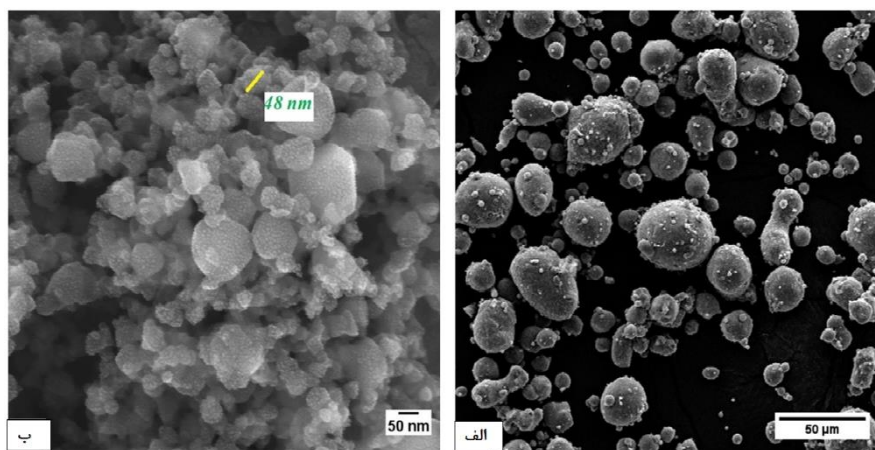
از نظر تجاری، پودر آلیاژ آلومینیوم (Al A380) در محدوده اندازه  $\sim 70-30$  میکرومتر و خلوص ۹۹/۹۵٪ برای زمینه استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر Al A380 در جدول (۱) نشان داده شده است. در شکل (۱) نتایج EDS و آنالیز map پودر آلیاژ Al A380 مشاهده می‌شود. نانوذرات SiC به اندازه ۹۰-۵۰ نانومتر و خلوص ۹۹٪ به عنوان تقویت کننده استفاده شدند. شکل (۲) تصاویر SEM پودرهای آلیاژ آلومینیوم A380 و نانوذرات SiC است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی Al A380

عنصر	آلومینیوم	آهن	سیلیسیم	مس	روی	منگنز	نیکل	قلع	منیزیم
مقدار (درصد وزنی)	بقیه	۱/۳	۸/۵	۳/۵	۳	۰/۵	۰/۵	۰/۳۵	۰/۵



شکل ۱ EDS و آنالیز map پودر آلیاژ Al A380



شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق: (الف) پودر Al A380 (ب) نانوذرات SiC

### ساخت نانوکامپوزیت های Al A380-SiC

پودر Al A380 و نانوذرات SiC با مقادیرهای (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و درصد وزنی) در یک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای دو فنجانچه با استفاده از گلوله‌های فولادی سخت شده با قطرهای مختلف (۴ تا ۱۰ میلی متر) در اتمسفر آرگون به مدت ۱۰ ساعت آسیاب شدند. برای محافظت از پودر در برابر آگلومره شدن و جوش سرد، ۲ درصد وزنی اسید استتاریک به عنوان یک عامل کنترل فرآیند به مخلوط ها اضافه شد. نسبت وزن توپ به پودر ۱۰:۱ و سرعت چرخش روی ۲۵۰ دور در دقیقه تعیین شد. پس از فرآیند آسیاب، از پرس گرم برای تولید نمونه‌ها استفاده شد، محصولات از طریق قالب گرافیتی به قطر ۱۵ میلی متر همزمان با سرعت

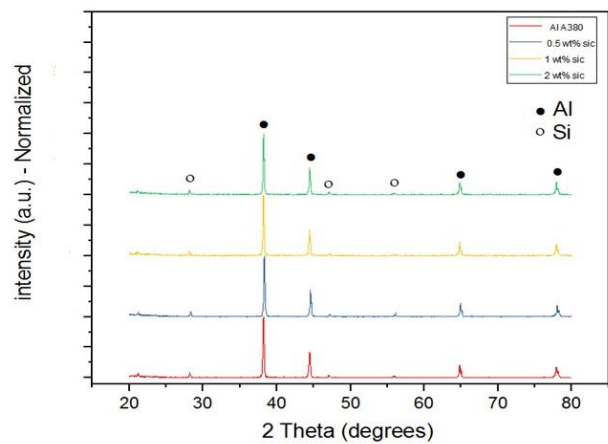
گرمایش ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه تا دمای پخت نهایی ۵۱۰ درجه سانتیگراد با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه تحت خلا در فشار ۵۰ مگاپاسکال در دستگاه پرس گرم قرار گرفت. نمونه های نهایی با قطر ۱۵ میلی متر و ارتفاع ۱۵ میلی متر تولید شدند. برای مشاهده فازهای تشکیل شده از آنالیز XRD استفاده شد. برای آزمایش فشار نمونه‌های تولید شده با روش پرس گرم به ابعاد قطر ۱۵ میلی متر و ضخامت ۱۵ میلی متر از دستگاه آزمون کشش / فشار یونیورسال Roell Amsler استفاده شد. سطوح شکست نمونه‌ها توسط SEM مورد بررسی قرار گرفت.

سرد اتفاق افتاده است و اندازه دانه ها بزرگتر شده است [13].

## نتایج و بحث

### آنالیز XRD

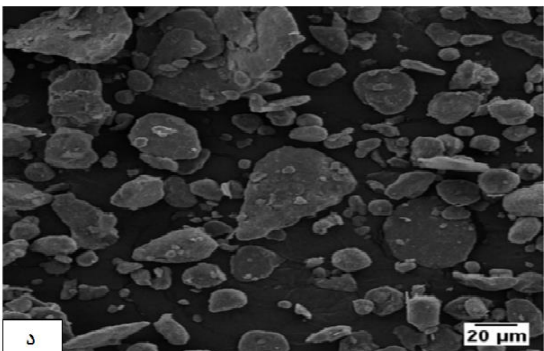
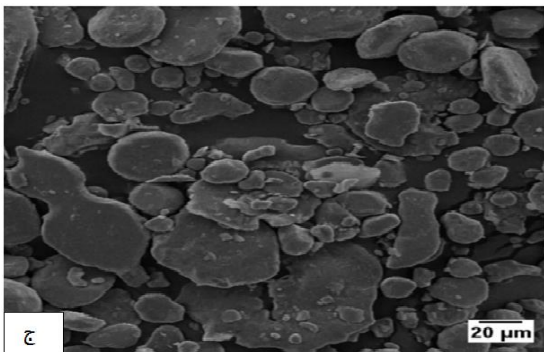
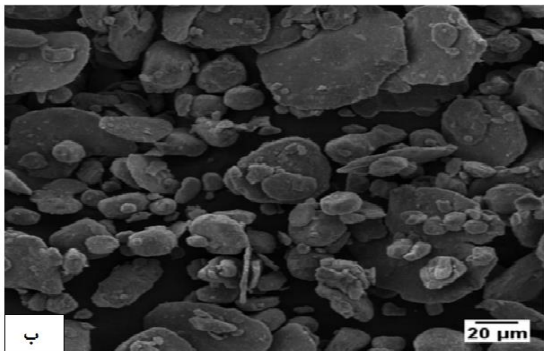
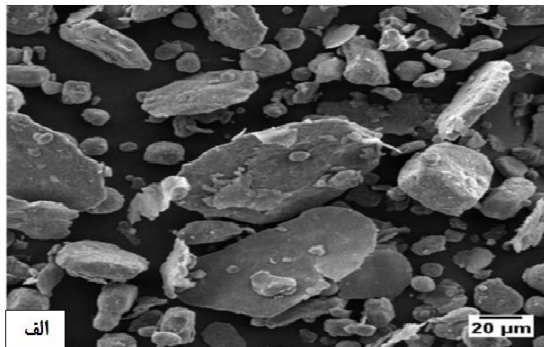
شکل (۳) آنالیز فازی کامپوزیت تولید شده با درصدهای وزنی مختلف SiC را نشان می دهد. از روی این شکل، پیک‌های مربوط به دو فاز آلومینیوم و سیلیسیم مشاهده می شود. به دلیل این که مقدار تقویت کننده ها کم هست در هیچ کدام از نمونه ها دیده نمی شود و همچنین دمای زینترینگ به حدی نبود که باعث تجزیه SiC و ایجاد ترکیب بین فلزی آلومینیوم با کربن یا آلومینیوم با سیلیسیم شود. افزون بر آن، به دلیل کنترل اتمسفر آسیاب کاری و زینترینگ، ترکیب ناخواسته اکسیدی نیز مشاهده نگردید.



شکل ۳ آنالیز XRD پودر Al A380 با درصدهای وزنی مختلف نانوذرات SiC

### مورفولوژی پودرها

قبل از آسیاب گلوله‌ای، مورفولوژی پودر آلیاژ آلومینیوم کروی و اندازه ذرات که با نرم افزار Image J اندازه گیری شد تقریباً ۴۰ میکرومتر بود. شکل (۴) تصاویر SEM مورفولوژی پودرهای نانوکامپوزیت AlA380-SiC را پس از ۱۰ ساعت آسیاب نشان می دهد. مشاهده می شود پودرهای نانوکامپوزیت پس از فرآیند آسیاب به مورفولوژی مسطح تبدیل شدند. با این حال، در مورد ۲ درصد وزنی SiC، مورفولوژی پودرها ریزتر شده است به این علت که ذرات سخت SiC مشابه گلوله‌های آسیاب می توانند منجر به انتقال انرژی به زمینه فلزی گردد. همچنین افزودن ذرات سخت منجر به کاهش چقرمگی شکست پودرهای آلیاژ آلومینیوم می شود به همین دلیل مکانیزم شکست در فرآیند آسیاب پودرهای کامپوزیتی با ۲ درصد وزنی SiC زودتر فعال شده و پودرها ریزتر می شود. همچنین در نمونه‌های بدون تقویت کننده جوش

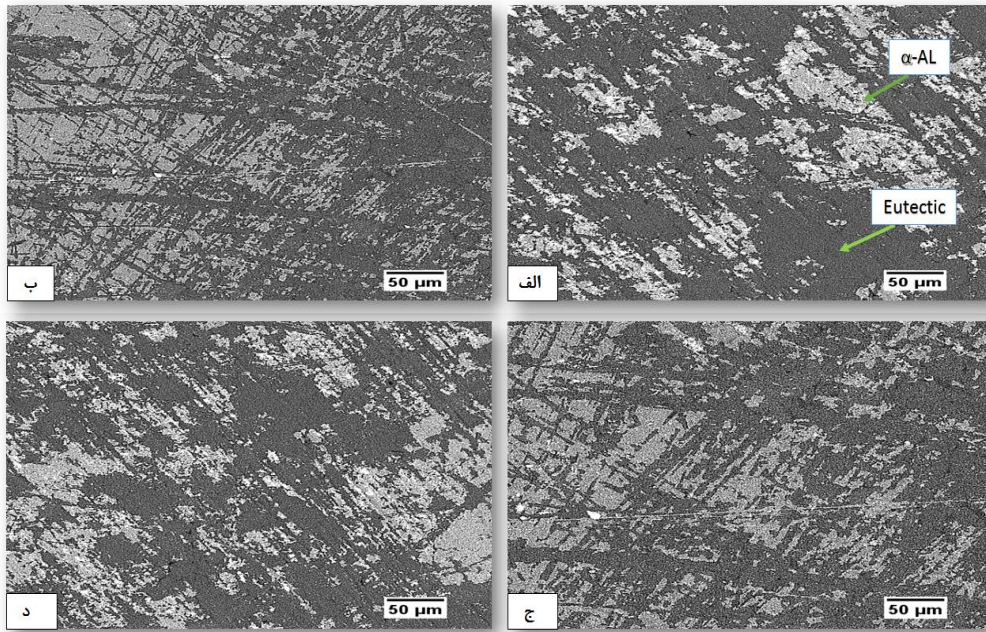


شکل ۴ مورفولوژی پودرها پس از ۱۰ ساعت آسیاب: (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) آلیاژ آلومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم، (ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم، (د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم

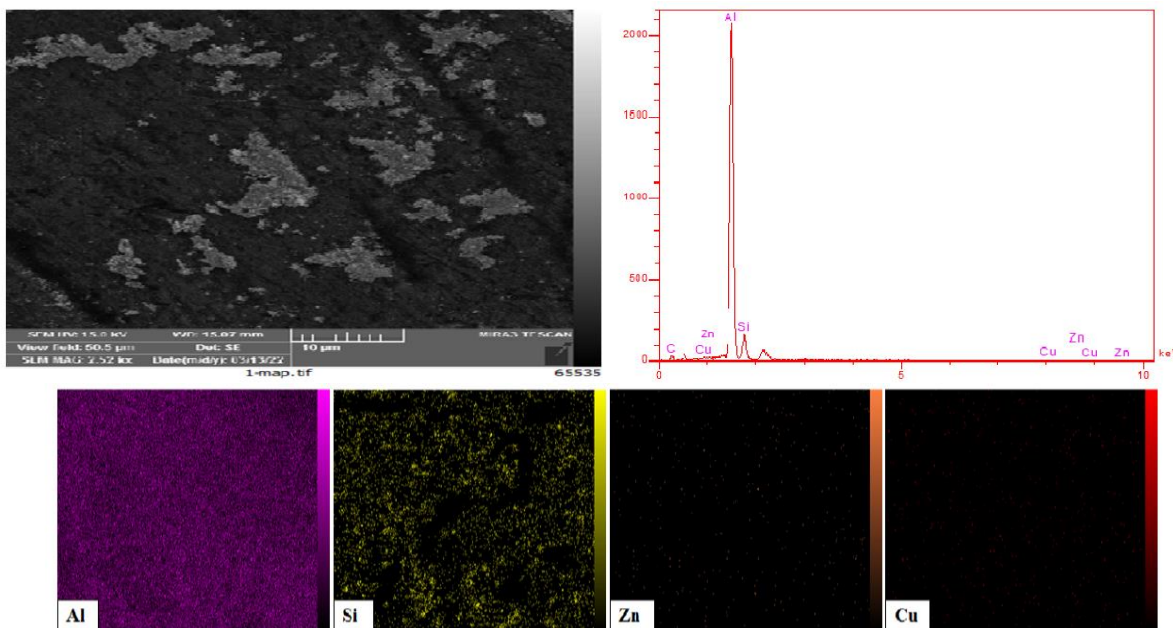
**تصاویر SEM**

Map آلیاژ Al A380، پراکندگی عناصر تشکیل دهنده نمونه مشاهده می‌شود (شکل ۶). مناطقی که عنصر سیلیسیم کمتری دارد تشکیل فاز آلفا آلومینیوم و بقیه مناطق فاز یوتکتیک تشکیل داده است، همچنین به دلیل اینکه درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم کم هست تغییری در فازهای تشکیل شده مشاهده نمی‌شود [14].

شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ها با درصدهای وزنی مختلف را نشان می‌دهد. طبق دیاگرام فازی آلومینیوم-سیلیسیم به علت اینکه مقدار سیلیسیم در آلیاژ آلومینیوم A380 کمتر از ۱۲/۶ درصد هست آلیاژ آلومینیوم در منطقه هیپو یوتکتیک قرار گرفته است و به همین علت فازهای آلفا آلومینیوم و یوتکتیک تشکیل داده است. با استفاده از آنالیز

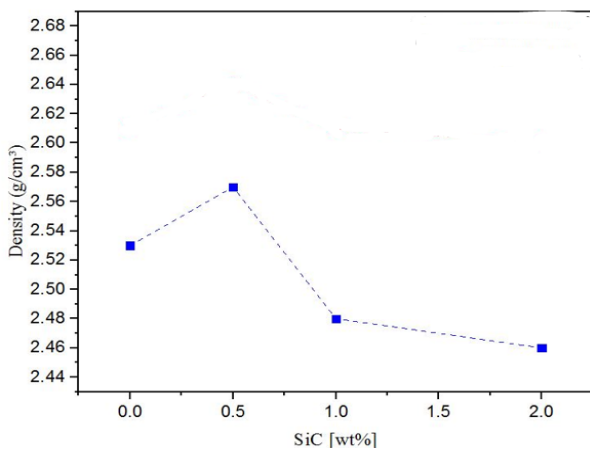


شکل ۵ تصاویر FE-SEM: (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) آلیاژ آلومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم، (ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم، (د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم

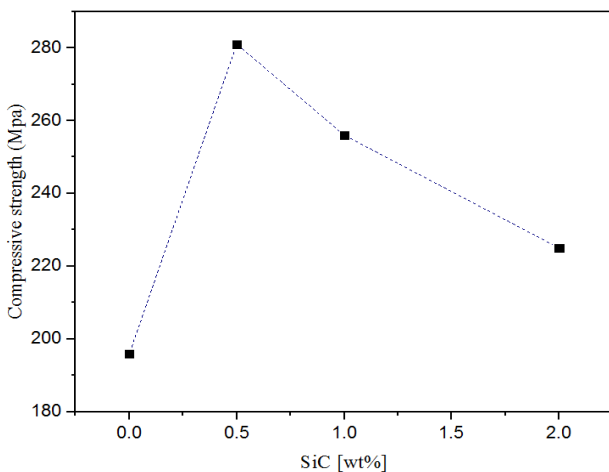


شکل ۶ نتایج EDX و آنالیز Map نمونه آلیاژ Al A380

استحکام فشاری می شود همچنین نانو ذرات کاربید سیلیسیم به عنوان موانعی، از رشد ترک جلوگیری می کند و به علت اختلاف ضریب انبساط حرارتی نانو ذرات کاربید سیلیسیم و پودرهای آلیاژ آلومینیوم هنگام سرد شدن بعد زینترینگ باعث افزایش چگالی نابعایی ها می شود اما مقدار بهینه‌ی در نمودار مشاهده می شود زیرا با افزایش بیشتر نانو ذرات کاربید سیلیسیم به یک و دو درصد وزنی به علت آگلومره شدن نانو ذرات و کاهش چگالی و ایجاد تخلخل باعث کاهش استحکام فشاری می شود.



شکل ۷ نمودار تغییرات دانسیته (g/cm<sup>3</sup>) با افزایش کاربید سیلیسیم



شکل ۸ نمودار تغییرات استحکام فشاری (Mpa) با افزایش کاربید سیلیسیم

شکل (۹) تصاویر SEM سطح شکست نمونه ها تحت آزمون فشار را نشان می دهد تصاویر نشان داده شده در شکل (۹) مبین آن است که شکست ترکیبی از شکست درون دانه‌ای و مرزدانه‌ای است. همینطور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود سطح شکست با افزایش مقدار نانو ذرات به نیم درصد وزنی،

## استحکام فشاری

استحکام فشاری آلیاژ آلومینیوم با افزودن تقویت کننده های نانو ذرات کاربید سیلیسیم تحت مکانیزم های مختلفی قرار می گیرد.

۱. ضریب انبساط حرارتی کاربید سیلیسیم  $6 \times 10^{-6}$  بر درجه سانتی گراد و ضریب انبساط حرارتی آلیاژ آلومینیوم A380  $6 \times 10^{-6}$  بر درجه سانتی گراد است، یعنی حدوداً ضریب انبساط حرارتی آلیاژ آلومینیوم ۵/۵ برابر کاربید سیلیسیم است [15]. در هنگام سرد شدن به علت اختلاف در مقدار کاهش طول، ریز ترک در اطراف ذره تقویت کننده و فاز زمینه ایجاد می شود. این ریز ترک ها باعث افزایش چگالی نابعایی ها در نتیجه استحکام فشاری افزایش پیدا می کند.

۲. نانو ذرات به عنوان موانعی بر سر ایجاد رشد ترک هستند و از رشد ترک جلوگیری می کنند افزودن نانو ذرات باعث افزایش استحکام فشاری می شود.

۳. پودرهای آلیاژ آلومینیوم با افزایش مقدار نانو ذرات SiC ریزتر می شود همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، به این علت که ذرات سخت SiC مشابه گلوله های آسیاب می توانند منجر به انتقال انرژی به زمینه فلزی گردد.

۴. افزودن ذرات سخت منجر به کاهش چقرمگی شکست پودرهای آلیاژ آلومینیوم می شود به همین دلیل مکانیزم شکست در فرآیند آسیاب پودرهای کامپوزیتی با ۲ درصد وزنی SiC زودتر فعال شده و پودرها ریزتر می شود. و طبق اثر هال-پچ مرزدانه ها مانع حرکت نابعایی ها می شوند و همچنین تعداد نابعایی های درون یک دانه در به وجود آمدن تنش تاثیر گذارند. بنابراین با تغییر اندازه دانه بر تجمع نابعایی های درون دانه و در نتیجه استحکام تاثیر گذاشت و طبق همین اثر با کاهش اندازه دانه ها، استحکام فشاری افزایش پیدا می کند [16].

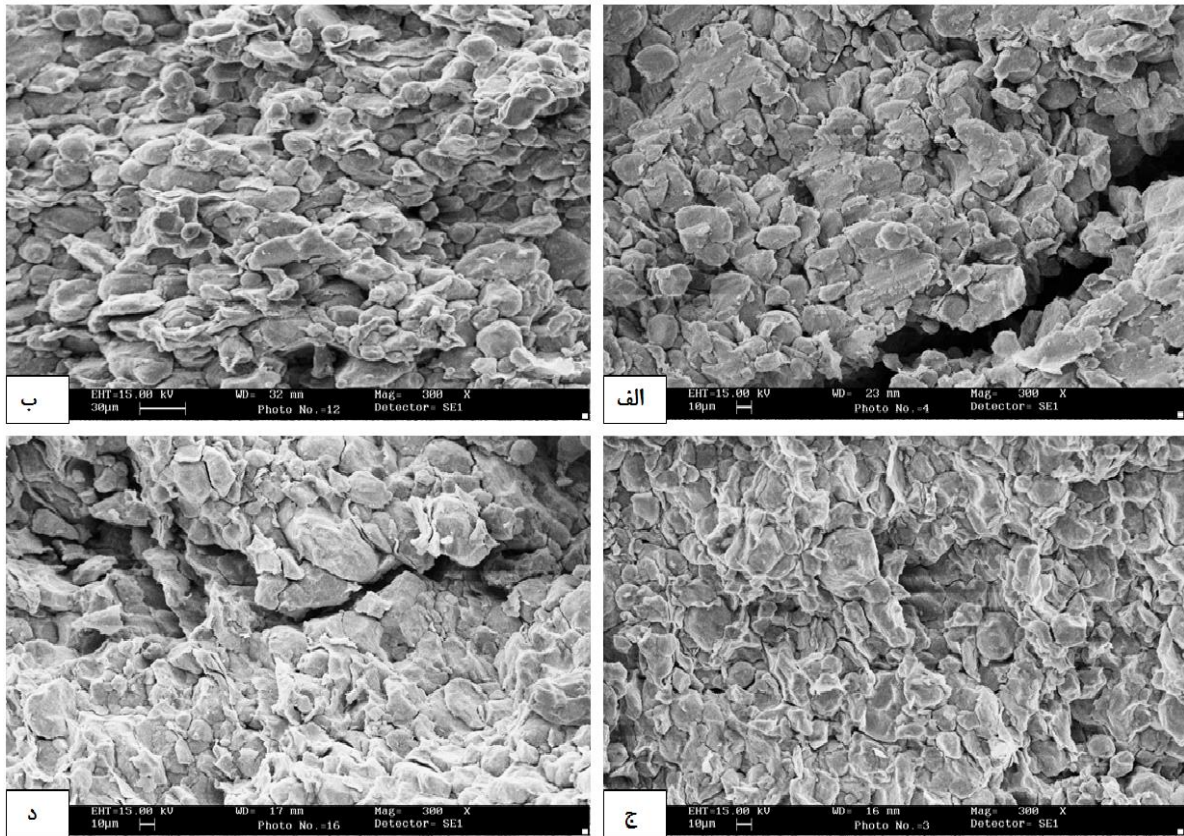
۵. افزودن نانو ذرات حالت بهینه دارد و با افزایش بیشتر نانو ذرات کاربید سیلیسیم باعث آگلومره شدن ذرات تقویت کننده می شود و به همین علت طبق نمودار شکل (۷) باعث کاهش چگالی می شود و تخلخل ها به عنوان محلی برای جوانه زنی و رشد ترک عمل می کنند.

طبق نمودار شکل (۸) مشاهده می شود با افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم، استحکام فشاری نمونه ها ابتدا افزایش پیدا می کند به دلیل اینکه با افزایش نانو ذرات کاربید سیلیسیم باعث کاهش میانگین اندازه پودرهای آلیاژ آلومینیوم طبق بررسی با نرم افزار Image J می شود و طبق اثر هال-پچ باعث افزایش

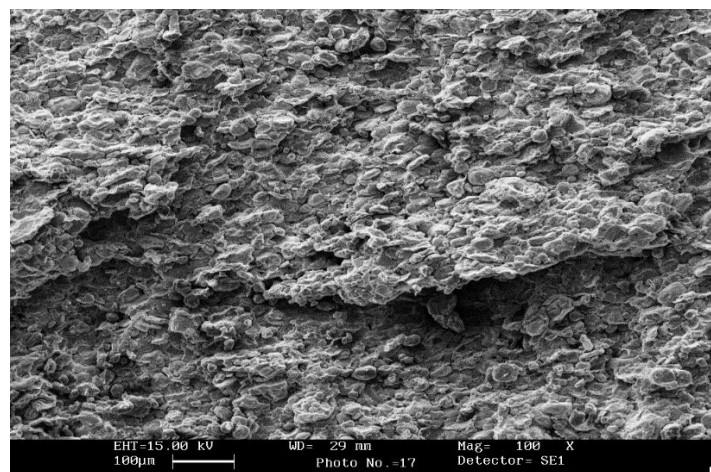


هم ننگه داشته شده‌اند همچنین به علت وجود تخلخل به دلیل کاهش چگالی با افزایش کاربید سیلیسیم، مطابق شکل (۱۲) شکست به صورت مرزخانه بیشتر اتفاق می‌افتد [17,18].

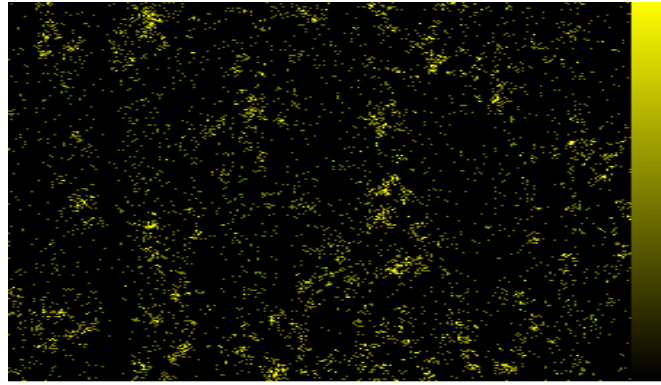
ترک‌ها به دلیل اینکه نانوذرات به عنوان موانعی از رشد ترک جلوگیری می‌کنند، کاهش پیدا می‌کند ولی با افزایش نانو ذرات به مقادیر بیشتر به علت آگلومره شدن نانوذرات SiC مطابق شکل (۱۱) و چون نانوذرات با پیوند ضعیف واندروالس کنار



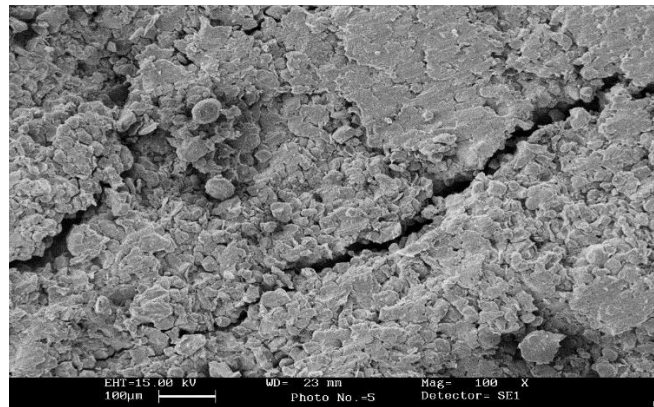
شکل ۹ تصاویر SEM سطح شکست: (الف) آلیاژ آلومینیوم، (ب) آلیاژ آلومینیوم با نیم درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم، (ج) آلیاژ آلومینیوم با یک درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم، (د) آلیاژ آلومینیوم با دو درصد نانوذرات کاربید سیلیسیم



شکل ۱۰ سطح شکست نمونه با نیم درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم



شکل ۱۱ آنالیز Map عنصر سیلیسیم از سطح شکست نمونه با دو درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم



شکل ۱۲ سطح شکست نمونه با دو درصد وزنی نانو ذرات کاربید سیلیسیم

### نتیجه گیری

در این پژوهش اثر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم بر روی خواص مکانیکی و ریز ساختار آلیاژ آلومینیوم A380 مورد بررسی قرار گرفت مهمترین نتایج این تحقیق را می توان در موارد زیر خلاصه نمود :

۱. به دلیل اینکه مقدار نانو ذرات کم است با افزودن نانو ذرات کاربید سیلیسیم تغییری در فازهای تشکیل دهنده نمونه‌ها

اتفاق نمی‌افتد.

۲. بیشترین استحکام فشاری با افزودن نیم درصد وزنی کاربید سیلیسیم اتفاق می افتد و با افزایش بیشتر نانو ذرات به علت آگلومره شدن و کاهش چگالی، استحکام فشاری کاهش پیدا می‌کند.

۳. با افزایش بیشتر مقدار نانو ذرات ، شکست به صورت مرز دانه‌ای اتفاق می‌افتد.

### مراجع

- [1] M., Moazami-Goudarzi, and F., Akhlaghi, "Effect of SiC nanoparticles content and Mg addition on the characteristics of Al/SiC composite powders produced via in situ powder metallurgy method", *Particulate Science and Technology*, vol. 31, no. 3, pp. 234–240, (2013).
- [2] Kim, Chang-Soo, et al. "Mechanical performance of particulate-reinforced Al metal-matrix composites (MMCs) and Al metal-matrix nano-composites (MMNCs)." *Journal of Materials Science* , vol. 52, no. 23, pp. 13319–13349, (2017).
- [3] M., Meignanamoorthy, et al. "Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of boron carbide reinforced aluminum alloy (al-Fe-Si-Zn-Cu) matrix composites produced via powder metallurgy route", *Materials*,

- vol. 14, no. 15, pp. 4315, (2021).
- [4] J., Kumar, et al. "Investigation on the mechanical, tribological, morphological and machinability behavior of stir-casted Al/SiC/Mo reinforced MMCs", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, pp. 930–946, (2021).
- [5] Surya, Mulugundam Siva, and T., Venkata Nilesh, "Synthesis and mechanical behaviour of (Al/SiC) functionally graded material using powder metallurgy technique", *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 3501–3506, (2019).
- [6] Bodukuri, Anil Kumar, et al. "Fabrication of Al–SiC–B<sub>4</sub>C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties", *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 428–431, (2016).
- [7] O., El-Kady, and A., Fathy, "Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites", *Materials & Design*, vol. 54, pp. 348–353, (2014).
- [8] X., Zeng, et al., "Wear characteristics of hybrid aluminum-matrix composites reinforced with well-dispersed reduced graphene oxide nanosheets and silicon carbide particulates", *Vacuum*, vol. 155, no. 4, pp. 364–375, (2018).
- [9] Bodukuri, Anil Kumar, et al. "Fabrication of Al–SiC–B<sub>4</sub>C metal matrix composite by powder metallurgy technique and evaluating mechanical properties", *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 428–431, (2016).
- [10] Lotfi, B., Rostami, M., and Z., Sadeghian, "Effect of silicon content on microstructure of Al-Si/SiCp composite layer clad on A380 Al alloy by TIG welding process", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, no. 9, pp. 2824–2830, (2014).
- [11] K., Karvanis, D., Fasnakis, A., Maropoulos, and S., Papanikolaou, "Production and mechanical properties of Al-SiC metal matrix composites", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 161, no. 1, pp. 012070. IOP Publishing, (2016).
- [12] Şenel, Mahmut Can, Mevlüt Gürbüz, and Erdem Koc. "Fabrication and characterization of synergistic Al-SiC-GNPs hybrid composites", *Composites Part B: Engineering*, vol. 154, pp.1-9,(2018).
- [13] Rudianto, Haris, Yang Sang Sun, Kim Yong Jin, and Nam Ki Woo. "Sintering behavior of hypereutectic aluminum-silicon metal matrix composites powder", *In International Journal of Modern Physics: Conference Series*, vol. 6, pp. 628-63, (2012).
- [14] Shankar, Sumanth, Yancy W. Riddle, and Makhlof M. Makhlof. "Eutectic solidification of aluminum-silicon alloys." *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 35, no. 9, pp.3038-3043, (2004).
- [15] Yang, Junrui, Lei Wang, Xinrong Tan, Qian Zhi, Ruibin Yang, Guopeng Zhang, Zhongxia Liu, Xianghong Ge, and Erjun Liang. "Effect of sintering temperature on the thermal expansion behavior of ZrMgMo<sub>3</sub>O<sub>12</sub>p/2024Al composite", *Ceramics International*, vol. 44, no. 9, pp. 10744 -10752, (2018).
- [16] Ghasali, Ehsan, Rahim Yazdani-rad, Keivan Asadian, and Touradj Ebadzadeh. "Production of Al-SiC-TiC hybrid composites using pure and 1056 aluminum powders prepared through microwave and conventional heating methods", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 690, pp. 512–518, (2017).
- [17] M., Akbari, H., Karbalaee, R., Baharvandi, and O., Mirzaee, "Nano-sized aluminum oxide reinforced commercial casting A356 alloy matrix: Evaluation of hardness, wear resistance and compressive strength focusing on particle distribution in aluminum matrix", *Composites Part B: Engineering*, vol. 52, pp. 262–268, (2013).
- [18] R., Muraliraja, R., Arunachalam, I., Al-Fori, M., Al-Maharbi, and S., Piya, "Development of alumina reinforced

aluminum metal matrix composite with enhanced compressive strength through squeeze casting process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 233, no. 3, pp. 307–314, (2019).