



Research Article

The Effect of Addition of Mesocarbon Microbeads (MCMB) on the Microstructure, Mechanical Properties, and Friction Coefficient of MCMB-Cf/SiC Composites Prepared by Spark Plasma Sintering Method

Alireza Yousefi, Mohsen Sadeghi*, Mazaher Ramazani, Hossein Jamali, Mohammad Rezazadeh and Mohammad Reza Loghman Estraki 

Department of Materials Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Iran

* Corresponding author, Email: mohsen.sadeghi.m@gmail.com

(Received: 25 November 2024; Accepted: 22 February 2025; Available online 16 April 2025)

ABSTRACT

Introduction and objective: The aim of this study is to investigate the effect of addition of mesophase carbon microbeads (MCMB) on the microstructure, mechanical properties, and friction coefficient of MCMB-Cf/SiC composites prepared by spark plasma sintering.

Materials and methods: Silicon carbide nanocomposite powder reinforced with 20 wt. % carbon fibers and different percentages of MCMB was prepared. Disk-shaped samples were prepared using spark plasma sintering (SPS). The effect of addition of different percentages of MCMB on the density, friction coefficient, fracture toughness, flexural strength, and microhardness of the samples was investigated.

Results: The results showed that by increasing the MCMB content from 0.1 to 1 wt. %, the density of the sintered samples decreased from 93.1% to 89.8% of the theoretical density due to the higher porosity of this sample. Also, the friction coefficient decreased from 0.54 to 0.48 with increasing MCMB content due to the higher graphite content in higher MCMB weight percent. The hardness of the sintered samples with silicon carbide nanoparticles matrix also increased from 1095 to 1510 Vickers due to the higher density and lower porosity of sample with decreasing MCMB content from 1 to 0.1 wt.%. The fracture toughness and flexural strength of MCMB-Cf/SiC samples increased from 3.47 to 5.96 MPa.m^{1/2} and 72.9 to 138.7 MPa, respectively.

Conclusion: It was found that the MCMB-Cf/SiC sample containing 1 wt. % of MCMB has the closest properties to the properties of air brake discs. The densities of the SPS-sintered samples containing 1 wt. % of MCMB were obtained as 93.1% of theoretical density. The friction coefficient of these samples was obtained to be 0.48, which had the closest friction coefficient to that required for air brakes (0.4).

Keywords: Sintering, Carbonous mesophase, Cf/SiC composite, Spark plasma sintering.

How to Cite: Yousefi A, Sadeghi M, Ramazani M, Jamali H, Rezazadeh M, Loghman Estrak MR. The effect of addition of mesocarbon microbeads (MCMB) on the microstructure, mechanical properties, and friction coefficient of MCMB-Cf/SiC composites prepared by spark plasma sintering method. J Adv Mater Eng. 2025;44(3):61-86. <https://doi.org/10.47176/jame.44.3.1093>

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



اثر افزودن ریزدانه‌های مزوفاز کربنی (MCMB) بر ریزساختار، خواص مکانیکی و ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های MCMB-Cf/SiC تهیه شده به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای

علیرضا یوسفی، محسن صادقی*، مظاهر رضوانی، حسین جمالی، محمد رضازاده، محمدرضا لقمان استرکی^{ID}

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۹/۵؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۴، انتشار: ۱۴۰۴/۱/۲۷)

چکیده

مقدمه و اهداف: هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر افزودن ریزدانه‌های کربنی مزوفاز (MCMB) بر ریزساختار، خواص مکانیکی و ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های MCMB-Cf/SiC تولید شده به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای است.

مواد و روش‌ها: پودر نانوکامپوزیت کاربرد سیلیکون تقویت‌شده با الیاف کربن ۲۰ درصد وزنی و درصد‌های مختلف MCMB تهیه شد. نمونه‌های دیسکی با استفاده از فرایند تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای تهیه شد. اثر افزودن درصد‌های مختلف MCMB بر چگالی، ضریب اصطکاک، چقرمگی شکست، مقاومت خمشی و میکروسختی نمونه‌ها بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد با افزایش محتوای MCMB از ۰/۱ به ۱ درصد وزنی، چگالی نمونه‌های زینترشده از ۹۳/۱ درصد به ۸۹/۸ درصد چگالی نظری، به دلیل تخلخل بیشتر نمونه، کاهش یافت. همچنین با افزایش محتوای MCMB، ضریب اصطکاک از ۰/۵۴ به ۰/۴۸ کاهش یافت که دلیل آن بیشتر بودن محتوای گرافیت در درصد وزنی MCMB بیشتر بود. سختی نمونه‌های تفجوشی شده با ماتریس نانوذرات کاربرد سیلیکون نیز از ۱۰۹۵ به ۱۵۱۰ و یک‌ریز به دلیل چگالی بیشتر و تخلخل کمتر نمونه با کاهش محتوای MCMB از ۱ به ۰/۱ درصد وزنی افزایش یافت. چقرمگی شکست و استحکام خمشی نمونه‌های MCMB-Cf/SiC به ترتیب از ۳/۴۷ به ۵/۹۶ MPa.m^{1/2} و ۷۲/۹ به ۱۳۸/۷ MPa افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: نمونه MCMB-Cf/SiC حاوی یک درصد وزنی MCMB، نزدیک‌ترین خواص را به خواص دیسک‌های ترمز بادی دارد. دانسیته نمونه‌های سیتتر شده یک درصد وزنی MCMB به‌عنوان ۹۳/۱ درصد چگالی نظری به‌دست آمد. ضریب اصطکاک این نمونه‌ها ۰/۴۸ بود که نزدیک‌ترین ضریب اصطکاک موردنیاز برای ترمزهای بادی (۰/۴) را داشت.

واژه‌های کلیدی: تفجوشی، مزوفاز کربنی، کامپوزیت Cf/SiC، تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای.

<https://doi.org/10.47176/jame.44.3.1093>

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس

زیر مجاز است:



Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های کربن/کربن (C_f/C) و کاربرد سیلیکون تقویت‌شده با الیاف کربن (C_f/SiC)، یکی از معروف‌ترین کامپوزیت‌های زمینه‌های سرامیکی، در حال تبدیل شدن به امیدوارکننده‌ترین نامزدها برای کاربردهای ساختاری در دمای بالا هستند. پژوهش‌های زیاد در این حوزه منجر شده است که امکان استفاده از این کامپوزیت‌ها در مخروط‌های دماغه موشک، سامانه‌های حفاظت حرارتی برای وسایل نقلیه با قابلیت استفاده مجدد در جو و دیسک‌های ترمز هوایی، میسر شود. به طور خاص، کامپوزیت‌های C_f/SiC پیشرفت‌های قابل توجهی در چقرمگی شکست و مقاومت در برابر شوک حرارتی نشان داده‌اند. این بهبودها در خواص مکانیکی به خواص ویژه الیاف کربن و سیلیکون کاربرد بستگی دارد. مشکل دیسک‌های ترمز هوایی از جنس کامپوزیت C_f/C ، اکسید شدن آن در طول فرآیند ترمزگیری در جو هوا، افت خواص مکانیکی در مقابل رطوبت، کرنش منجر به شکست کم و خواص سایشی ضعیف آن است. برای بهبود این خواص، ارتقاء خواص ترمزهای دیسکی زمینه کربنی (C_f/C) با تبدیل زمینه کربنی به زمینه SiC انجام شده است. با این کار، مشکل افت خواص مکانیکی در مقابل اکسید شدن و رطوبت مرتفع می‌شود. همچنین، کرنش منجر به شکست و خواص سایشی دیسک نیز بهبود می‌یابد (۱-۳). دیسک‌های ترمز C_f/SiC در چندین خودرو با کارایی بالا مانند پورشه Carrera GT، پورشه ۹۱۱، فراری اتومبیل‌های Daimler AG و Audi استفاده می‌شود. از سال ۲۰۰۵ در ترمز وسایل نقلیه نظامی و از سال ۲۰۰۸ به بعد در دیسک ترمز هواپیماهای بدون سرنشین استفاده شده است (۲-۵).

روش‌های معمول تولید کامپوزیت‌های C_f/SiC در مقیاس صنعتی، بیشتر مبتنی بر روش‌های نفوذ از جمله نفوذ بخار شیمیایی^۱، نفوذ سیلیکون مایع^۲ و نفوذ پلیمر مایع^۳ است که هر روش بر اساس پارامترهای تولید، ریزساختار و خصوصیات نهایی خاص خود را ارائه می‌دهد. اما امروزه روش‌های نوین تولید کامپوزیت‌های C_f/SiC ، به سمت فناوری‌های تف‌جوشی

پلاسمای جرقه‌ای^۴ سوق پیدا کرده است (۶ و ۷).

به‌عنوان یک منبع کربنی جدید، ریزدانه‌های مزوفاز کربنی^۵، به دلیل مورفولوژی کروی و ساختار لایه‌ای منحصربه‌فرد آن، دارای خواص مکانیکی همسانگرد، هدایت حرارتی عالی، قابلیت خودتف‌جوشی شدن در دماهای نسبتاً پایین و گرافیتی-شدن آسان هستند؛ بنابراین، MCMB را می‌توان به‌طور گسترده در زمینه‌های گوناگون مانند تولید مواد کربنی با استحکام بالا و چگالی بالا (قالب‌های SPS)، به‌ویژه از نظر رسانایی حرارتی و الکتریکی، آند‌های باتری‌های قابل شارژ یونی لیتیومی با کارایی بالا، پیستون‌های موتورهای احتراق، دیسک‌های ترمز هوایی و ... به‌کار برد. مزوفاز کربنی، ساختار لایه‌ای گرافیت را دارد، اما معمولاً دارای نقص‌های بیشتری نسبت به گرافیت خالص است. این نقص‌ها می‌تواند شامل لبه‌های غیر گرافیتی، گروه‌های عاملی سطحی و ساختارهای نامنظم باشد. MCMB می‌تواند هنگام تف‌جوشی در دمای بالا گرافیتی شوند و دارای ویژگی‌هایی مشابه گرافیت، مانند روانکاری خوب، عمل کنند. MCMB، به دلیل ساختار نامنظم و نقص‌های موجود، ممکن است ضریب اصطکاک را به اندازه گرافیت کاهش ندهد. مزوفاز کربنی به دلیل سطح فعال‌تر و امکان کنترل بهتر توزیع در زمینه سیلیکون کاربرد، انتظار می‌رود انتقال بار بهتری را نسبت به ذرات پولکی و صفحه‌ای شکل گرافیت ایفا کند (۸ و ۹).

شیوام و همکاران (۵)، به بررسی خواص تریبولوژیکی-مکانیکی کامپوزیت‌های با زمینه کاربرد سیلیسیم تقویت‌شده با الیاف کربن (C_f/SiC) تولیدشده به روش SPS پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش درصد وزنی الیاف کربن از ۰ تا ۳۰ درصد وزنی، چگالی به دلیل افزایش تخلخل‌های باز و ضریب اصطکاک به دلیل خاصیت روانکاری الیاف کربن کاهش یافت. همچنین افزودن کمک‌تف‌جوش آلومینا، باعث بهبود تراکم زمینه کاربرد سیلیسیم شده است. گروه شیوام (۵)، درصد بهینه الیاف کربن در کامپوزیت C_f/SiC را برای داشتن خواص تریبولوژیکی و هدایت حرارتی مناسب، ۲۰ درصد وزنی گزارش کرد. ذهبی و همکاران (۶)، پژوهشی را با هدف بهینه-

Cf/SiC تولید شده به روش SPS و دست‌یافتن به ضریب اصطکاک نزدیک به میزان ۰/۴ و چقرمگی شکست نزدیک به محدوده $4-6 \text{ MPa.m}^{1/2}$ ، براساس ویژگی‌های مورد نیاز دیسک-های ترمز هوایی (۲ و ۶)، است.

۲- مواد و روش پژوهش

۲-۱- مواد مصرفی

مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) گزارش شده است. همچنین از حلال‌های اتیل متیل کتون، ایزوپروپیل الکل و اتانول ۹۶ (با خلوص ۹۶ درصد) در این پژوهش استفاده شد.

۲-۲- روش تولید پودر کامپوزیت MCMB-Cf/alumina/nanoSiC

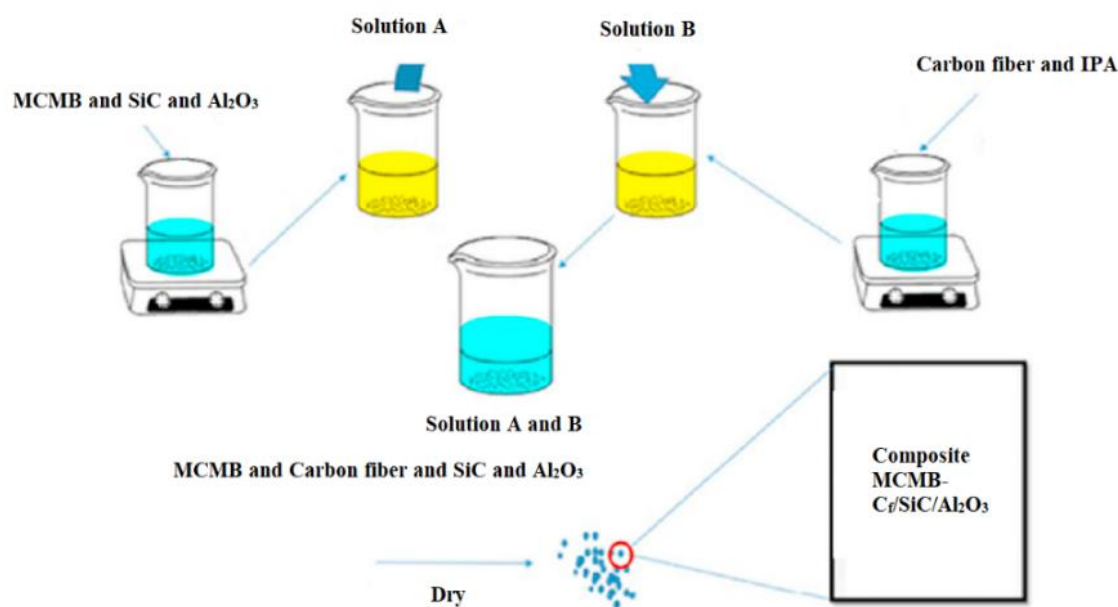
برای تولید پودر کامپوزیتی MCMB-Cf/alumina/nanoSiC، دو سوسپانسیون در دو بشر جداگانه تهیه شد. یکی، سوسپانسیون حاوی مقدار ۲۰ درصد وزنی الیاف کربن که در حلال ایزوپروپیل الکل (IPA) پخش شد. دیگری، سوسپانسیون حاوی نانوذرات سیلیکون کاربید، کمک‌تف‌جوش نانوالومینا و ذرات تقویت‌کننده MCMB در حلال اتیل متیل کتون آماده شد. به‌عنوان نمونه، ۰/۴ گرم الیاف کربن به طول ۵ میلی‌متر در ۲۰۰ میلی‌لیتر حلال IPA ریخته شد و روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا الیاف کربن در حلال IPA پخش شود. در ادامه، ۰/۱۴ گرم نانوذرات آلومینا، ۰/۱ (معادل ۰/۰۰۲ گرم) و ۱ درصد وزنی (معادل ۰/۰۲ گرم) از میکروذرات MCMB و ۲ گرم از نانوپودر SiC، در ۲۰۰ میلی‌لیتر حلال اتیل متیل کتون ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت بر روی یک همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس سوسپانسیون حاصل، در آون در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد. پس از آن، سوسپانسیون حاوی الیاف کربن پخش شده، با پودر خشک شده حاوی نانوپودر SiC، نانوذرات آلومینا و میکروذرات MCMB مخلوط شد و به مدت ۲۴ ساعت روی یک همزن مغناطیسی قرار گرفت. سپس سوسپانسیون MCMB-Cf/alumina/nanoSiC در آون در دمای

کردن دما و زمان تف‌جوشی کامپوزیت Cf/SiC به روش SPS را انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که با افزایش زمان تف‌جوشی از ۵ به ۱۵ دقیقه و دمای تف‌جوشی از ۱۷۰۰ به ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، چگالی و سختی به دلیل نفوذ بیشتر و حذف تخلخل‌های نمونه افزایش یافت. در میان نمونه‌ها، نمونه تف‌جوشی شده در زمان ۱۵ دقیقه و دمای ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، نزدیک‌ترین ضریب اصطکاک دیسک ترمز هوایی (ضریب ۰/۴) را داشت. قاسمی و همکاران (۲)، پژوهشی را با هدف بررسی اثر طول الیاف کربن بر خواص، چگالی، ضریب اصطکاک، سختی و چقرمگی شکست کامپوزیت‌های Cf/SiC ساخته شده به روش SPS انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش طول الیاف کربن از ۳ به ۱۰ میلی‌متر، به دلیل حذف تخلخل‌های نمونه، چگالی افزایش می‌یابد. اما با افزایش بیشتر طول الیاف کربن به ۱۵ میلی‌متر، به دلیل کلوخه‌ای شدن برخی از نانوذرات و دسته‌ای شدن برخی از الیاف کربن و افزایش میزان تخلخل در نمونه، چگالی و سختی Cf/SiC کاهش یافت. در بین نمونه‌ها، نمونه‌های حاوی الیاف کربن ۵ میلی‌متر، نزدیک‌ترین ضریب اصطکاک را به همکاران اصطکاک مورد نیاز ترمزهای هوایی داشتند. هو و همکاران (۱۰)، پژوهشی را با هدف بررسی اثر افزودن MCMB بر ریزساختار و خواص کامپوزیت‌های Cf/C انجام دادند. بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده شد که با افزایش مقادیر MCMB، مقاومت خمشی به دلیل ایجاد حفره‌ها و ترک‌های اطراف ذرات MCMB، در اثر انقباض بین ذرات MCMB و کامپوزیت، کاهش و هدایت حرارتی افزایش یافت. وانگ و همکاران (۱۱)، به بررسی ریزساختار و عملکرد تریبولوژیکی کامپوزیت‌های با زمینه کاربید سیلیسیم تقویت شده با ریزدانه‌های مزوفاز کربنی (MCMB-SiC) پرداختند. با افزایش محتوای MCMB، خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به دلیل چگالی کم ذرات MCMB و نرم بودن فاز MCMB کاهش یافت.

هدف از این پژوهش، بررسی اثر افزودن MCMB بر ریزساختار، خواص مکانیکی و ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های

جدول ۱- مشخصات مواد اولیه استفاده شده

شرکت سازنده	مشخصات	ماده اولیه
شرکت US Research Nanomaterials, Inc. آمریکا	✓ ساختار بلوری مکعبی ✓ اندازه ذرات ۴۵-۶۵ نانومتر ✓ خلوص ۹۹/۵ درصد	نانو پودر SiC فاز بتا (β -SiC)
شرکت US Research Nanomaterials, Inc. آمریکا	✓ ساختار بلوری رومبوهدرال و مونوکلینیک ✓ اندازه ذرات ۵۰ نانومتر ✓ خلوص ۹۹/۵ درصد	نانوذرات کمک‌تفجوش آلومینا مخلوط فاز آلفا (α) و بتا (θ)
شرکت TAM کره جنوبی سنتز شده به روش کربنیزه شدن فاز مایع مطابق مرجع (۱۴)	✓ ساختار آمورف ✓ اندازه ذرات ۳۵ میکرومتر	الیاف کربن T300 (3k) میکروذرات مزوفاز کربنی (MCMB)



شکل ۱- طرح‌واره تولید کامپوزیت MCMB-Cf/alumina/nanoSiC

آمورف کربن (۶ و ۷)، سطح‌فعال ویژه بالا و حضور ذرات اکسیدی در سطح نانوذرات β -SiC (۷)، نواقص سطحی و پیوندهای ناقص گرافیتی در MCMB بعد از ۲۴ ساعت هم‌زدن در حلال IPA، سطح آنها قطبیده شده و بدون اضافه کردن سورفکتانت خاصی در حلال مربوطه پخش شدند. در شکل (۱)، طرح‌واره‌ای از تولید نانوساختار کامپوزیتی MCMB-Cf/alumina/nanoSiC نمایش داده شده است.

۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد. در نهایت پودر کامپوزیت به‌دست آمده، از الک با شماره مش ۸۰ (معادل اندازه ذرات ۱۸۰ میکرومتر) عبور داده شد. الیاف کربن ۵ میلی‌متری به دلیل تردی بالا به الیاف‌های با طول کمتر از ۱۵۰ میکرومتر در حین هم‌زدن تبدیل می‌شود. به همین دلیل، از مش ۸۰ عبور می‌کند. مواد اولیه شامل الیاف کربن، نانوذرات سیلیکون کاربید و MCMB، به دلیل نقص چیدمان اتم‌های کربن سطحی در الیاف

جدول ۲- خلاصه نام‌گذاری نمونه‌های تفجوشی شده به روش SPS در دمای ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد با فشار ۵۰ مگاپاسکال در مدت زمان ۱۵ دقیقه

فاز زمینه	فاز کمک تفجوش	میزان MCMB	نام نمونه
۲ گرم نانوذرات SiC	۰/۱۴ گرم نانوذرات آلومینا	۰/۱ درصد (۰/۰۰۲ گرم)	CSM-0/1
		۱ درصد (۰/۰۲ گرم)	CSM-1

۲-۳- تفجوشی پودر کامپوزیت MCMB-Cf/SiC

پودرهای کامپوزیتی MCMB-Cf/SiC تهیه شده، با استفاده از دستگاه SPS مدل MUT10T20A ساخت دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تفجوشی شدند. در این فرآیند، مقدار ۲ گرم از پودرهای کامپوزیتی MCMB-Cf/SiC در دستگاه SPS در دمای ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه با فشار ۵۰ مگاپاسکال قرار داده شد. نرخ افزایش دما در این فرآیند، ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه بود. همچنین قالب‌های به کار رفته در فرآیند SPS از جنس گرافیت و با ابعاد قطر خارجی ۴ سانتی‌متر و قطر داخلی ۲ سانتی‌متر و ارتفاع ۴ سانتی‌متر بودند. خلاصه نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

۲-۴- مشخصه‌یابی و آزمون‌های مورد استفاده

به منظور شناسایی فازها، از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس^۷ ساخت کشور چین، مدل AW-XDM300 با فیلتر نیکلی و آند مسی با طول موج ۱/۵۴۱۸۴ آنگستروم، ولتاژ ۴۰ کیلوولت، جریان ۳۰ میلی‌آمپر، اندازه گام ۰/۰۵ درجه و زمان هر گام یک ثانیه در محدوده ۲θ برابر ۱۰ تا ۸۰ درجه استفاده شد. فازشناسی الگوهای پراش پرتو ایکس (XRD) هر کدام از نمونه‌ها نیز توسط نرم‌افزار X'Pert HighScore انجام شد.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی^۸ و تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی^۹ با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی چک و VEGA\\TESCAN-XMU ساخت کشور جمهوری چک و دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل MIRA3 TESCAN-XMU ساخت کشور جمهوری چک و

دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مدل QUANTA FEG-450 ساخت شرکت FEI کشور آمریکا تهیه شد. از طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس^{۱۰} و نقشه‌برداری پرتو ایکس^{۱۱} از توزیع عناصر همین دستگاه برای بررسی میزان و توزیع عناصر موجود در نمونه‌های تولید شده، استفاده شد. برای اندازه‌گیری چگالی هر کدام از نمونه‌ها از روش ارشمیدس طبق استاندارد ASTM C373 استفاده شد. مطابق استاندارد ASTM C373، ابتدا وزن نمونه دیسک کامپوزیتی تفجوشی شده در هوا اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه در یک مایع با چگالی مشخص (مانند آب مقطر) غوطه‌ور شد و وزن آن در مایع نیز اندازه‌گیری شد. با استفاده از وزن نمونه در هوا و در مایع، چگالی نمونه از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$\text{چگالی} = \frac{\text{چگالی (آب)}}{\text{وزن نمونه در هوا}} \times (\text{وزن نمونه در هوا} - \text{وزن نمونه در آب}) \quad (1)$$

سختی و چقرمگی شکست (K_{IC}) نمونه‌ها تحت شرایط محیطی، با استفاده از روش سختی‌سنجی ویکرز با بار اعمال شده ۳ کیلوگرم (P=۳۰ N) اندازه‌گیری شد. طول متوسط ترک شعاعی (c) نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شد. چقرمگی شکست (K_{IC} بر حسب MPa.m^{1/2}) با استفاده از معادله Antis (رابطه ۲) محاسبه می‌شود (۶).

$$K_{IC} = K \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right) \quad (2)$$

که در آن K ثابت تجربی بدون بعد (K=۰/۰۱۸)، E مدول الاستیک (GPa) و H مقدار سختی (GPa) اندازه‌گیری شده می‌باشد. چقرمگی شکست دیسک ترمز هوایی در حدود ۴-۶ MPa.m^{1/2} باید باشد.

سرامیکی بیش از ۱/۵ گیگاپاسکال است، مقدار حداکثر تنشی تماس هرتزی تقریباً ۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

آزمون استحکام خمشی سه نقطه‌ای با استفاده از دستگاه خمش HOUNSFIELD مدل H25KS، با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه در این پژوهش روی نمونه‌ها انجام شد. در این آزمون شکل نمونه‌ها به صورت دیسک با قطر ۲ سانتی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر بود. استحکام خمشی سه نقطه‌ای برای نمونه دیسکی-شکل و با استفاده از رابطه (۳) به دست آمد. بر اساس این رابطه، (P) نیروی شکست بر حسب نیوتن، (D) قطر نمونه دیسکی شکل بر حسب میلی‌متر و (L) فاصله دو تکیه‌گاه بر حسب میلی‌متر است (۷).

$$\sigma = \frac{8PL}{\pi D^3} \quad (3)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مشخصه‌یابی مواد اولیه

شکل (۳-الف)، الگوی پراش پرتو ایکس نانوپودر کاربید سیلیسیم فاز بتا (β -SiC) را نشان می‌دهد. طبق نتایج آزمون پراش پرتو ایکس، نانوپودر کاربید سیلیسیم، دارای فاز غالب بتا با شبکه کریستالی مکعبی می‌باشد. پراش‌های واقع در 2θ برابر ۳۵/۷، ۴۱/۵، ۶۰/۵، ۷۱/۹ و ۷۵/۷ درجه، به ترتیب، مربوط به صفحات بلوری (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) فاز بتا کاربید سیلیسیم است. همچنین، مقدار ۵/۲ درصد وزنی (محاسبه شده با آنالیز ریتولد در نرم‌افزار Xpert) از فاز آلفا کاربید سیلیسیم با شبکه کریستالی رومبوهدرال نیز در نانوپودر کاربید سیلیسیم مشاهده می‌شود. شکل (۳-ب)، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نانوپودر کاربید سیلیسیم فاز بتا را نشان می‌دهد. طبق نتایج تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی، نانوذرات کاربید سیلیسیم دارای اندازه ذرات ۴۵ الی ۶۵ نانومتر با مورفولوژی کاملاً کروی هستند.

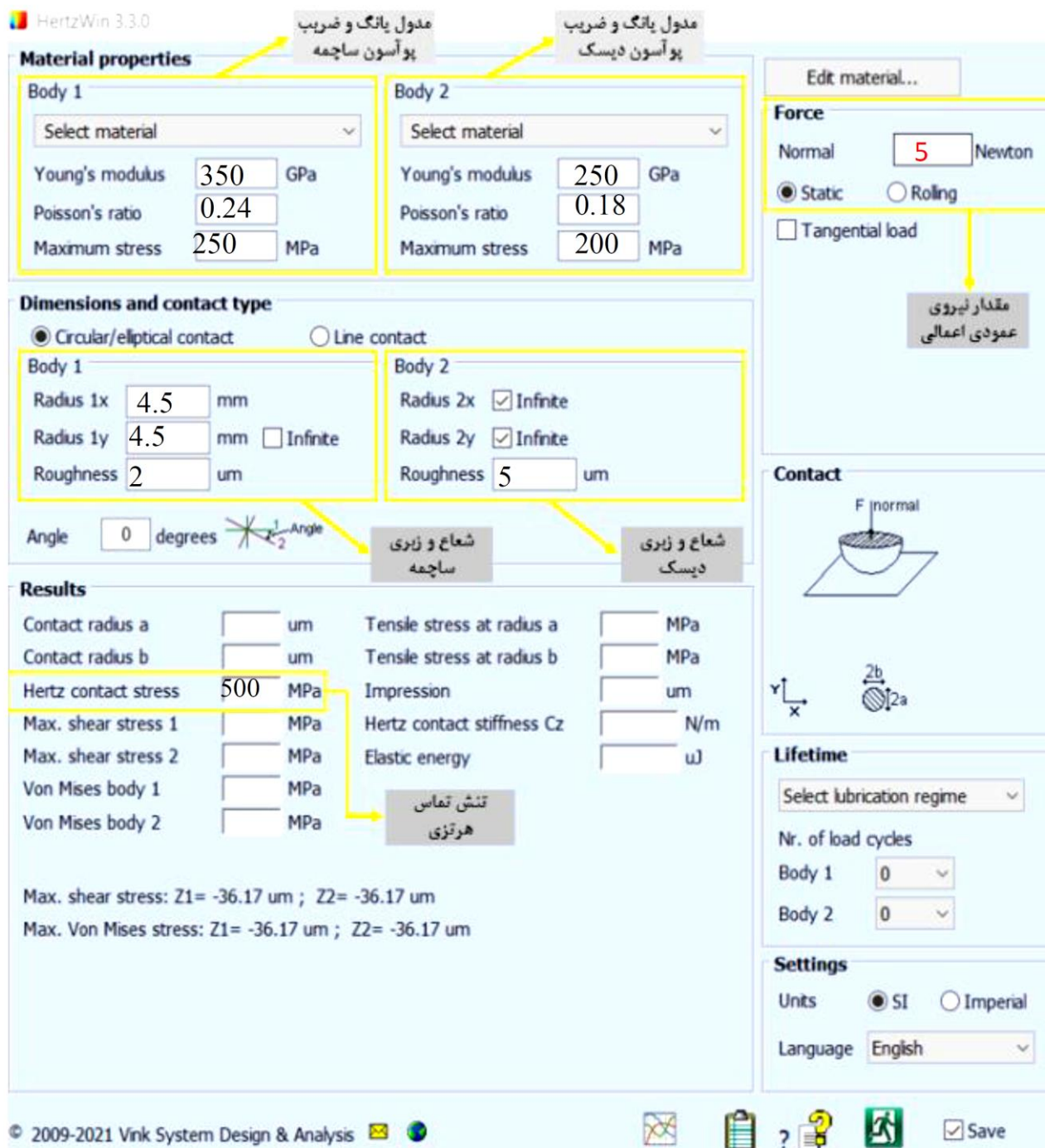
شکل (۴)، الگوی پراش پرتو ایکس ریزدانه‌های مزوفاز کربنی (MCMB) را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده،

رابطه Antis معمولاً برای مواد همگن و همسانگرد به خوبی کار می‌کند، اما در این پژوهش، برای کامپوزیت‌های زمینه سرامیکی مانند C_f/SiC، به دلیل سادگی و در دسترس بودن و مقایسه چقرمگی شکست بین دو نمونه MCMB-C_f/SiC با درصد‌های وزنی ۱/۰ و ۱ MCMB استفاده شد. لذا اعداد به دست آمده از این رابطه، اعداد مطلق چقرمگی نمونه‌ها به دست نمی‌آید و صرفاً برای مقایسه دو نمونه تفجوشی شده در این پژوهش استفاده شد.

به منظور تعیین ضریب اصطکاک، آزمون سایش مطابق با استاندارد ASTM G99-17 انجام شد. برای بررسی سایش، از پین آلومینا با سختی ۱۸/۵ GPa استفاده شد. نوک پین به صورت نیم‌کره با قطر ۹ میلی‌متر (شعاع ۴/۵ mm) در تماس با نمونه قرار دارد. آزمون سایش در شرایط لغزشی بدون ماده روانکار، در محدوده دمایی ۲۰ الی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۲۵ الی ۳۵ درصد و سرعت خطی ثابت در مسافت ۵۰۰ متر با بار ۵۰۰ گرم و سرعت چرخش ۱۰۰ rev/min انجام شد. تغییرات وزن نمونه، قبل و بعد از طی مسافت ۵۰۰ متر توسط ترازو محاسبه شد. تعیین تنش تماس هرتزی با استفاده از نرم‌افزار HertzWin مطابق شکل (۲)، به دست آمد.

طبق شکل (۲)، می‌توان با وارد کردن مقادیر مدول یانگ (بر حسب گیگاپاسکال)، تنش تسلیم و ضریب پواسون برای دیسک کامپوزیتی MCMB-C_f/SiC و ساچمه (پین آلومینا) و همچنین شعاع (بر حسب میلی‌متر) و زبری پین آلومینا و نمونه تفجوشی شده MCMB-C_f/SiC (بر حسب میکرومتر) مقدار نیروی عمودی مورد نیاز برای آزمون سایش (مقدار ۵ نیوتون معادل بار ۵۰۰ گرمی) به دست آمد. شایان ذکر است مقدار حداکثر تنش تماس هرتزی در بیشتر کاربردهای عملیاتی و صنعتی کمتر از ۵۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود.

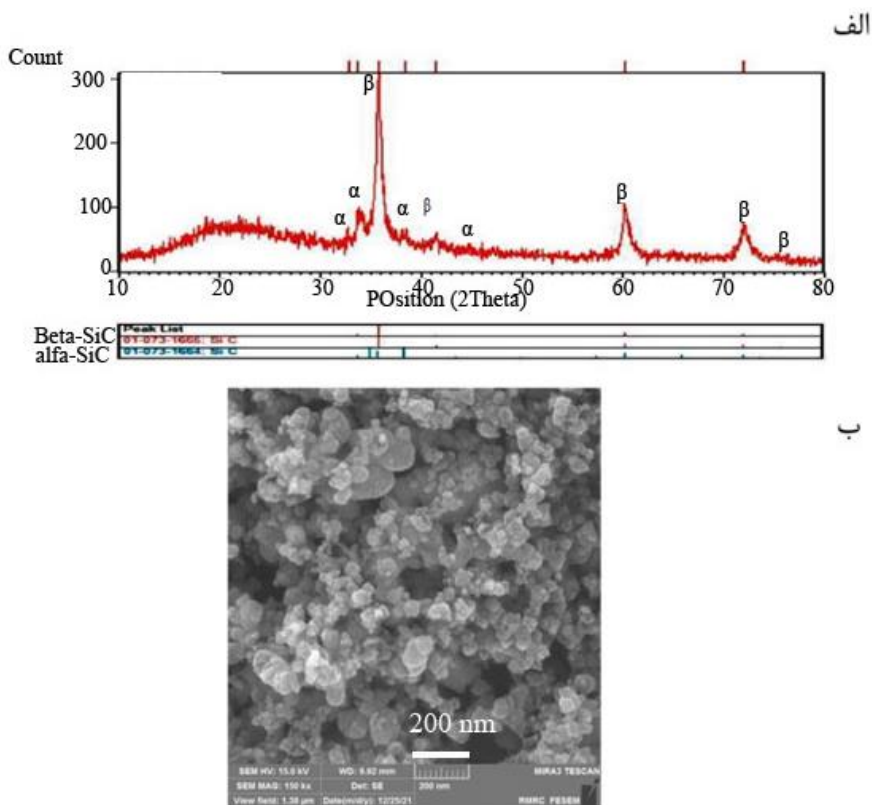
در طراحی‌های مهندسی، معمولاً یک ضریب اطمینان در نظر گرفته می‌شود تا تنش‌های تماس از حد مجاز تحمل ماده مورد آزمون فراتر نرود. برای مواد سرامیکی، ضریب اطمینان معمولاً بین ۱/۵ تا ۳ در نظر گرفته می‌شود. یعنی اگر تحمل مواد



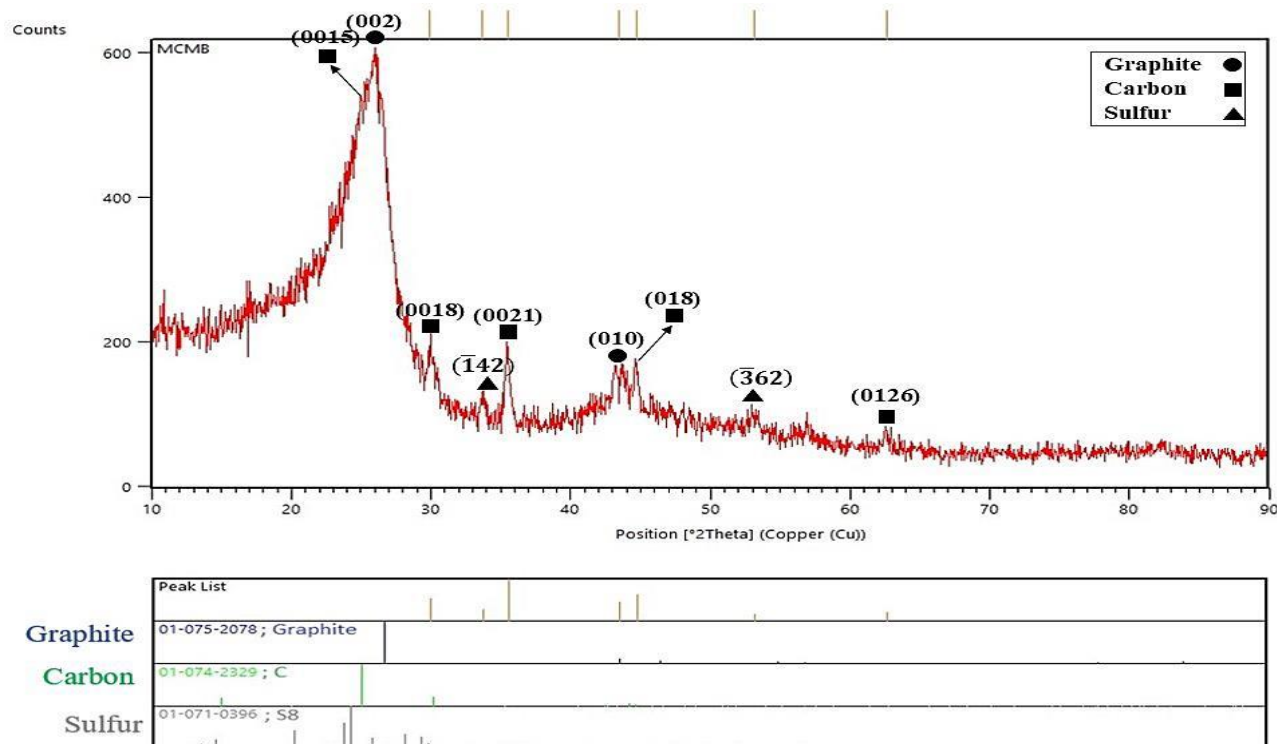
شکل ۲- تعیین تنش تماس هرتزی با استفاده از نرم‌افزار HertzWin.

بیش‌تری دارد و مربوط به پراش پرتو ایکس از صفحه بلوری کربن و مقداری فاز گوگرد (سولفور) می‌باشد. پیک ایجادشده در ۲۵ برابر ۲۶ درجه نسبت به سایر پیک‌ها شدت و پهنای

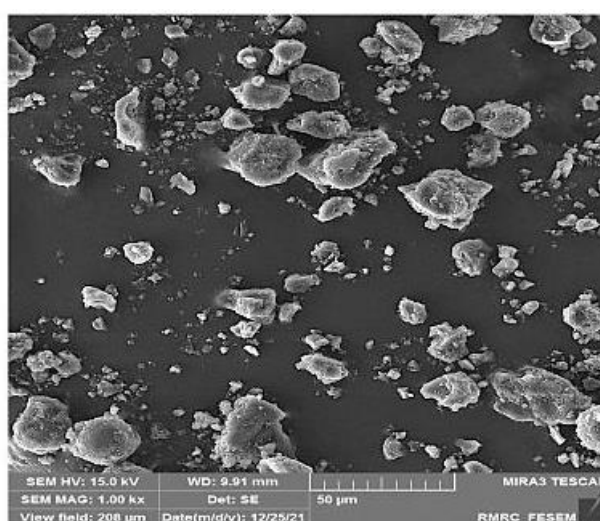
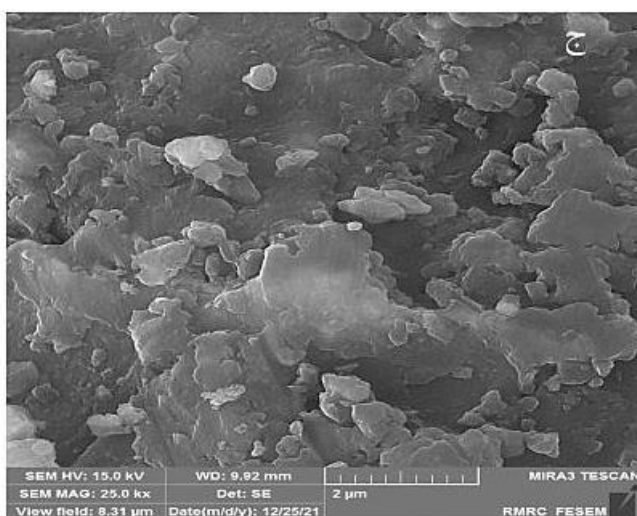
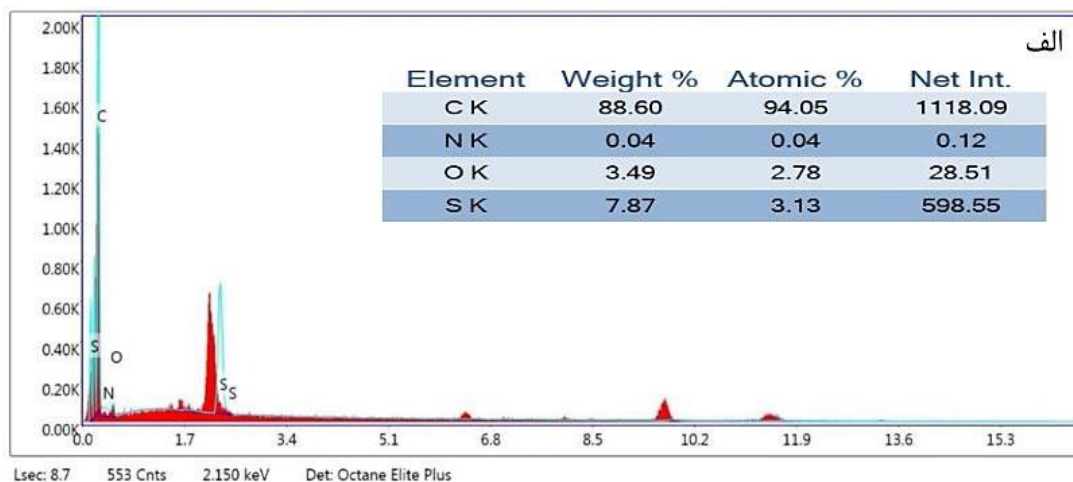
ریزدانه‌های مزوفاز کربنی تهیه‌شده، حاوی فازهای گرافیت، کربن و مقداری فاز گوگرد (سولفور) می‌باشد. پیک ایجادشده در ۲۵ برابر ۲۶ درجه نسبت به سایر پیک‌ها شدت و پهنای



شکل ۳- الف) آزمون پراش پرتو ایکس نانوپودر کاربید سیلیسیم با فاز بتا، ب) تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از کاربید سیلیسیم با فاز بتا.



شکل ۴- نتایج آزمون پراش پرتو ایکس ریزدانه‌های مزوفاز کربنی.



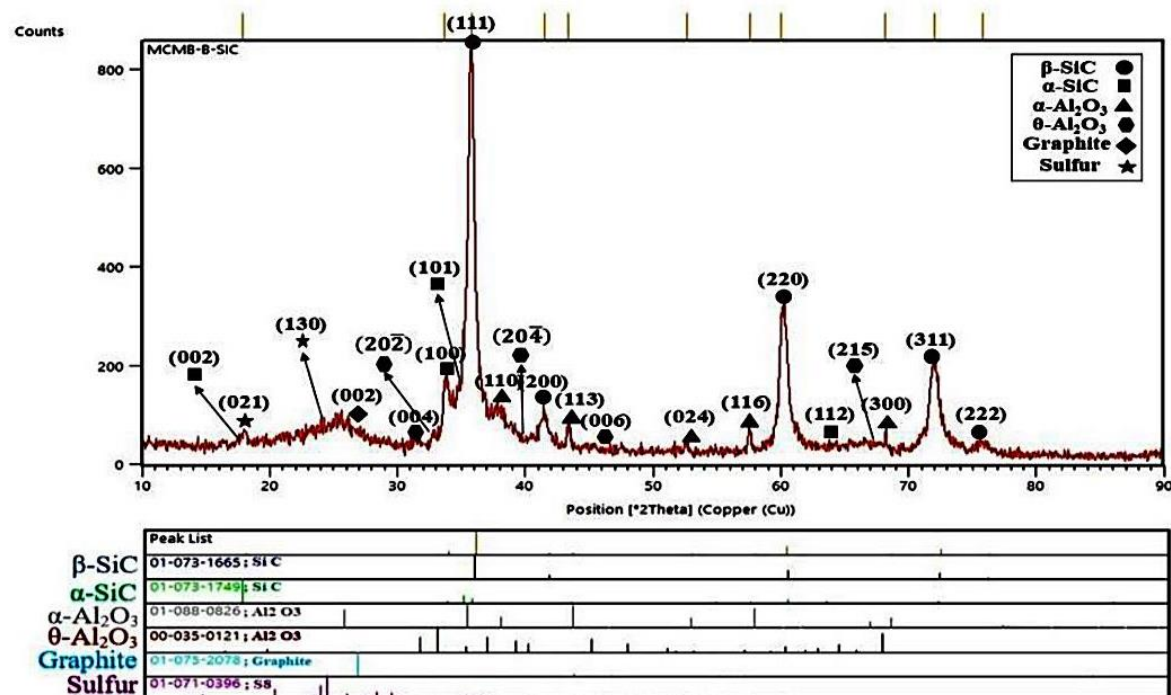
شکل ۵-الف) نتایج آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس ریزدانه‌های مزوفاز کربنی،

ب، ج) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در دو بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ۲۵۰۰۰ برابر.

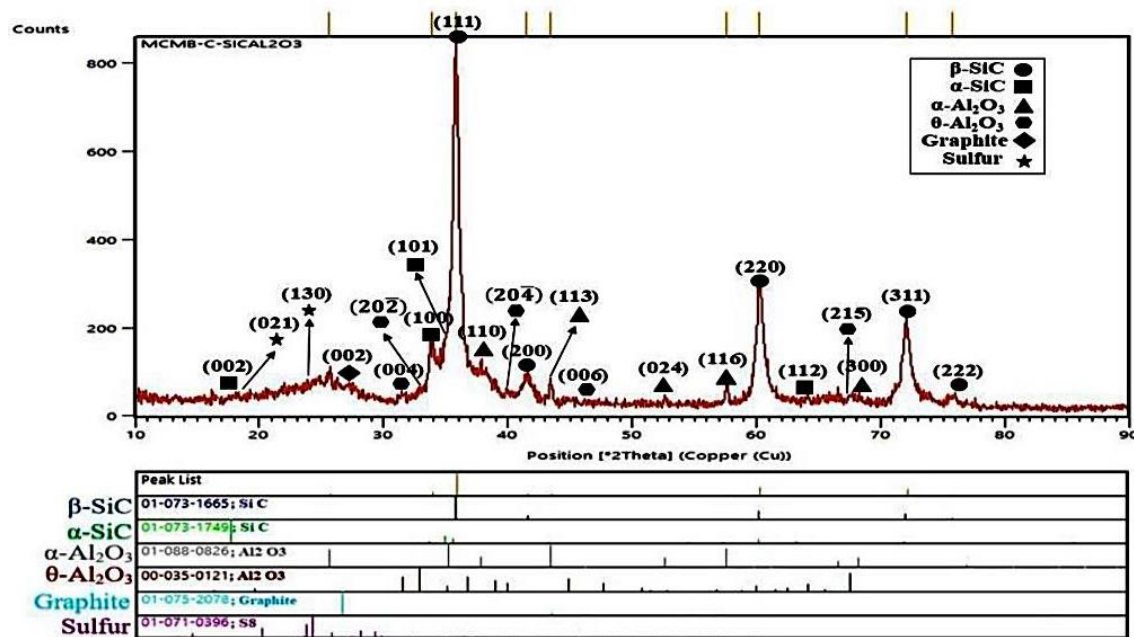
گسیل میدانی با بزرگنمایی‌های متفاوت از ریزدانه‌های مزوفاز کربنی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست آمده، اندازه متوسط ذرات ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در حدود ۳۵ میکرومتر می‌باشد. همچنین برخی ذرات دارای مورفولوژی کروی و برخی نیز دارای مورفولوژی شبه‌کروی هستند و در بعضی از قسمت‌ها، ذرات به یکدیگر پیوسته و به‌صورت کلوخه‌ای درآمده‌اند. در شکل (۵-ج)، تصویر با بزرگنمایی بالاتر از سطح ذرات MCMB را نشان می‌دهد. طبق این تصویر، ذرات صفحه‌ای شکل در سطح MCMB مشاهده می‌شود.

شاخصه بارز شناسایی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی با استفاده از الگوهای پراش پرتو ایکس، حضور پیک مربوط به پراش پرتو ایکس از صفحه بلوری (۰۰۲) گرافیت می‌باشد (۱۴-۱۱). نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، در شکل (۵) نشان داده شده است. طبق نتایج به‌دست آمده، پودر ریزدانه مزوفاز کربنی تهیه شده دارای حدود ۸۹ درصد وزنی کربن، ۳ درصد وزنی اکسیژن، ۸ درصد وزنی گوگرد و مقدار بسیار کمی نیتروژن می‌باشد.

شکل (۵-ب)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی



الف



ب

شکل ۶- نتایج آزمون پراش پرتو ایکس MCMB-C/SiC با (الف) ۱ درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی قبل از فرآیند تف‌جوشی.

سیلیسیم، الیاف کربن (طول ۵ میلی‌متر) و نانوذرات کمکتف- جوش آلومینا با ۱ درصد MCMB، در شکل (۶-الف و ب) نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده، این کامپوزیت

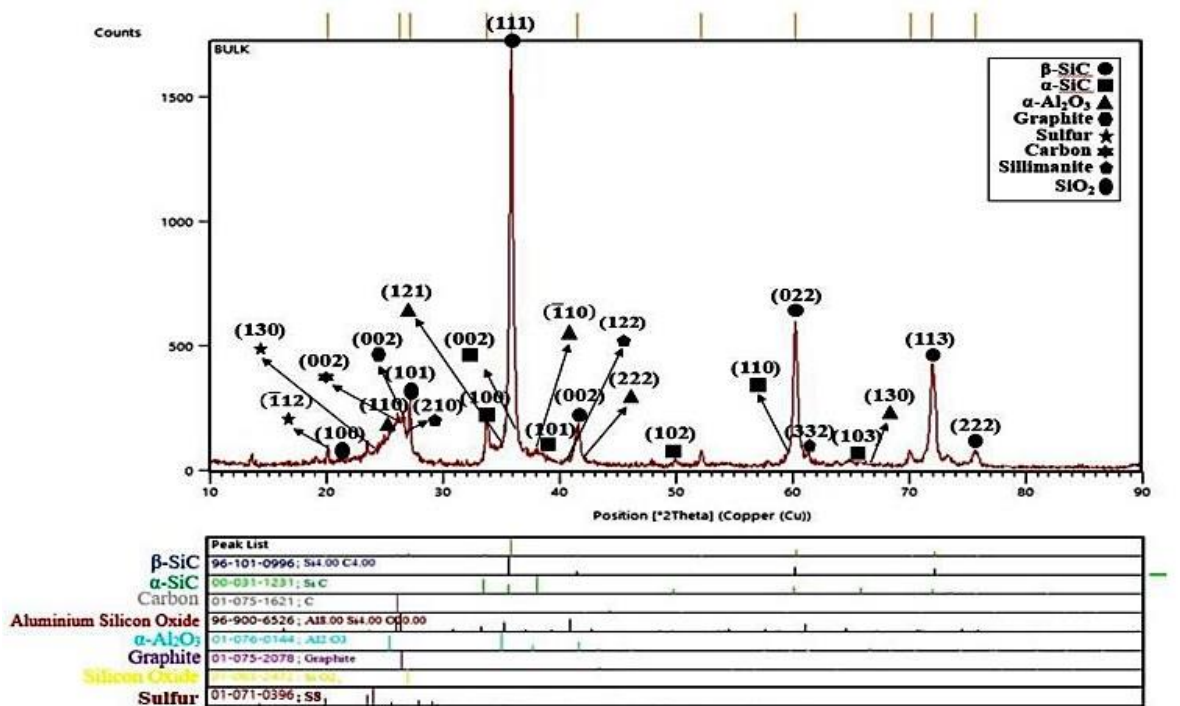
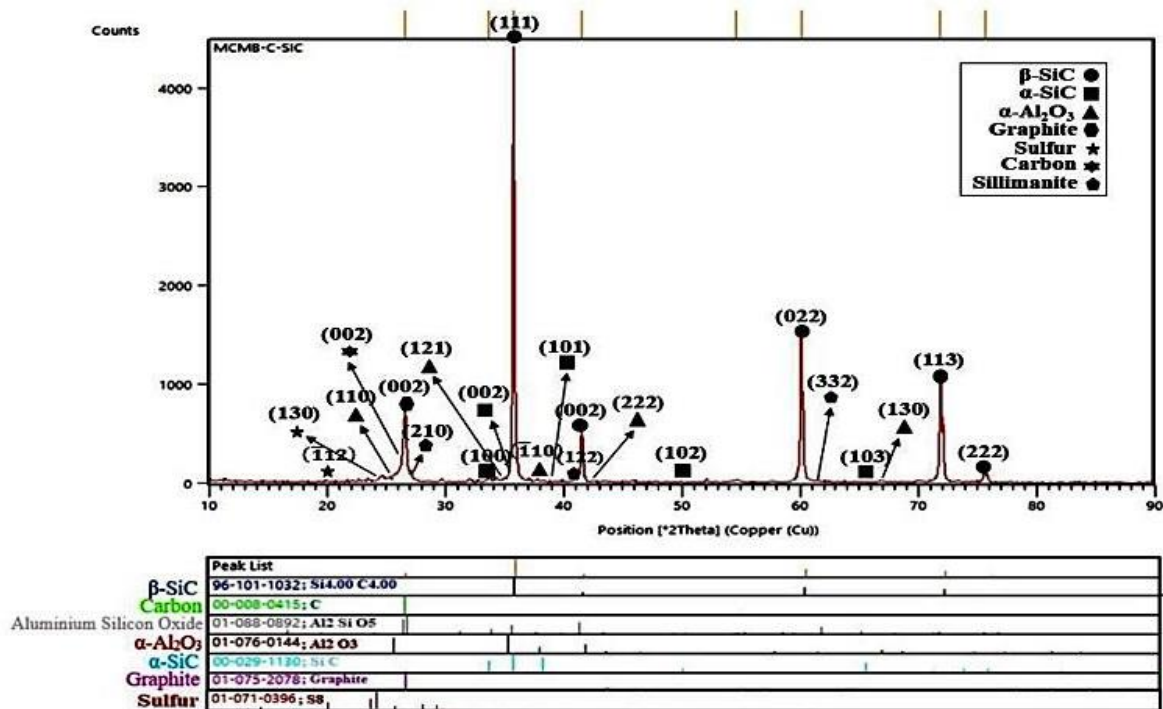
۲-۳- بررسی فاز پیش ماده کامپوزیت MCMB-C/SiC قبل و بعد از فرآیند تف‌جوشی به روش SPS نتایج آزمون پراش پرتو ایکس مخلوطی از نانوپودر کاربرد

وزنی بوده است. اگرچه، MCMB بین ۰/۱ و ۱ درصد وزنی به کامپوزیت الیاف کربن/سیلیکون کاربرد اضافه شده است، ولی نتایج XRD نشان می‌دهد، مطابق با حد تشخیص آزمون پراش پرتو X، فاز گوگرد حداقل بیش از ۵ درصد وزنی در کامپوزیت الیاف کربن/سیلیکون کاربرد وجود دارد.

الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌های تف‌جوشی شده به‌روش SPS در دمای ۱۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، با فشار ۵۰ مگاپاسکال و مدت زمان ۱۵ دقیقه، حاوی یک درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در شکل‌های (۷-الف و ب) نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، در نمونه‌ها، فازهای آلفا و بتا کاربرد سیلیسیم، با ساختارهای بلوری مکعبی و رومبهدرال و فاز آلفا کمک‌تف‌جوش آلمینا، با ساختار بلوری رومبهدرال تشکیل شده‌اند. مطابق نتایج شکل (۷)، پیک واقع در ۲θ معادل ۲۶ درجه در حضور یک درصد وزنی مزوفاز کربنی کاملاً تیز است، ولی در شکل (۶)، در حضور ۰/۱ درصد وزنی مزوفاز کربنی پراش پهن در این ناحیه دیده می‌شود. با توجه به پیک موجود در ۲θ برابر حدود ۲۶ درجه که مربوط به پراش پرتو ایکس از صفحه بلوری (۰۰۲) گرافیت می‌باشد، فاز کربن و گرافیت نیز در نمونه تشکیل شده است که نشانگر حضور الیاف کربن و ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در کامپوزیت است. این مسئله نشان می‌دهد که بعد از انجام فرآیند تف‌جوشی MCMB-C_F/SiC، الیاف کربن و MCMB، از حالت آمورف خارج شده و دارای ساختار بلوری مشابه گرافیت شده‌اند. ولی در نمونه 0.1wt.%MCMB-C_F/SiC، هنوز پیک پهن ناشی از نظم کوتاه‌برد صفحات گرافیت در نمونه وجود دارد. همچنین مقداری فاز سولفور (گوگرد) نیز در هر دو کامپوزیت وجود دارد که مربوط به ریزدانه‌های مزوفاز کربنی می‌باشد. مطابق نتایج شکل (۷)، فاز بتا کمک‌تف‌جوش آلمینا به فاز آلفا تبدیل شده است. ولی در شکل (۶)، نمونه حاوی ۰/۱ درصد وزنی مزوفاز کربنی، هنوز فاز بتا وجود دارد. این موضوع تأیید می‌کند که مقادیر بیشتر مزوفاز کربنی به بهبود بلورینه‌شدن صفحات گرافیت الیاف آمورف کربن و مزوفاز کربنی و استحاله

حاوی فازهای کاربرد سیلیسیم فاز آلفا (با ساختار بلوری رومبهدرال) و بتا (با ساختار بلوری مکعبی) و فازهای آلفا و بتا آلمینا (با ساختار بلوری رومبهدرال و مونوکلینیک) می‌باشد. استفاده از نانوذرات آلمینای فاز آلفا با مقادیری فاز بتا به‌عنوان کمک‌تف‌جوش در فرآیند SPS نانوکامپوزیت C_F/β-SiC، می‌تواند به کاهش دمای تف‌جوشی، افزایش سرعت تف‌جوشی، کنترل بهتر اندازه دانه، افزایش چگالی و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت نهایی منجر شود. فاز بتا-آلمینا در ماهای پایین‌تر نسبت به فاز آلفا-آلمینا فعالیت بیشتری دارد. در حین تف‌جوشی، فاز بتا-آلمینا به آلفا-آلمینا تبدیل می‌شود که می‌تواند با ایجاد فضاهای خالی و حرکت مرزدانه به تف‌جوشی ذرات و چگالش و کاهش بیشتر تخلخل‌ها کمک کند؛ بنابراین، فاز بتا-آلمینا به‌عنوان یک فاز میانی در فرآیند تبدیل به آلفا-آلمینا عمل کرده و باعث می‌شود ذرات با سرعت بیشتری به هم بچسبند و به‌طور کلی سینتیک تف‌جوشی سریع‌تر شود (۲، ۶ و ۷).

همچنین هاله^{۱۲} (پیک پهن یا پراش پراکنده) ایجادشده در ۲θ برابر ۲۰ الی ۳۰ درجه، نشانگر وجود فاز الیاف کربن با ساختار آمورف^{۱۳} است. این پیک پهن، نشان‌دهنده عدم وجود نظم بلندبرد در ساختار الیاف کربن اضافه‌شده به زمینه سیلیکون کاربرد حتی بعد از فرآیند SPS است. اتم‌ها یا مولکول‌ها در مواد آمورف به‌صورت تصادفی و نامنظم کنار هم قرار گرفته‌اند. این عدم نظم، باعث می‌شود که امواج اشعه ایکس در طیف وسیعی از زوایا پراکنده شوند و هیچ تداخل سازنده کاملی رخ ندهد. در نتیجه، به جای پیک‌های تیز، یک هاله یا باند پهن در الگوی XRD مشاهده می‌شود. پیک ایجادشده در ۲θ برابر حدود ۲۶ درجه نیز مربوط به فاز گرافیت (پراش از صفحه کریستالی (۰۰۲) گرافیت) و حضور ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در کامپوزیت می‌باشد. همچنین مقادیری از فاز سولفور (گوگرد) نیز در کامپوزیت وجود دارد که مربوط به ریزدانه‌های مزوفاز کربنی می‌باشد. مقدار گوگرد در میکروانه‌های مزوفاز کربنی مطابق شکل (۵) (آزمون EDS)، ۷/۸۷ درصد



شکل ۷- نتایج آزمون پراش پرتو ایکس نمونه‌های MCMB-C/SiC تفجوشی شده به روش SPS با
 الف) ۱ درصد، ب) ۱ درصد وزنی MCMB.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌های تف‌جوشی شده به روش SPS با دو درصد ۱/۰ و ۱ درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در شکل (۹) قسمت‌های (الف و ب) نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده، بعد از انجام فرآیند تف‌جوشی به روش SPS نیز الیاف کربن (ذرات میله‌ای شکل سیاه‌رنگ)، به خوبی در بین زمینه ذرات کاربید سیلیسیم (زمینه خاکستری‌رنگ) و آلومینا (ذرات سفیدرنگ) و میکروذرات مزوفاز کربنی (ذرات کروی شکل سیاه‌رنگ) پراکنده شده‌اند (۸-۶). همچنین مطابق شکل (۹)، بعد از فرآیند SPS، برخی از الیاف کربن خرد شده و طول الیاف کربنی به کمتر از ۳۰ میکرومتر رسیده است که نشان می‌دهد فرآیند تف‌جوشی به روش SPS منجر به شکسته شدن برخی از الیاف کربن شده است. مطابق تصاویر شکل (۹)، با زیاد شدن درصد مزوفاز کربنی از ۱/۰ درصد به یک درصد وزنی، ذرات آگلومره سفیدرنگ فاز کمک‌تف‌جوش آلومینا، به طور بهتری در زمینه خاکستری‌رنگ سیلیکون کاربید پخش شده است و از میزان توده‌ای و کلوخه-ای شدن آن کم شده است.

در نمونه‌های نانوکامپوزیتی، ۲۰ درصد وزنی الیاف کربن با دانسیته 1.75 g/cm^3 ، ۷ درصد وزنی آلومینا با دانسیته 3.95 g/cm^3 و ۳/۲۱ درصد سیلیکون کاربید با دانسیته 3.21 g/cm^3 به ترتیب تقریباً معادل ۳۱، ۵ و ۶۴ درصد حجمی است. به همین دلیل، در تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی حجم زیادی از تصویر شامل الیاف کربن است.

نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس برای نمونه‌های تف‌جوشی شده به روش SPS با زمینه نانوذرات کاربید سیلیسیم، با ۱/۰ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در شکل (۱۰) قسمت‌های (الف و ب) نشان داده شده است.

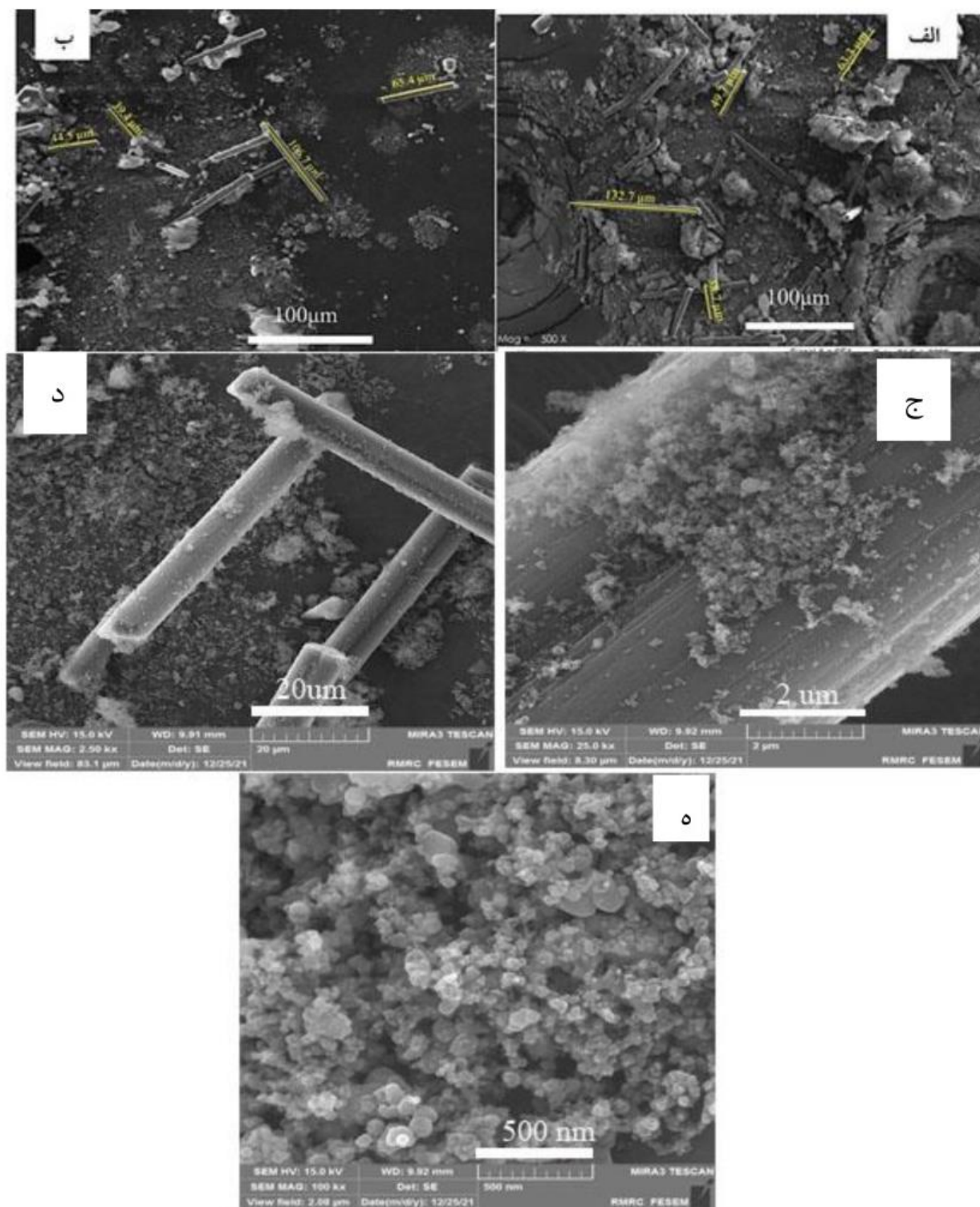
طبق نتایج به دست آمده، نمونه دارای ۱/۰ درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، حاوی حدود ۲۷ درصد وزنی کربن، ۷ درصد وزنی اکسیژن، ۳ درصد وزنی آلومینیوم، ۵۰ درصد وزنی سیلیسیم و ۱۳ درصد وزنی گوگرد می‌باشد. همچنین نمونه

کامل فاز تتا به آلفا آلومینا کمک کرده است. این موضوع می‌تواند مربوط به بهبود رسانایی جریان الکتریسیته در فرآیند SPS، به دلیل مقادیر بیشتر مزوفاز کربنی در نانو کامپوزیت Cf/SiC باشد. در نمونه‌ها، مقداری فاز سیلیکات آلومینیوم (سیلیمانیت) نیز به دلیل واکنش کاربید سیلیسیم با آلومینا ایجاد شده است. همچنین، در نمونه حاوی یک درصد MCMB مقداری فاز SiO_2 نیز به دلیل اکسید شدن مقداری از کاربید سیلیسیم حین فرآیند تف‌جوشی ایجاد شده است (۲، ۷ و ۱۴). احتمال واکنش بین مزوفاز کربنی و سیلیکون کاربید ($\beta\text{-SiC}$) در دماهای بالا وجود دارد. این واکنش می‌تواند منجر به تشکیل فازهای دیگری از جمله اکسید سیلیسیم شود. همچنین، آلفا آلومینا ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)، ممکن است به عنوان یک کاتالیزور عمل کرده و سرعت واکنش‌های اکسیداسیون مزوفاز کربنی را در دماهای بالا افزایش دهد. این امر می‌تواند به تشکیل بیشتر اکسید سیلیسیم منجر شود.

۳-۳- بررسی تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی کامپوزیت MCMB-Cf/SiC قبل و بعد از فرآیند تف‌جوشی به روش SPS

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی مخلوطی از نانوپودر کاربید سیلیسیم، نانوذرات کمک‌تف‌جوش آلومینا و الیاف کربن با درصدهای ۱/۰ و ۱ درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی قبل از فرآیند SPS، در شکل (۸) قسمت‌های (الف و ب) نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، الیاف کربن با طول‌های گوناگون ۳۰ تا ۱۳۰ میکرومتر، به طور یکنواخت در بین نانوذرات کاربید سیلیسیم و آلومینا و میکروذرات مزوفاز کربنی پراکنده شده‌اند. طبق نتایج، در بعضی از قسمت‌ها، تعدادی از الیاف کربن به یکدیگر چسبیده و کلوخه‌ای شده‌اند.

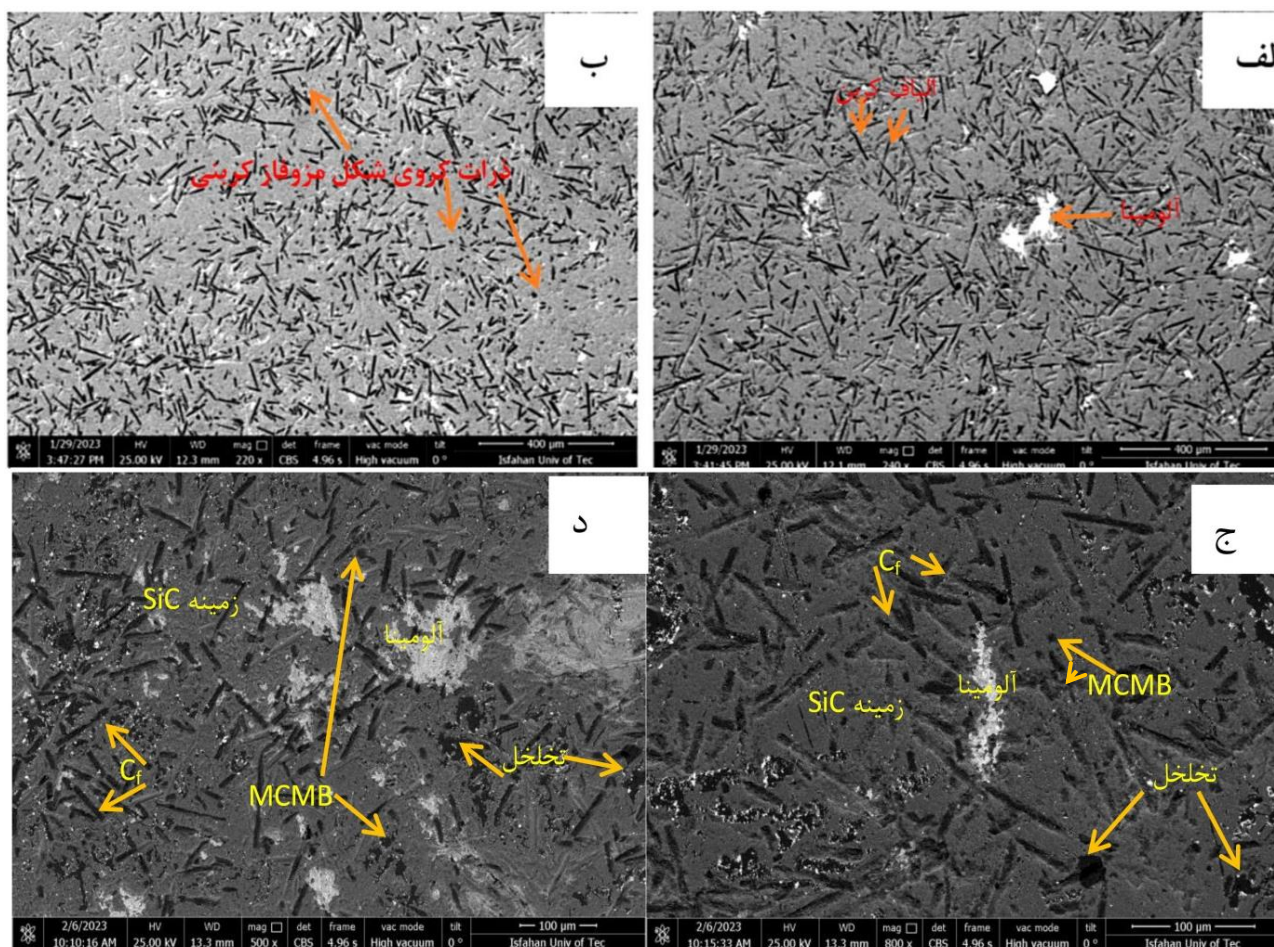
مطابق شکل (۸-ج)، الیاف کربن با طول ۸۰ میکرومتر در پودر کامپوزیتی دیده می‌شود که روی سطح آن نانوذرات با قطر ۵۰ تا ۶۵ نانومتر است که احتمالاً مربوط به حضور نانوذرات سیلیکون کاربید روی سطح الیاف کربن است (شکل ۸-د، ه).



شکل ۸- تصاویر FESEM پودر کامپوزیتی MCMB-Cr/SiC با درصدهای ریزدانه‌های مزوفاز کربنی:

(الف) با ۱٪ درصد MCMB و (ب) با ۱ درصد MCMB قبل از SPS.

(ج-ه) تصاویر FESEM الیاف کربن و نانوذرات سیلیکون کاربید پخش شده روی سطح الیاف کربن در دو بزرگنمایی ۲۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ برابر.



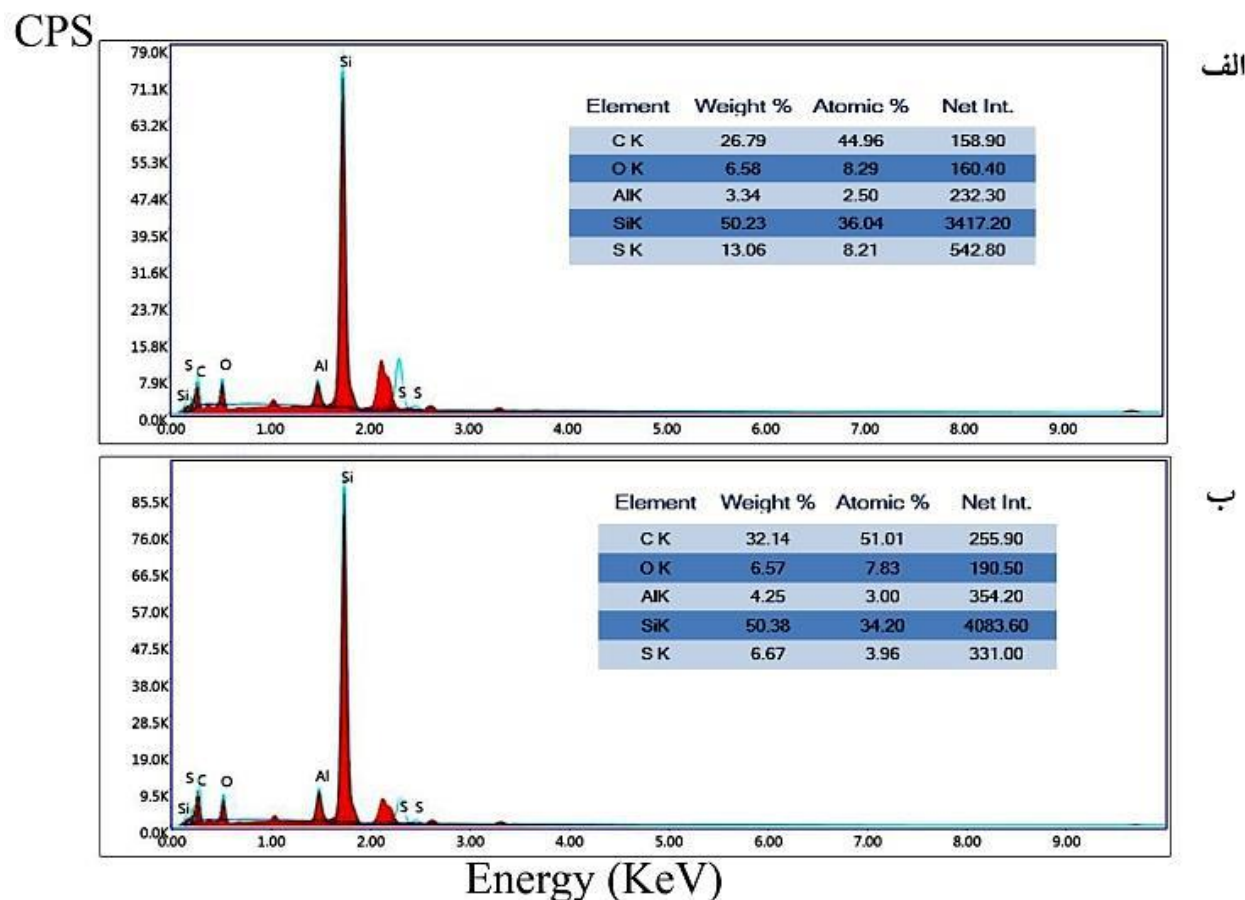
شکل ۹- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌های MCMB-C/SiC تف‌جوشی شده به روش SPS با ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در بزرگنمایی‌های مختلف: الف، ج) با ۱٪ درصد MCMB و ب و د) با ۱ درصد MCMB.

با دو درصد ۱٪ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، در شکل (۱۱-الف و ب) نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۱-الف) در نمونه ۱٪ درصد وزنی مزوفاز کربنی، تجمع و کلوخه-ای شدن کمک‌تف‌جوش آلومینا مشاهده می‌شود.

مطابق شکل (۱۱-ب)، تخلخل بین الیاف کربن و زمینه سیلیکون کاربید و توزیع یکنواخت عنصر آلومینوم در زمینه و عدم تجمع فاز آلومینا در آزمون تصویربرداری EDS را نشان می‌دهد. احتمالاً در درصدهای بیشتر مزوفاز کربنی، همان‌طور که در آزمون پراش پرتو ایکس تأیید شد، تمامی فاز آلفا استحاله پیدا کردند. این موضوع به ایجاد فضای خالی در مرزدها و توزیع بهتر فاز کمک‌تف‌جوش در کل زمینه

دارای یک درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، حاوی حدود ۳۲ درصد وزنی کربن، ۷ درصد وزنی اکسیژن، ۴ درصد وزنی آلومینوم، ۵۰ درصد وزنی سیلیسیم و ۷ درصد وزنی گوگرد می‌باشد. گوگرد موجود در نمونه‌ها، مربوط به ریزدانه‌های مزوفاز کربنی است. نمونه حاوی مقادیر بیشتر مزوفاز کربنی باید مقدار گوگرد بیشتری در آزمون EDS نشان می‌داد. از آنجاکه، آنالیز EDS یک آنالیز نیمه کمی است و برای مواد به خصوص سبک مانند اکسیژن، گوگرد و کربن، درصد گزارش شده توسط این آزمون خیلی قابل اعتماد نیست.

تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و نقشه‌برداری پرتو ایکس از توزیع عناصر نمونه‌های تف‌جوشی شده به روش SPS



شکل ۱۰- نتایج آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نمونه‌های MCMB-Ci/SiC تفجوشی شده به روش SPS با ریزدانه‌های مزوفاز کربنی: الف) با ۰/۱ درصد MCMB و ب) با ۱ درصد MCMB.

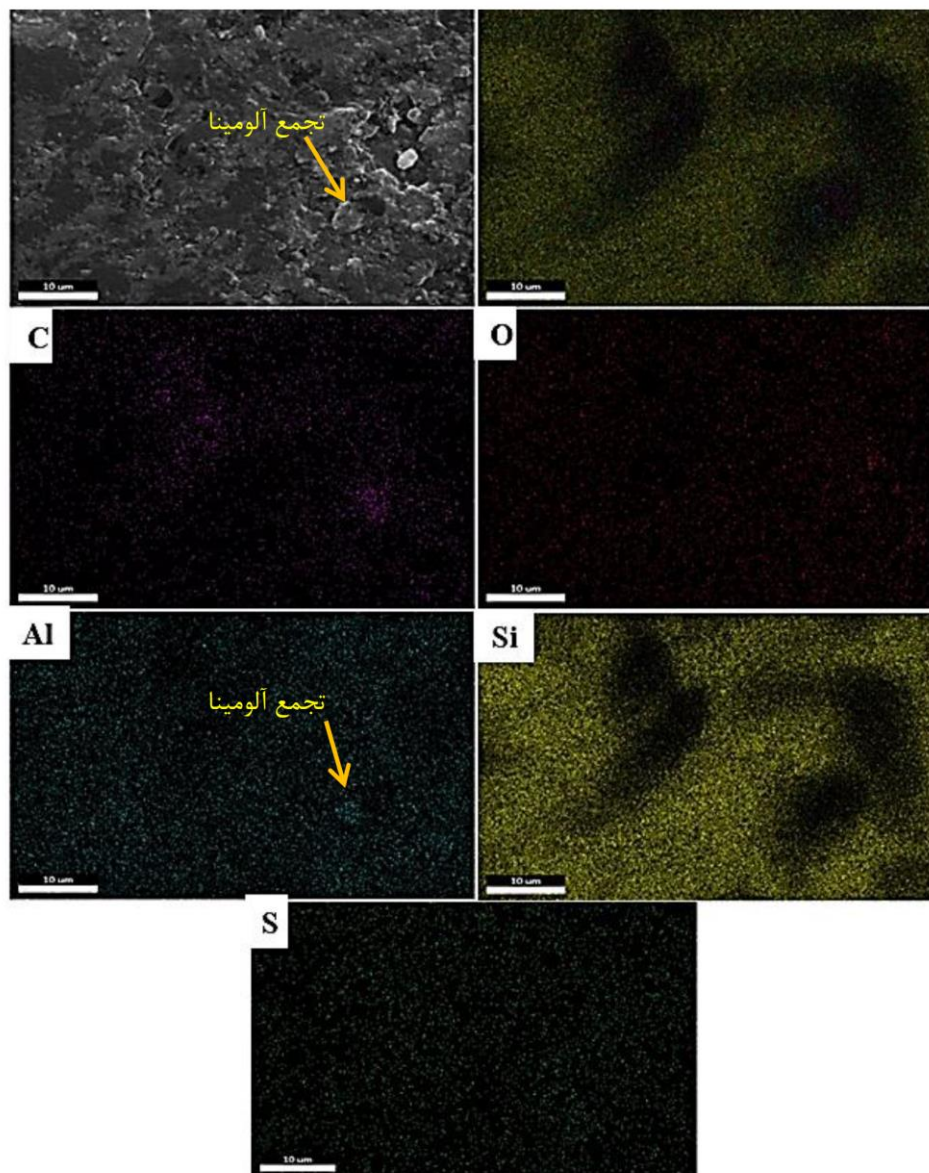
درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی با استفاده از روش ارشمیدس محاسبه شد. چگالی نمونه‌ها حاوی ۰/۱ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به ترتیب برابر ۲/۶۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب (۹۳/۱ درصد چگالی تئوری: ۲/۸۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و ۲/۴۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب (۸۹/۸ درصد چگالی تئوری: ۲/۷۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، به دست آمد. محاسبات چگالی تئوری در روابط (۱) تا (۸) ارائه شده است. درصد تخلخل ظاهری در نمونه حاوی ۰/۱ و ۱ درصد وزنی مزوفاز کربنی به ترتیب ۶/۹ و ۱۰/۲ درصد است.

$$1/\rho_{\text{composite}} = (0.20C_i/1.75) + (0.07Al_2O_3/3.95) + (0.72SiC/3.21) + (0.001MCMB/1.75) \quad (1)$$

$$1/\rho_{\text{composite}} = 0.1143 + 0.0177 + 0.2243 + 0.00057(2)$$

سیلیکون کاربید کمک کرده است. استحاله فازی از $\theta-Al_2O_3$ به $\alpha-Al_2O_3$ ، به‌طور کلی با کاهش حجم همراه است. این کاهش حجم به دلیل تغییر ساختار بلوری و تراکم بیشتر اتم‌ها در ساختار آلفا است. مقدار دقیق این کاهش حجم به چگالی و ساختار فازهای اولیه و نهایی بستگی دارد، اما به‌طور معمول در حدود ۸ تا ۱۵ درصد کاهش حجم رخ می‌دهد. به همین دلیل در شکل (۱۱-ب)، در مرز مشترک الیاف کربن و زمینه سیلیکون کاربید، تخلخل بیشتری نسبت به نمونه حاوی ۰/۱ درصد وزنی MCMB مشاهده می‌شود.

۳-۴- بررسی چگالی نمونه‌های تفجوشی شده به روش SPS چگالی نمونه‌های تفجوشی شده به روش SPS با ۰/۱ و ۱



شکل ۱۱- الف- نقشه پراکندگی پرتو ایکس از توزیع عناصر نمونه MCMB-Cf/SiC تفجوشی شده به روش SPS با ۱/ درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی.

$$\rho_{1\text{wt.\%MCMB-Cf/SiC composite}} = 1/0.3620 = 2.762 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{A})$$

طبق نتایج به دست آمده از آزمون ارشمیدس، با افزایش مقدار ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در کامپوزیت با زمینه نانوذرات کاربید سیلیسیم، به دلیل افزایش تخلخل‌های نمونه ناشی از استحاله فازی کامل تتا-آلومینا به آلفا-آلومینا که همراه با ۸ تا ۱۵ درصد کاهش حجم همراه است، چگالی دیسک کامپوزیتی کاهش یافته است.

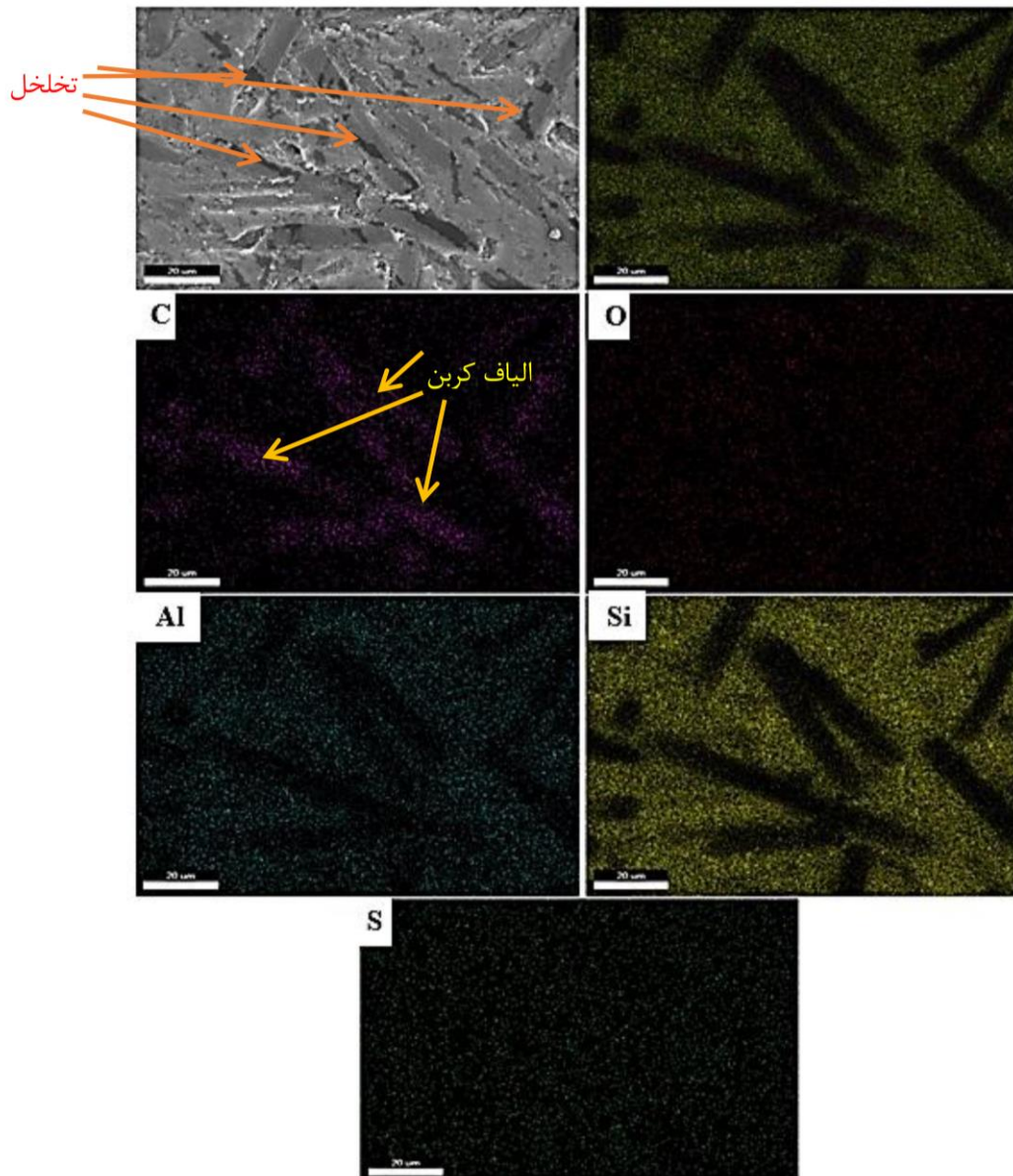
$$1/\rho_{\text{composite}} = 0.3569 \quad (3)$$

$$\rho_{0.1\text{wt.\%MCMB-Cf/SiC composite}} = 1/0.3569 = 2.801 \text{ g/cm}^3 \quad (4)$$

$$1/\rho_{\text{composite}} = (0.20\text{Cf}/1.75) + (0.07 \text{Al}_2\text{O}_3/3.95) + (0.72 \text{SiC}/3.21) + (0.01 \text{MCMB}/1.75) \quad (5)$$

$$1/\rho_{\text{composite}} = 0.1143 + 0.0177 + 0.2243 + 0.0057 \quad (6)$$

$$1/\rho_{\text{composite}} = 0.3620 \quad (7)$$

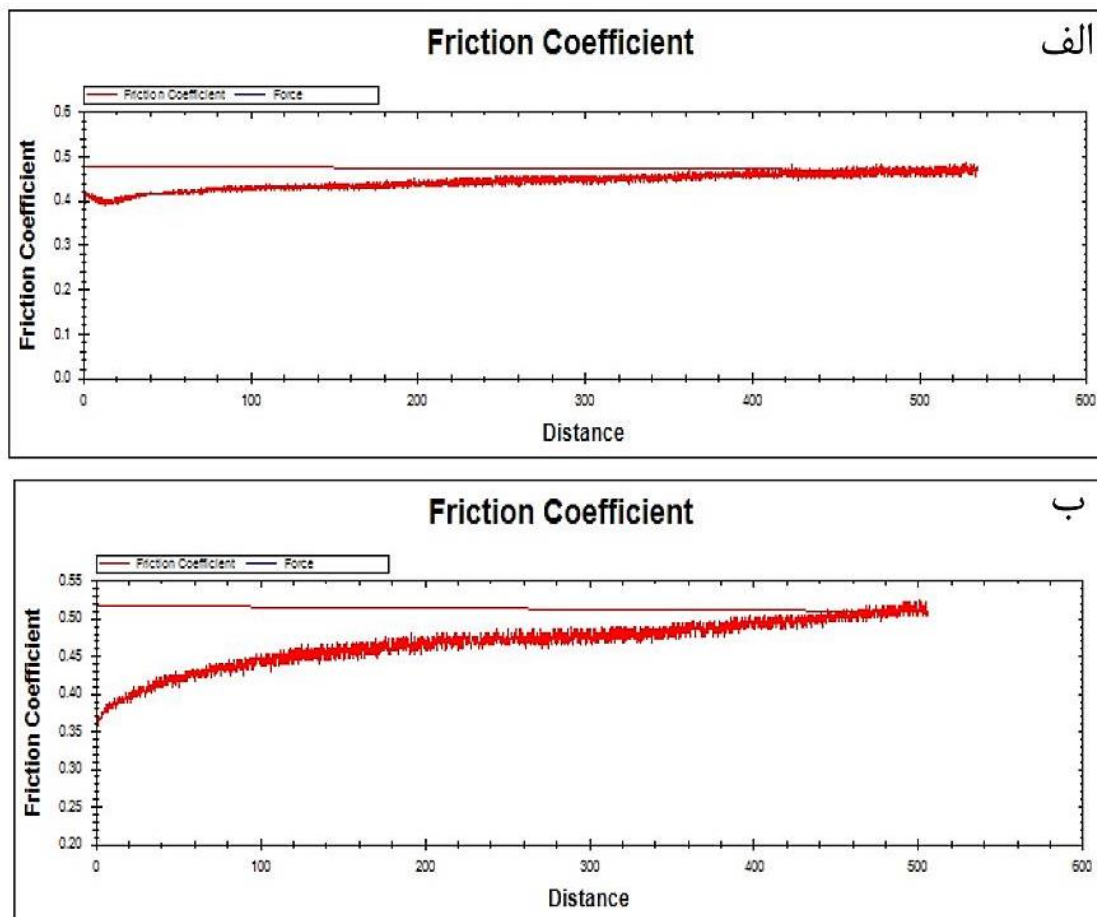


ادامه شکل ۱۱- ب- نقشه پراکندگی پرتو ایکس از توزیع عناصر نمونه MCMB-Cf/SiC تفجوشی شده به روش SPS با یک درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی.

۳-۵- بررسی خواص تریبولوژیکی نمونه‌های تفجوشی شده به روش SPS

خصوصیات تریبولوژیکی کامپوزیت‌های MCMB-Cf/SiC حاوی ۱ و ۰/۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، تولیدشده به روش SPS در دمای اتاق، به روش پین روی دیسک مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۱۲-الف و ب)، نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش برای نمونه‌های با

۱ و ۰/۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی را نشان می‌دهند. طبق نتایج به دست آمده، ضریب اصطکاک نمونه‌های با ۱ و ۰/۱ درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی به ترتیب برابر ۰/۵۴ و ۰/۴۸ بود؛ بنابراین، با افزایش مقدار ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در کامپوزیت، ضریب اصطکاک کاهش یافته است که دلیل این مسئله می‌تواند اثر روانکاری ذرات مزوفاز کربنی باشد. زیرا ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در دمای بالا حین فرآیند تفجوشی



شکل ۱۲- منحنی ضریب اصطکاک بر حسب مسافت سایش برای نمونه MCMB-C1/SiC تف‌جوشی شده به روش SPS: (الف) با ۱ درصد وزنی، (ب) با ۱ درصد وزنی MCMB.

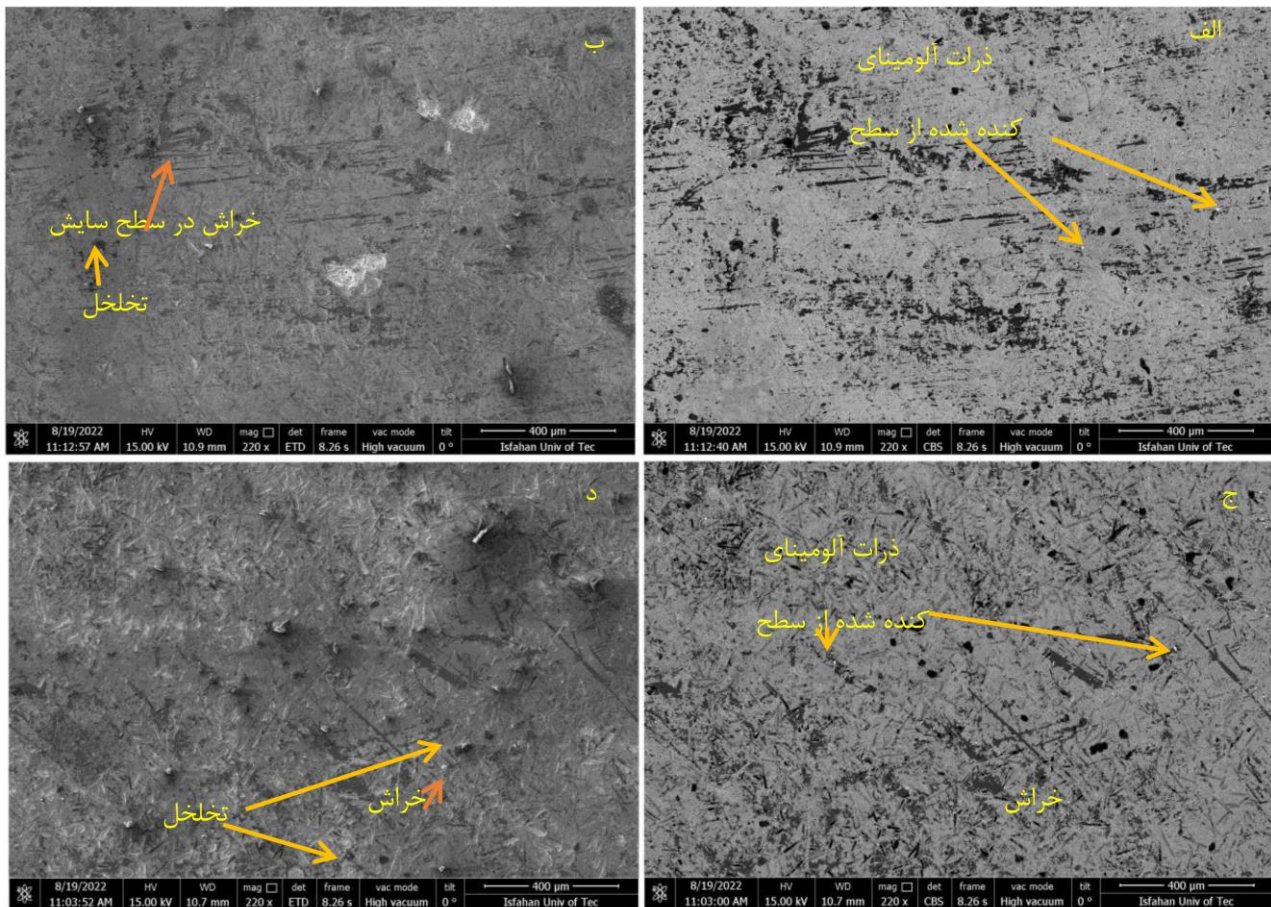
وارد نمونه شده است.

با توجه به مشاهده مقداری خراشیدگی، شخم‌زدن و مقداری کندگی ناشی از کنده‌شدن ذرات از سطح دیسک و مشاهده نقاط سفیدرنگ ناشی از کمک‌تف‌جوش آلومینا یا کنده‌شدن ذرات آلومینای پین روی سطح دیسک مکانیزم‌های سایش زیر پیشنهاد می‌شود:

سایش خراشان^{۱۴}: در این نوع سایش، ذرات سخت، در این مورد ذرات آلومینا یا ذرات سخت SiC که از دیسک کنده شده‌اند، به‌عنوان ذرات ساینده عمل می‌کنند. ذرات آلومینا که از پین کنده شده‌اند یا ذرات SiC کنده‌شده از دیسک، در بین سطوح تماس گیرافتاده و با حرکت نسبی بین سطوح، باعث خراشیدن، شیاردارکردن و برداشتن مواد از سطح دیسک

گرافیتی شده‌اند (شکل ۷). در بین دو نمونه SPS شده، نمونه حاوی یک درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، نزدیک‌ترین ضریب اصطکاک را به ضریب اصطکاک ترمزهای هوایی دارد (۲، ۶ و ۷).

شکل (۱۳- الف و ب)، تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح سایش نمونه‌های تف‌جوشی شده به روش SPS با ۱ و ۰/۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی را نشان می‌دهد. تعدادی ذرات سفیدرنگ در این تصاویر دیده می‌شود که مربوط به ذرات اتصال یافته بین آلومینا می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که به دلیل سختی بالای نمونه‌ها، سطح پین آلومینا با سختی ۱۸/۵ GPa حین آزمون سایش، توسط نمونه ساییده شده و تعدادی از ذرات آلومینا از سطح کنده شده و



شکل ۱۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی در مد الکترون ثانویه و برگشتی از سطح سایش نمونه‌های MCMB-Cr/SiC تفجوشی شده به روش SPS: الف و ب) با ۱ درصد و ج و د) با ۱ درصد وزنی MCMB.

و ذرات سایشی شود.

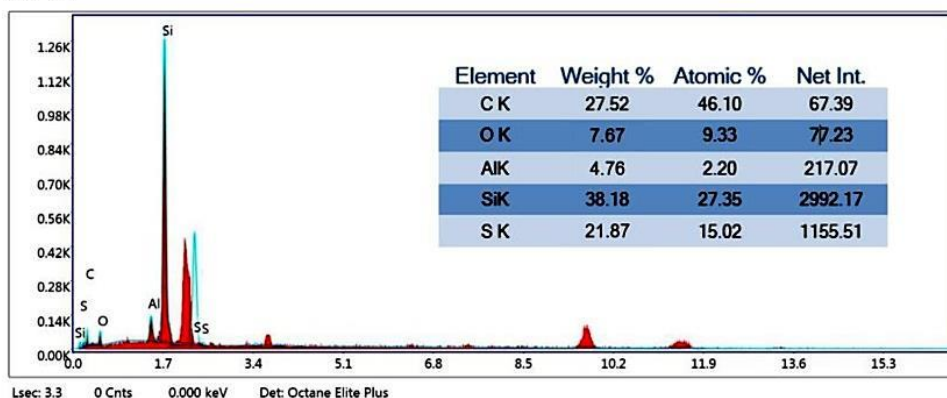
سایش ناشی از ذرات کنده شده: ذرات آلومینای کنده شده از پین یا ذرات SiC و الیاف کربن کنده شده از دیسک در ناحیه سایش باقی می‌مانند. این ذرات علاوه بر اینکه می‌توانند در فرایند سایش خراشان عمل کنند، می‌توانند به عنوان مواد روان کننده و یا حتی ساینده‌های سه‌بدنه عمل کنند. در تصویر FESEM (شکل ۱۳- الف و ج)، وجود ذرات ریز روی سطح سایش و نقاط روشن ناشی از ذرات آلومینا، همچنین حفره‌ها و خراشیدگی‌های ریزی که ناشی از حرکت و ساییدن این ذرات ریز هستند.

بر اساس مشاهدات در تصویر FESEM (شکل ۱۳)، به نظر می‌رسد مکانیزم‌های اصلی سایش ترکیبی از سایش خراشان

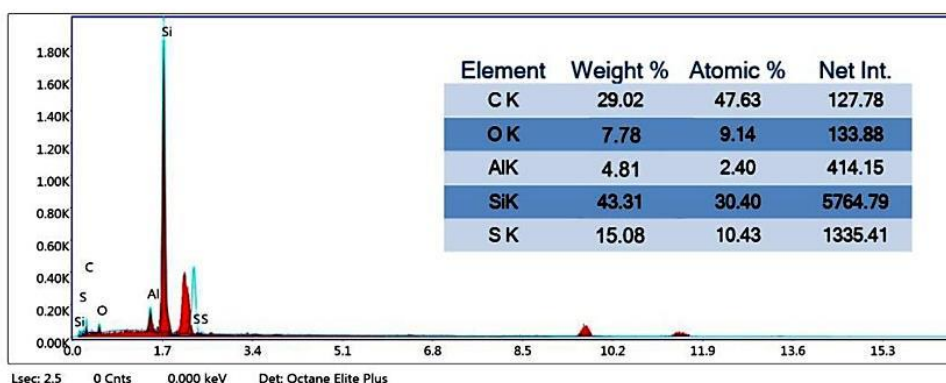
می‌شوند. در تصویر FESEM (شکل ۱۳)، خراشیدگی‌های عمیق و خطوط شخم‌زنی^{۱۵} که در سطح دیسک مشاهده می‌شود، می‌تواند ناشی از سایش خراشان باشد. این خراشیدگی‌ها بسته به زاویه حرکت پین، می‌توانند الگوی خاصی را نشان دهند.

سایش اکسیداتیو: در حین سایش، اصطکاک بین سطوح باعث افزایش دما می‌شود. این افزایش دما می‌تواند باعث اکسید شدن سطح دیسک کامپوزیتی و پین آلومینا شود. لایه اکسید شده معمولاً شکننده است و به راحتی کنده می‌شود که منجر به افزایش سایش می‌گردد. در تصویر FESEM لایه‌های اکسیدی روی سطح سایش دیده می‌شود (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). اکسید شدن در سطوح میکرو می‌تواند باعث تغییر در رنگ سطح

CPS



الف



ب

Energy (KeV)

شکل ۱۴- نتایج آزمون طیف‌سنجی تفکیک انرژی از نقاط سفیدرنگ سطح سایش نمونه‌های MCMB-C/SiC تف‌جوشی شده به‌روش SPS با دو درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی: الف) با ۱٪ درصد MCMB و ب) با ۱ درصد MCMB.

است، شکل‌های ۱۰ و ۱۴)، می‌توان نتیجه گرفت که حین آزمون سایش تعدادی از ذرات آلومینا از پین کنده شده و وارد سطح نمونه شده است.

و اکسیداتیو باشد. ذرات کنده‌شده از سطح پین و دیسک، به‌عنوان ذرات ساییده عمل کرده و در فرایند سایش خراشان نقش دارند.

۳-۶- بررسی میکروسختی و چقرمگی شکست نمونه‌های تف‌جوشی شده به‌روش SPS

آزمون سختی‌سنجی ویکرز با بار ۳ کیلوگرم و مدت زمان ۲ ثانیه، برای هر بارگذاری انجام شد. مقادیر سختی ویکرز برای نمونه‌های تف‌جوشی شده به‌روش SPS با ۱٪ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به‌ترتیب برابر ۱۵۱۰ ویکرز با قطر مؤثر ۶۰/۷ میکرومتر و ۱۰۹۵ ویکرز با قطر مؤثر ۵۸/۳

شکل (۱۴- الف و ب)، نتایج آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس از نقاط سفیدرنگ موجود در سطح سایش نمونه‌های تف‌جوشی شده به‌روش SPS با ۱٪ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به‌دست آمده، به دلیل اینکه مقدار عناصر اکسیژن و آلومینیوم در نقاط سفیدرنگ، نسبت به قسمت‌های ساییده نشده نمونه‌ها افزایش یافته است (در مقایسه با نتایج آزمون طیف‌سنجی تفکیک انرژی پرتو ایکس قسمت‌های ساییده‌نشده نمونه‌ها که قبلاً گرفته شده

۰/۱ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به ترتیب برابر ۶۶ و ۸۰ میکرومتر به دست آمد (شکل ۱۵). از آنجایی که مقدار چقرمگی شکست برای ترمزهای هوایی باید در حدود $4-6 \text{ MPa.m}^{1/2}$ باشد (۲، ۶ و ۷)؛ بنابراین، طبق نتایج به دست آمده، چقرمگی شکست نمونه تف‌جوشی شده با زمینه نانوذرات کاربرد سیلیسیم حاوی ۰/۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در محدوده چقرمگی شکست ترمزهای هوایی می‌باشد. دلیل بیشتر بودن چقرمگی شکست نمونه حاوی ۰/۱ درصد مزوفاز کربنی می‌تواند مربوط با چگالی بیشتر این نمونه یا تخلخل کمتر آن باشد. درصد تخلخل ظاهری در نمونه حاوی ۰/۱ و ۱ درصد وزنی مزوفاز کربنی، به ترتیب ۶/۹ و ۱۰/۲ درصد است. این تخلخل‌ها به خوبی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

۳-۷- بررسی استحکام خمشی نمونه‌های تف‌جوشی شده به روش SPS

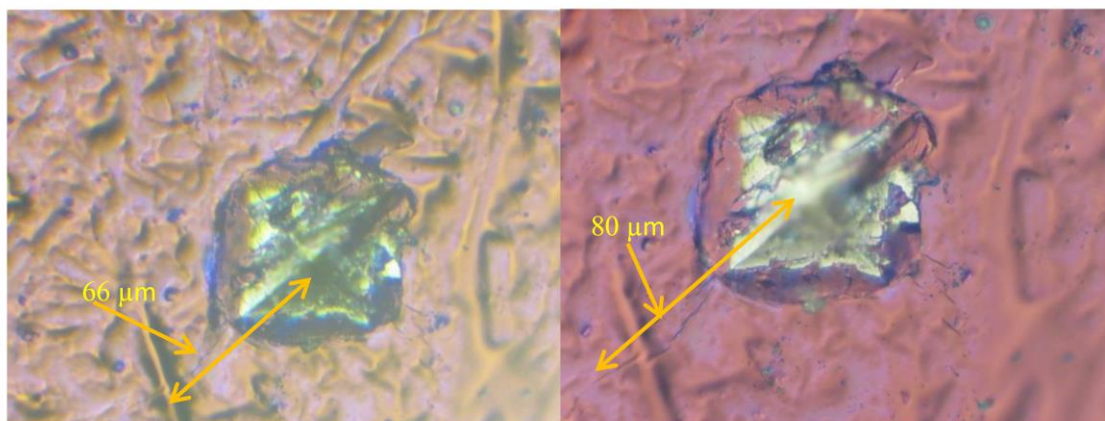
آزمون خمش سه نقطه‌ای، به منظور بررسی استحکام خمشی نمونه‌های تف‌جوشی شده به روش SPS با ۰/۱ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. شکل (۱۶- الف و ب)، نمودارهای نیرو بر حسب میزان خمش حاصل از آزمون خمش سه نقطه نمونه‌های تف‌جوشی شده به روش SPS با ۰/۱ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده، هر دو نمونه در ناحیه الاستیک دچار شکست شده‌اند که دلیل این مسئله سختی بالای نمونه‌ها و ترد بودن آن‌ها می‌باشد. همچنین میزان استحکام خمشی برای نمونه با ۰/۱ درصد، MCMB برابر ۱۳۸/۷ مگاپاسکال و برای نمونه با ۱ درصد MCMB، برابر ۷۲/۹ مگاپاسکال به دست آمد که نشان می‌دهد با افزایش مقدار ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در کامپوزیت، میزان استحکام خمشی کاهش یافته است. کاهش استحکام خمشی با افزایش مقدار MCMB در کامپوزیت، احتمالاً ناشی از افزایش تخلخل و انقباض حجمی ناشی از استحاله تنا به آلفا آلومینا باشد.

میکرومتر به دست آمد. طبق نتایج به دست آمده، با افزایش مقدار ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در کامپوزیت، میزان سختی کاهش یافته است. این مسئله می‌تواند به این دلیل باشد که چون MCMB یک فاز نرم می‌باشد، با افزایش مقدار آن در کامپوزیت باعث کاهش میزان سختی شده است. سختی به دست آمده در این پژوهش از پژوهش ذهبی و همکاران (۲۸۵۰-۱۶۵۰ ویکرز) (۶) در زمینه کامپوزیت Cf/SiC، به دلیل عدم استفاده از ذرات نرم MCMB کمتر است.

در اینجا، نمونه‌ای که سختی بالاتری دارد (۱۵۱۰ ویکرز)، قطر مؤثر بزرگ‌تر دارد (۶۰/۷ میکرومتر) که ظاهراً برخلاف انتظار، بر اساس اثر اندازه فرورفتگی^{۱۶} است. مطابق اثر اندازه فرورفتگی در آزمون سختی سنجی میکرو، سختی اندازه‌گیری شده اغلب به اندازه فرورفتگی (یا قطر مؤثر آن) بستگی دارد. معمولاً با کاهش اندازه فرورفتگی، سختی اندازه‌گیری شده افزایش می‌یابد. این پدیده بیشتر در مواد با ساختار غیرهمگن یا ساختار دانه‌بندی ریز (مثل مواد نانو ساختار یا موادی که دارای ریزدانه‌های مزوفاز کربنی هستند) مشاهده می‌شود. اما این اختلاف مشاهده شده می‌تواند به دلایل زیر باشد:

تفاوت در ریزساختار: تفاوت درصد ریزدانه‌های مزوفاز کربنی بر ریزساختار کامپوزیت تأثیر گذاشته است. نمونه با ۰/۱ درصد ریزدانه، ساختار یکنواخت‌تر و مقاوم‌تری داشته است؛ بنابراین، سختی بالاتری نشان داده و در نتیجه در یک بارگذاری ثابت قطر فرورفتگی بزرگ‌تری ایجاد شد. در حالی که در نمونه یک درصد مزوفاز کربنی ایجاد نواقص و تخلخل، به خصوص در مرز مشترک الیاف کربن و زمینه سیلیکون کاربرد شده‌اند و در نتیجه قطر فرورفتگی کوچک‌تر شده است.

مقادیر چقرمگی شکست نیز برای نمونه‌های تف‌جوشی شده با زمینه نانوذرات کاربرد سیلیسیم حاوی ۰/۱ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به ترتیب برابر $5/96 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و $3/47 \text{ MPa.m}^{1/2}$ به دست آمد. مقادیر طول متوسط ترک شعاعی (c) و شعاع ناحیه اثر فرورونده ویکرز (a) برای نمونه‌های با



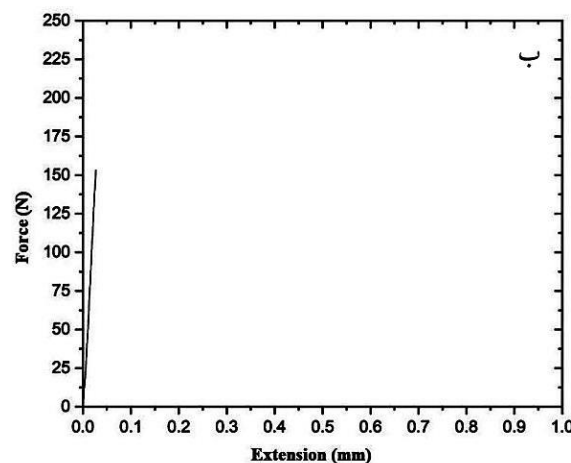
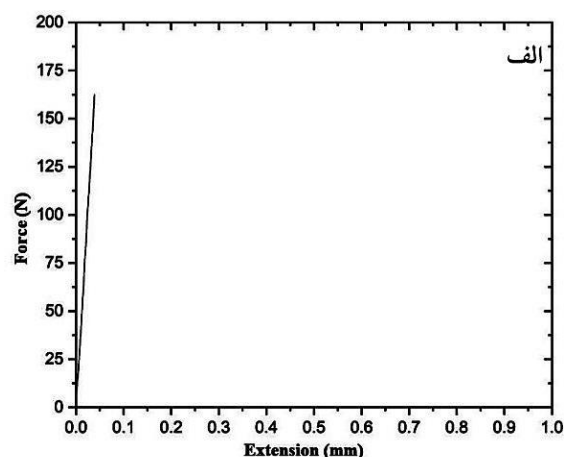
شکل ۱۵- تصویر میکروسکوپی نوری از طول ترک حاصل از فرورونده ویکرز نمونه‌های MCMB-Cf/SiC تفجوشی شده به روش SPS با ریزدانه‌های مزوفاز کربنی: الف) با ۱ درصد MCMB و ب) با ۱ درصد MCMB.

استحکام خمشی و سختی به دست آمده در این پژوهش از گزارش ذهبی و همکاران (۷) که به مقدار ۴۷۹ و ۲۱۰۹- MPa ویکرز است به مراتب کمتر است. دلیل این موضوع چگالش ۹۹/۹ درصد بدنه به دست آمده با استفاده از کمک تف-جوش آلومیناسیلیکات به جای آلومینا است. آلومیناسیلیکات دمای ذوب کمتری نسبت به آلومینا دارد و باعث تشکیل فاز مایع و تسریع سرعت نفوذ ذرات در حین تفجوشی Cf/SiC می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تأثیر افزودن ریزدانه‌های مزوفاز کربنی بر ریزساختار و ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های MCMB-Cf/SiC تهیه شده به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای پرداخته شد. برای این منظور پودرهای کامپوزیتی تولید شده با ۱ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، با استفاده از روش SPS تفجوشی شدند. بعد از بررسی نمونه‌ها، مشخص شد که نمونه حاوی یک درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، نزدیک‌ترین خواص را به خواص دیسک‌های ترمز هوایی دارد.

چگالی نمونه‌های تفجوشی شده به روش SPS حاوی ۱ درصد و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به ترتیب ۹۳/۱ درصد چگالی تئوری و ۸۹/۹ درصد چگالی تئوری به دست آمد.



شکل ۱۶- نتایج آزمون استحکام خمشی سه نقطه نمونه‌های MCMB-Cf/SiC تفجوشی شده به روش SPS با زمینه نانوذرات کاربید سیلیسیم با درصد‌های ریزدانه‌های مزوفاز کربنی: الف) با ۱ درصد MCMB و ب) با ۱ درصد MCMB.

نمونه دارای ۱/۰ درصد وزنی MCMB در محدوده چقرمگی شکست ترمزهای هوایی ($4-6 \text{ MPa.m}^{1/2}$) قرار داشت.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از تامین مالی مجتمع مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر بابت تامین مالی هزینه‌های انجام این پژوهش قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان اذعان دارند هیچ تضاد منافی نسبت به شخص حقیقی یا حقوقی (شرکت یا سازمانی) برای این پژوهش وجود ندارد.

سهم نویسندگان

علیرضا یوسفی: نوشتن نسخه اولیه مقاله، جمع‌آوری داده‌ها، اعتبارسنجی نتایج. **محسن صادقی:** نویسنده مسئول، تفسیر نتایج. **مظاهر رضایی:** راهنمایی پروژه، طراحی و ایده پردازی مطالعه، تفسیر داده‌ها. **حسین جمالی:** راهنمایی پروژه. **محمد رضا زاده:** تامین منابع، تفسیر داده‌ها. **محمد رضا لقمان استرکی:** راهنمایی پروژه، طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، تفسیر داده‌ها.

و نشان داد که با افزایش میزان ریزدانه‌های مزوفاز کربنی در کامپوزیت، چگالی نیز به میزان ۳/۲ درصد کاهش یافته است. استحاله کامل فازی کمک‌تفجوش آلومینا از فاز تتا به آلفا، در نمونه حاوی یک درصد وزنی مزوفاز کربنی است که همراه با ۸ تا ۱۵ درصد کاهش حجم و ایجاد تخلخل بیشتر در نمونه حاوی MCMB بیشتر، شده است.

میزان ضریب اصطکاک برای دو نمونه تفجوشی شده به‌روش SPS با ۱/۰ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به‌ترتیب برابر ۵۴/۰ و ۴۸/۰ به‌دست آمد که طبق این نتایج با افزایش میزان ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، ضریب اصطکاک کاهش یافته است. نمونه دارای یک درصد وزنی MCMB، نزدیک‌ترین ضریب اصطکاک را به ضریب اصطکاک مورد نیاز ترمزهای هوایی (۴/۰) داشت.

سختی نمونه‌های تفجوشی شده به‌روش SPS با ۱/۰ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به‌ترتیب برابر ۱۵۱۰ و ۱۰۹۵ ویکرز به‌دست آمد و نشان داد که با افزایش میزان فاز نرم MCMB، سختی نمونه‌ها کاهش یافته است.

چقرمگی شکست نمونه‌های تفجوشی شده به‌روش SPS با ۱/۰ و ۱ درصد وزنی ریزدانه‌های مزوفاز کربنی، به‌ترتیب برابر $5/96 \text{ MPa.m}^{1/2}$ و $3/47 \text{ MPa.m}^{1/2}$ به‌دست آمد که نشان داد با افزایش میزان MCMB، چقرمگی شکست به دلیل تخلخل ظاهری بیشتر این نمونه کاهش یافته است. چقرمگی شکست

واژه‌نامه

1. chemical vapor infiltration (CVI)
2. liquid silicone infiltration (LSI)
3. liquid polymer infiltration (LPI)
4. spark plasma sintering (SPS)
5. mesocarbon microbeads (MCMB)
6. Isopropyl Alcohol (IPA)
7. X-ray diffraction (XRD)
8. scanning electron microscope (SEM)
9. field emission scanning electron microscope (FESEM)
10. energy dispersive spectroscopy (EDS)
11. EDS mapping
12. halo
13. amorphous
14. abrasive wear
15. grooves
16. indentation size effect (ISE)

مراجع

1. Krishna R, Wilson P, Williams MA, Srirangam P, Udayakumar A, Mitra R. Effect of CVI-induced porosity on elastic properties and mechanical behaviour of 2.5 D and 3D Cf/SiC composites with multilayered

- interphase. *J Eur Ceram.* 2024;44(8):4930-48. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.02.039>
- Ghasemi A, Ramazani M, Bakhshi SR, Al-Khafaji AH, Zahabi S, Loghman Estarki MR, Zamani A. The effect of carbon fiber length on the microstructure, selected mechanical, wear, and thermal conductivity of C f/SiC composite fabricated via spark plasma sintering (SPS) method. *J Korean Ceram Soc.* 2023;60(4):732-45. <https://doi.org/10.1007/s43207-023-00300-w>
 - Moslemi M, Razavi M, Zakeri M. Effect of the carbon fiber volume fraction on the mechanical properties of SiC matrix composites prepared by spark plasma sintering. *MRS Adv.* 2024;8:1-5. <https://doi.org/10.1557/s43580-024-00955-5>
 - Li Z, Xiao P, Xiong X, Huang B. Preparation and tribological properties of C fibre reinforced C/SiC dual matrix composites fabrication by liquid silicon infiltration. *Solid State Sci.* 2013;(16):6-12. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2012.10.007>
 - Shivam A, Sarkar S, Das M, Dixit AR. Tribo-mechanical characterization of spark plasma sintered chopped carbon fiber reinforced silicon carbide composites. *Ceram Int.* 2016;(42):18283-18288. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.155>
 - Zahabi S, Sharifi EM, Dehnavi MR, Naderi M, Loghman-Estarki MR. Investigation of density, phase, fracture toughness, thermal conductivity, and friction coefficient of Cf/SiC composite produced by the spark plasma sintering method. *Ceram Int.* 2021;47(19):27553-64. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.179>
 - Zahabi S, Arjmand H, Ramazani M, Al-Bahrani M, Naderi M, Tavooosi M, Gordani G, Estarki MR. The effect of alumina-based sintering aid on the microstructure, selected mechanical properties, and coefficient of friction of Cf/SiC composite prepared via spark plasma sintering (SPS) method. *Ceram Int.* 2023;49(10):15253-65. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.108>
 - Zhang X, Zhang X, Liu D, Wang L, Wen G, Wang Y, Huang X. Advances in Carbon Microsphere-Based Nanomaterials for Efficient Electromagnetic Wave Absorption. *Langmuir* 2024;40(36):18857-81. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02829>
 - Dong SL, Yang JX, Chang SK, Shi K, Liu Y, Zou JL, Li J. An innovative and efficient method for the preparation of mesocarbon microbeads and their use in the electrodes of lithium ion batteries and electric double layer capacitors. *New Carbon Mater.* 2023;38(1):173-85. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(22\)60606-1](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(22)60606-1)
 - Hu HL, Ko TH, Kuo WS, Chen ST. Influence of adding Mesocarbon Microbeads into C/C composites on microstructure and properties during carbonization. *J Appl Polym Sci.* 2006;(102):3102-3110. <https://doi.org/10.1002/app.23745>
 - Wang X, Yao X, Zhang H, Liu X, Huang Z. Microstructure and tribological performance of mesocarbon microbead-silicon carbide composites. *Mater.* 2019;12(19):3127. <https://doi.org/10.3390/ma12193127>
 - Yousefi AR, Sobhani M, Torkian S, Jamali H, Sheikh H, Loghman Estraki MR. Synthesis of Meso Carbon Micro Beads from Mesophase Pitch by Suspension Method. *J Adv Mater Eng (Esteghlal)* 2023; 42(3):73-92. <https://doi.org/10.47176/jame.42.3.1028>
 - Sobhani M, Loghman Estraki MR, Mansouri H, Naderi M, Mohammad Sharifi E, Nasr Esfahani A. Synthesis of Mesophase Carbon Microbeads from Soft Bitumen and Coal Tar by Liquid Phase Carbonization Method. *J Adv Mater Eng (Esteghlal)* 2023;41(4):75-90. <https://doi.org/10.47176/jame.41.4.24501>
 - Zinatloo-Ajabshir S, Salavati-Niasari M. Preparation of magnetically retrievable CoFe₂O₄@ SiO₂@ Dy₂Ce₂O₇ nanocomposites as novel photocatalyst for highly efficient degradation of organic contaminants. *Compos B Eng.* 2019;174:106930. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106930>