

مقاله پژوهشی

## بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانو کامپوزیت‌های آلومینیوم- کاربید وانادیم تهیه شده توسط سینتر مایکروویو و پلاسمای جرقه‌ای

احسان غسالی\* و امیرحسین مرزبان پور

آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹

### چکیده

در این پژوهش، کامپوزیت آلومینیوم-کاربید وانادیم به روش متالورژی پودر و سینتر پلاسمای جرقه‌ای، کوره معمولی و حرارت‌دهی مایکروویو تهیه و تاثیر این سه نوع مختلف حرارت‌دهی بر ریز ساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده بررسی گردید. ۲۰ درصد وزنی از پودر کاربید وانادیم به همراه آلومینیوم در محیط الکل توسط آسیاب پر انرژی مخلوط و سپس در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  در کوره معمولی و مایکروویو سینتر شدند. فرآیند سینتر پلاسمای جرقه‌ای نیز در دمای  $450^{\circ}\text{C}$ ، به ترتیب، با فشار اولیه و نهایی ۱۰ و ۳۰ مگاپاسکال انجام شد. الگوی پراش پرتو ایکس تهیه شده از کامپوزیت سینتر شده در کوره مایکروویو تشکیل فاز اینترمتالیک آلومیناید وانادیم را در کنار فازهای آلومینیوم و کاربید وانادیم نشان داد. در صورتی که الگوهای پراش در نمونه‌های تهیه شده به دو روش حرارت‌دهی معمولی و پلاسمای جرقه‌ای فقط حضور فازهای بلوری آلومینیوم و کاربید وانادیم را نمایش دادند. بررسی‌های ریزساختار نمونه‌های تهیه شده حاکی از پدیده آگلومره شدن برای هر دو روش سینتر معمولی و پلاسمای جرقه‌ای بود اما در نمونه تهیه شده توسط سینتر مایکروویو، توزیع مناسبی از فاز آلومیناید وانادیم در کنار کاربید وانادیم در زمینه آلومینیوم مشاهده گردید. بیشترین میزان سختی مرتبط با نمونه تهیه شده توسط سینتر پلاسمای جرقه‌ای به میزان  $267 \pm 11$  ویکرز (در نیروی اعمالی ۱ kg) محاسبه شد و بیشینه مقدار استحکام خمشی مرتبط با این نمونه و به میزان  $282 \pm 8$  مگاپاسکال بود.

واژه‌های کلیدی: آلومینیوم، اکسید وانادیم، کامپوزیت، سینتر پلاسمای جرقه‌ای.

### ۱- مقدمه

در صنایع پیشرفته همچون خودروسازی و هوافضا دارند. بهره‌گیری از یک ذره تقویت کننده سرامیکی در کنار زمینه آلومینیوم سبب ایجاد استحکام بسیار بالا به همراه وزن پایین محصول به دلیل چگالی پایین آلومینیوم می‌گردد [۱-۴].

امروزه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم به دلیل ارائه خواص مطلوب بخصوص استحکام ویژه بالا دارای جایگاه ویژه‌ای

\* عهده‌دار مکاتبات: احسان غسالی

نشانی: آموزشکده فنی و حرفه‌ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران

تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، پست الکترونیکی: ehsan\_ghasali@yahoo.com

مناسب تر فاز تقویت کننده و محصولات واکنش کمتر نسبت روش های ریخته گری می باشد. هر چند که در این روش عمده ترین مشکل رسیدن به چگالی نسبی بالا و به نوعی حذف تخلخل ها است [۱۸].

یکی از ارکان مهم در فرآیند متالورژی پودر مرحله پخت و سینتر می باشد که بر این اساس روش های مختلفی همچون سینتر مرسوم، مایکروویو، لیزر، ایزواستاتیک گرم، پلاسمای جرقه ای و ... ابداع شده و در سینتر کامپوزیت زمینه آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفته است. به نحوی که روش سینتر مایکروویو با نرخ گرمایش بسیار بالا مستعد ایجاد واکنش های پیچیده بوده و روش پلاسمای جرقه ای با خواص منحصربفرد خود همچون گرمادهی ژول، شرایط پلاسمای اعمال فشار منجر به تهیه قطعات با بهینه چگالش می گردد. سینتر توسط روش پلاسمای جرقه ای، علاوه بر مزایای ذکر شد، در خصوص مواد رسانا (همچون فلزات) سبب ایجاد میکرو جرقه ها در بین ذرات پودری می گردد که این امر به دلیل ایجاد دماهای موضعی بسیار بالا در فصل مشترک ذرات فرآیند سینتر را بوسیله ذوب سطحی تسریع می نماید [۱۹، ۲۰]. بر طبق دانش نویسندگان تاکنون تحقیقی بر روی بررسی تاثیر فرآیند سینتر بر ریزساختار، فاز های تشکیل شده و خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم-کاربید وانادیم صورت نگرفته است. لذا در این پژوهش، سعی شده است تاثیر نوع حرارت دهی مایکروویو بر واکنش تشکیل فاز بین فلزی آلومیناید وانادیوم با حجم بالای واکنش مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

## ۲- فعالیت های تجربی

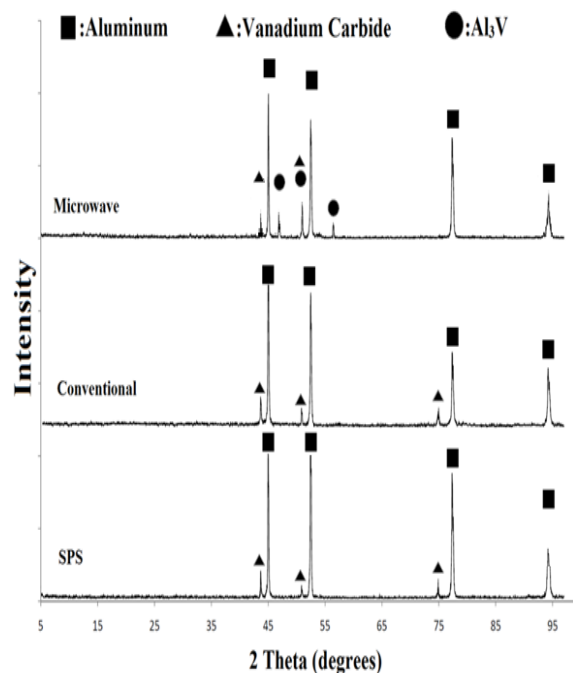
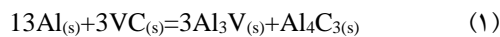
در این پژوهش، پودر آلومینیوم ۱۰۵۶ (Merck-1056) با متوسط اندازه دانه ۴۵ میکرومتر و کاربید وانادیم (خلوص ۹۹ درصد و متوسط اندازه ذرات ۱۰۰ nm) به عنوان مواد اولیه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. پودرهای آلومینیوم و کاربید وانادیم با نسبت ۲۰ درصد وزنی توزین شده و توسط دستگاه اسپکس (Spex-Mixer Mill 8000D) در

یکی از پارامترهای موثر در انتخاب نوع تقویت کننده در کامپوزیت های زمینه آلومینیوم همخوانی ضریب انبساط حرارتی فاز تقویت کننده و زمینه آلومینیوم می باشد [۵، ۶]. اگرچه عدم نزدیک بودن ضریب انبساط حرارتی سبب ایجاد ترک در حین سرمایش کامپوزیت می گردد. اما تحقیقات ثابت نموده است که بسیاری از ذرات سرامیکی قابلیت استفاده به عنوان فاز تقویت کننده را در کنار زمینه آلومینیوم دارا می باشند. از جمله این ترکیبات سرامیکی سخت به کار برده شده در زمینه آلومینیوم می توان به کاربید تیتانیوم [۷]، کاربید بور [۵]، دی بوراید زیرکونیم [۸]، نیتريد سیلیسیم [۹]، زیرکن [۱۰]، اکسید تیتانیوم [۱۱] و ... اشاره نمود.

کاربید وانادیم یک سرامیک غیر اکسیدی با چگالی نسبتا پایین، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون بالا، سختی و مدول یانگ بسیار بالا می باشد [۱۲]. این ترکیب کاربیدی یکی از گزینه های مناسب برای فاز تقویت کننده در کنار زمینه آلومینیوم محسوب می گردد. در دیاگرام فازی سه تایی آلومینیوم-وانادیم-کربن فاز های دو تایی  $Al_3V$  و  $Al_4C_3$  و همچنین فاز های سه تایی مکس از جمله ترکیبات محتمل برای تشکیل می باشند. یکی از مباحث قابل توجه دیگر در تهیه کامپوزیت های زمینه آلومینیوم، واکنش پذیری بالای این فلز با فاز تقویت کننده می باشد که برخی از محققین محصولات این واکنش را مخرب و برخی دیگر بهبود دهنده خواص نهایی ذکر نموده اند که به نظر می رسد حجم، میزان، شکل و نوع محصول واکنش در این پدیده تعیین کننده می باشد [۱۳-۱۶].

روش های مختلفی جهت تهیه کامپوزیت های زمینه آلومینیوم مورد استفاده قرار می گیرند که از نقطه نظر صنعتی مجموعه روش های ریخته گری به دلیل نقطه ذوب پایین آلومینیوم، یکی از پرکاربردترین آن ها محسوب می گردد. جدا از مزایا و معایب مجموعه روش های ریخته گری، روش متالورژی پودر نیز یکی دیگر از مجموعه روش های تولید این دسته از کامپوزیت ها با مزایایی همچون دانه بندی ریزتر، توزیع

با توجه به شکل ۱، الگوی پراش پرتو ایکس متعلق به نمونه‌های سینتر شده در کوره معمولی و پلاسمای جرقه‌ای، دو فاز آلومینیوم و کاربید وانادیم را به عنوان پیک‌های غالب شناسایی شده نمایش می‌دهد. اما در نمونه سینتر شده در کوره مایکروویو علاوه بر ترکیبات ذکر شده بالا، فاز آلومیناید وانادیم به عنوان محصول واکنش آلومینیوم و کاربید وانادیم مشاهده می‌گردد. با توجه به معادله (۱)، واکنش آلومینیوم و کاربید وانادیوم علاوه بر ایجاد فاز بین فلزی آلومیناید وانادیوم سبب تشکیل فاز کاربید آلومینیوم نیز می‌گردد که در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه مربوطه شناسایی نشد. به نظر می‌رسد دلیل این امر مرتبط با اندازه ذرات تشکیل شده و ضریب جذب و میزان این فاز کاربیدی ( $Al_4C_3$ ) باشد [۲۱].

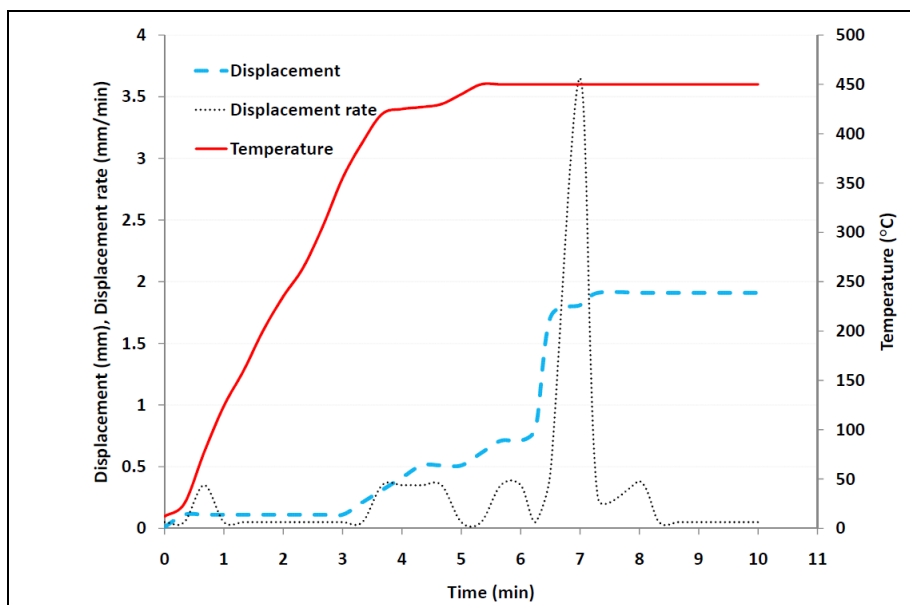


شکل ۱: الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های سینتر شده در کوره معمولی، مایکروویو و پلاسمای جرقه‌ای.

محیط الکل مخلوط شدند. پس از فرآیند مخلوط‌سازی، به منظور خروج الکل در دمای  $70^\circ C$  حرارت‌دهی شده تا مخلوط پودرهای اولیه خشک گردند. پس از اختلاط، پودرهای مخلوط شده به صورت مستقیم وارد قالب گرافیتی به قطر ۳۰ mm و با فشار اولیه ۱۰ مگاپاسکال شدند. فرآیند سینتر در شرایط خلاء (۱۶ پاسکال) و فشار نهایی ۳۰ مگاپاسکال در دمای ۴۵۰ سانتیگراد در کوره پلاسمای جرقه‌ای (SPS-20T-10, China) صورت گرفت. در مورد حرارت‌دهی معمولی و مایکروویو، نمونه‌های خام به شکل مکعب مستطیل با ابعاد  $5 \times 5 \times 25$  توسط پرس تک محور شکل‌دهی شده و فرآیند سینتر در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد در بستر گرافیت برای هر دو روش انجام شد. در حرارت‌دهی معمولی زمان ماندگاری ۱ ساعت در نظر گرفته شد اما برای کوره مایکروویو پس از رسیدن به دمای  $600^\circ C$  فرآیند متوقف گردید. پس از پولیش نمونه‌های سینتر شده توسط کوره پلاسمای جرقه‌ای، جهت انجام تست استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها با ابعاد  $5 \times 5 \times 25$  mm<sup>3</sup> از قرص اولیه سینتر شده برش داده شدند. در پایان چگالی نمونه‌ها از طریق روش ارشمیدس اندازه‌گیری و استحکام خمشی سه نقطه‌ای نمونه‌ها توسط دستگاه Santam-STm20 محاسبه شد. جهت بررسی سختی نمونه‌های تهیه شده از دستگاه تست میکروسختی (MKV-h21) با بار اعمالی ۱ kgf و زمان نگهداری ۱۵ ثانیه و روش ASTM-C1327-08 استفاده شد. از نمونه‌ها آنالیز پراش پرتو ایکس (Philips-pw3710) گرفته شد و همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (MIRA 3 TESCAN, Czech Republic) تهیه گردید.

### ۳- نتایج و بحث

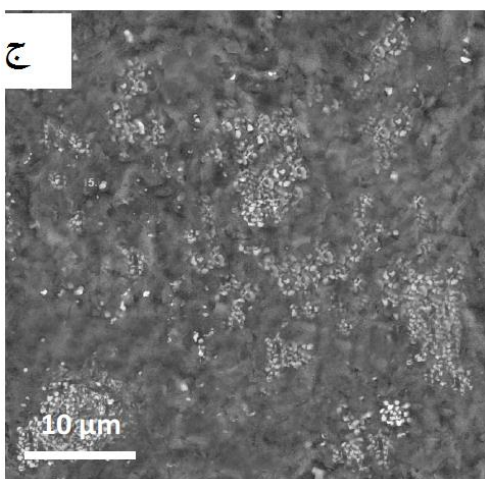
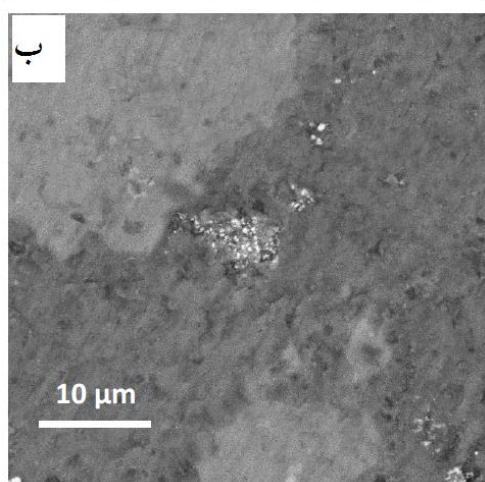
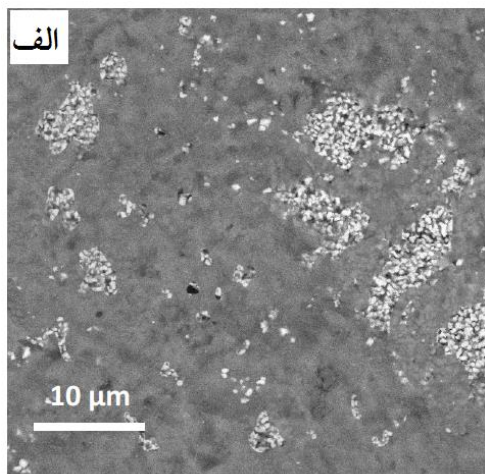
شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های سینتر شده توسط کوره معمولی، مایکروویو و پلاسمای جرقه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۲: نمودار جابجایی/نرخ جابجایی-دما-زمان برای نمونه تهیه شده توسط سینتر پلاسمای جرقه‌ای.

میکروساختار نمونه سینتر شده در کوره معمولی حاوی مقادیری تخلخل در بین ذرات آلومینیوم و همچنین آگلومره از ذرات فاز تقویت کننده می‌باشد. میکروساختار نمونه سینتر شده در کوره مایکروویو همانطور که در توضیحات مرتبط با الگوی پراش پرتو ایکس نیز ذکر شد دارای سه قسمت مختلف می‌باشد. ذرات ریز و روشن که بیانگر فاز کاربید وانادیم بوده و در زمینه آلومینیوم با چسبندگی مناسب حضور دارند. مناطقی با کنتراست خاکستری (تیره‌تر از فاز کاربید وانادیم) که با توجه به دانسیته فازهای موجود در ریزساختار شامل فاز آلومیناید وانادیم بوده و در نهایت فاز تیره رنگ با کمترین میزان دانسیته که مرتبط با زمینه آلومینیوم می‌باشد. شکل ۳ ج ریزساختار نمونه تهیه شده به روش سینتر پلاسمای جرقه‌ای را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۳ ج، ریز ساختار نمونه سینتر شده در کوره پلاسمای جرقه‌ای همچون نمونه سینتر شده در کوره معمولی دارای دو فاز روشن (کاربید وانادیم) و فاز تیره (زمینه آلومینوم) بوده با این تفاوت که نمونه سینتر شده در کوره پلاسمای جرقه‌ای تقریباً عاری از تخلخل بوده و آگلومره‌های

شکل ۲ رفتار سینتر نمونه تهیه شده توسط روش پلاسمای جرقه‌ای را شامل نمودارهای جابجایی/نرخ جابجایی-دما-زمان نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، نمودار دما-زمان-جابجایی در سینتر پلاسمای جرقه‌ای شامل سه منطقه اصلی (به طور تقریبی) می‌باشد که این مناطق با تبدیل جابجایی به نرخ جابجایی در زمان معین مشخص می‌شود. مرحله اول جابجایی (انقباض به میزان کم) مرتبط با خروج گازها و جرقه‌های اولیه در بین ذرات می‌باشد. مرحله بعدی سینتر را می‌توان مرتبط با ذوب موضعی و فعل و انفعالات شیمیایی موجود در کامپوزیت دانست و مرحله پایانی چگالش مرتبط با افزایش فشار از ۱۰ مگاپاسکال به ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین مقایسه میزان انقباض کلی نمونه با مطالعات پیشین بیانگر چگالش نسبتاً بالای نمونه تهیه شده می‌باشد [۲۲]. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان در حالت الکترون برگشتی را برای نمونه‌های سینتر شده در کوره معمولی، مایکروویو و پلاسمای جرقه‌ای نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۳ و بزرگنمایی یکسان تصاویر تهیه شده،



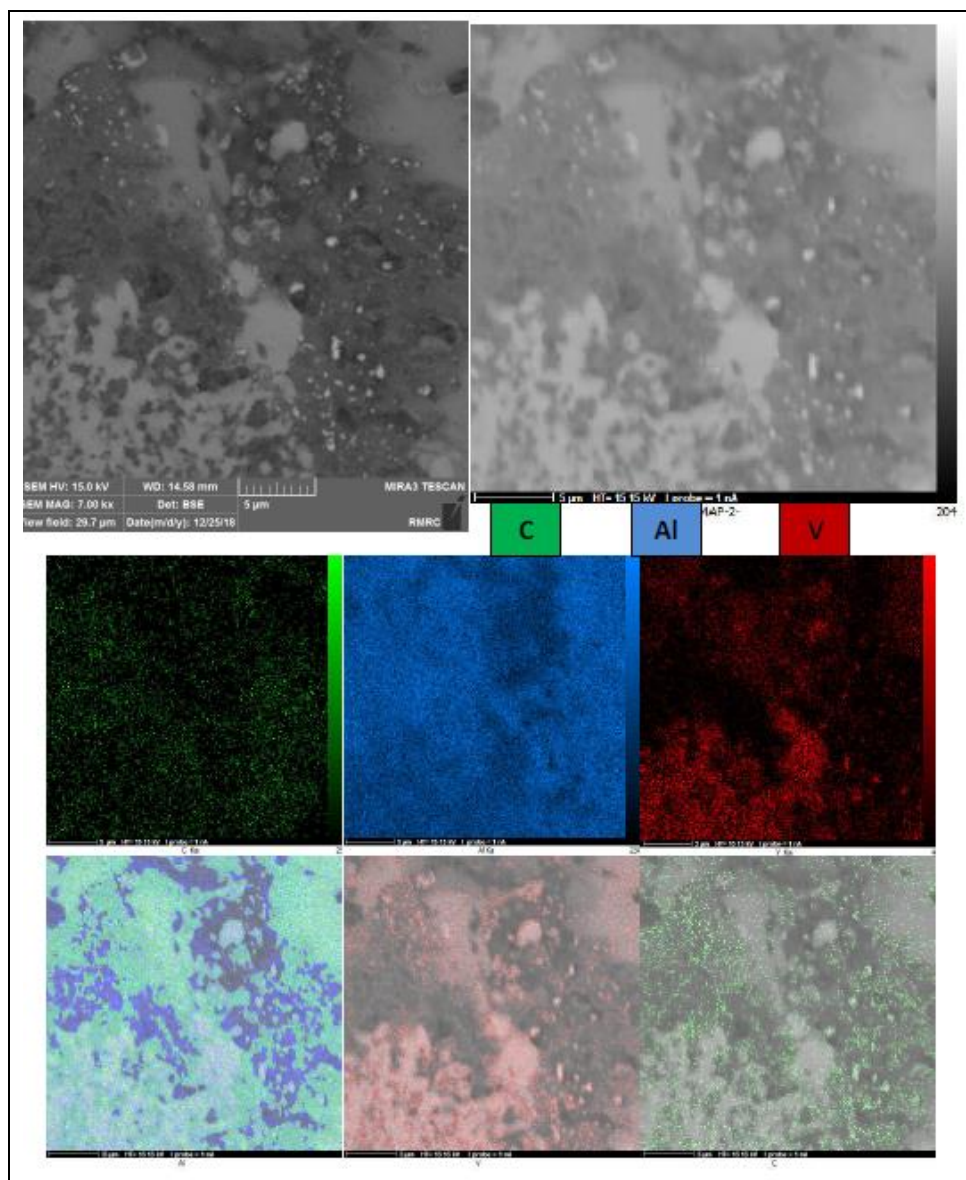
شکل ۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از نمونه سینتر شده در کوره‌های الف) معمولی، ب) مایکروویو و ج) پلاسمای جرقه‌ای.

کمتری نسبت به نمونه سینتر شده در کوره معمولی از خود نشان می‌دهد.

دلیل این امر را می‌توان مرتبط با مزایای منحصربفرد سینتر پلاسمای جرقه‌ای همچون اعمال فشار دانست. چرا که در دمای بالا، اعمال فشار ۳۰ مگاپاسکال سبب تغییر فرم پلاستیک فلز آلومینیوم شده و تخلخل‌های موجود در ساختار به واسطه این فشار از سیستم حذف می‌گردد.

شکل ۴ تصویر ریزساختار و نقشه آنالیز عنصری نمونه سینتر شده در کوره مایکروویو را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۴ مشخص می‌باشد، ریزساختار نمونه سینتر شده، در مناطق روشن بیانگر حضور دو عنصر کربن و وانادیم به عنوان فاز کاربید وانادیم است. در حالی که در مناطق با کنتراست خاکستری دو عنصر آلومینیوم و وانادیم حضور داشته و بیانگر حضور فاز آلومیناید وانادیم می‌باشد. همچنین فاز تیره رنگ زمینه تنها از عنصر آلومینیوم تشکیل شده که زمینه آلومینیومی کامپوزیت را نمایش می‌دهد.

شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار نمونه سینتر شده توسط حرارت دهی مایکروویو را در بزرگنمایی بسیار بالا نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ که از فصل مشترک فاز آلومینیوم و آلومیناید وانادیم با تاکید بر حضور ذرات تقویت کننده تهیه شده است، ذرات روشن با توجه به اندازه آن‌ها بیانگر ذرات تقویت کننده کاربید وانادیم می‌باشند. همچنین در این بزرگنمایی ذرات ریزی با کنتراست تیره‌تر و نزدیک به زمینه آلومینیوم مشاهده می‌گردد که به نظر می‌رسد این فاز ذرات کاربید آلومینیوم بوده که با توجه به دانسته نزدیک به آلومینیوم با کنتراست تیره‌تر در زمینه ایجاد شده‌اند. هر چند که اختلاف ارتفاع در ایجاد اختلاف کنتراست تاثیرگذار می‌باشد اما می‌توان اظهار داشت که ذرات کاربید وانادیم در نتیجه واکنش شماره ۱ قطعاً ایجاد شده است.



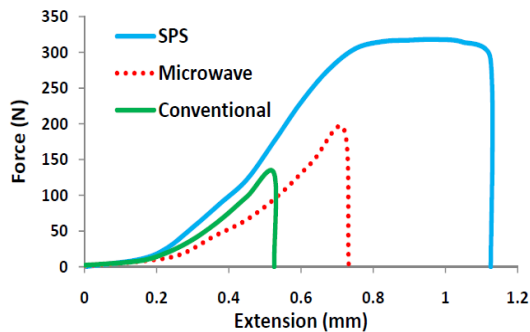
شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از نمونه سینتر شده در کوره مایکروویو به همراه آنالیز نقشه عنصری.

#### جدول ۱

وانادیم سبب ایجاد حرارت موضعی بالا و تسریع در واکنش پیشنهاد شده جهت تشکیل فاز بین فلزی آلومیناید وانادیم شده است. چرا که نسبت به کوره معمولی، دمای یکسان و زمان سینتر بسیار کوتاه‌تر بیانگر توانایی این روش حرارت دهی در جذب انتخابی و تسریع واکنش‌های فصل مشترک می‌باشد. در نتیجه حجم بالای فاز تقویت کننده حرارت دهی موضعی بیشتری در سیستم ایجاد شده و چگالش بالایی را برای کامپوزیت تهیه شده به همراه داشته است.

خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سینتر شده در کوره معمولی، مایکروویو و پلاسما جرقه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱، بیشترین میزان دانسیته نسبی و همچنین استحکام خمشی و سختی برای نمونه سینتر شده توسط روش پلاسما جرقه‌ای محاسبه شد. در مرحله بعدی نمونه سینتر شده توسط روش مایکروویو خواص قابل قبولی برای کامپوزیت تهیه شده ارائه داد. به نظر می‌رسد فرآیند حرارت دهی مایکروویو به واسطه جذب ذرات کاربرد

حرارت دهی به نظر می‌رسد حتی درصدهای بالای فاز تقویت کننده و آگلومره شدن آن‌ها می‌تواند نتایج مطلوبی را نسبت به سایر روش‌های سینتر بدون فشار از خود نشان دهد.



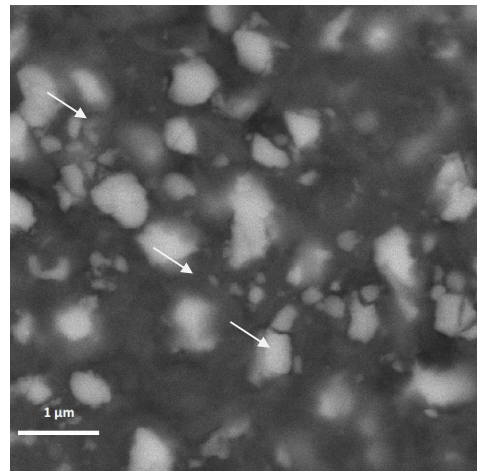
شکل ۶: نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی در حین استحکام خمشی برای نمونه‌های سینتر شده.

لازم بذکر است که خواص بدست آمده از تهیه این نانو کامپوزیت توسط فرآیند سینتر پلاسمای جرقه در مقایسه با مطالعات سایر پژوهشگران در تطابق کامل می‌باشد. همانطور که در قسمت مقدمه این پژوهش ذکر گردید، بر طبق دانش نویسندگان مطالعه مشابهی در زمینه بررسی خواص مکانیکی نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم موجود نمی‌باشد اما مقایسه خواص مکانیکی و فیزیکی بدست آمده در این پژوهش بخصوص توسط روش سینتر پلاسمای جرقه‌ای در اثر افزودن نانوذرات کاربید وانادیم تا حدودی از تقویت کننده‌های مرسوم دیگر همچون اکسید آلومینیوم و کاربید سیلیسیم بهتر می‌باشد [۲۳، ۲۴].

#### ۴- نتیجه گیری

کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیوم-کاربید وانادیم به صورت موفقیت آمیز توسط روش‌های سینتر پلاسمای جرقه‌ای، مایکروویو و معمولی تهیه شد. بررسی الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های تهیه شده تشکیل فاز آلومیناید وانادیم را در روش سینتر مایکروویو در کنار دو فاز اصلی آلومینیوم و کاربید وانادیم نشان داد. در صورتی که در روش سینتر معمولی با دمای یکسان و زمان سینتر بالاتر نسبت به

ضعیف‌ترین نتیجه بررسی خواص نیز مرتبط با نمونه سینتر شده در کوره معمولی می‌باشد که این پدیده دور از انتظار نبود.



شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان از نمونه سینتر شده توسط حرارت دهی مایکروویو در بزرگنمایی بالا.

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تهیه شده شامل استحکام خمشی، سختی و چگالی نسبی.

| نمونه/روش سینتر      | چگالی نسبی* (%) | استحکام خمشی (مگاپاسکال) | سختی (ویکرز) |
|----------------------|-----------------|--------------------------|--------------|
| کوره معمولی          | ۸۸/۹ ± ۰/۳      | ۸۲ ± ۱۱                  | ۱۱ ± ۱۳۱     |
| کوره مایکروویو       | ۹۷/۶ ± ۲/۰      | ۱۸۶ ± ۱۲                 | ۱۰ ± ۲۴۶     |
| کوره پلاسمای جرقه‌ای | ۹۹/۳ ± ۰/۳      | ۲۸۲ ± ۸                  | ۱۱ ± ۲۶۷     |

\* دانسیته نسبی بدون احتساب فازهای جدید در چگالی تئوری محاسبه شده است.

شکل ۶ نمودار تغییرات نیرو بر حسب جابجایی را در حین آزمون استحکام خمشی برای نمونه‌های سینتر شده در کوره معمولی، مایکروویو و پلاسمای جرقه‌ای نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶، بیشینه نیرو و جابجایی شکست مرتبط با نمونه سینتر شده در کوره پلاسمای جرقه‌ای می‌باشد که به نوعی با توجه به مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی به عنوان معیاری از انرژی جذب شده تا مرحله شکست، می‌توان بیشترین تافنس شکست را نیز مرتبط با این نمونه دانست. با توجه به بهره‌گیری روش پلاسمای جرقه‌ای از فشار در حین

- R. Muraliraja, M. Al-Maharbi, V. Murali, M.M. Chandra, *J. Alloys Compd.*, **784**, 2019, 1047.
- [8] E. Ghasali, A. Pakseresht, F. Safari-kooshali, M. Agheli, T. Ebadzadeh, *Mater. Sci. Eng. A*, **627**, 2015, 27.
- [9] M. Wang, D. Wang, T. Kups, P. Schaaf, *Mater. Sci. Eng. A*, **644**, 2015, 275.
- [10] H. Abdizadeh, M. Ashuri, P.T. Moghadam, A. Nouribahadory, H.R. Baharvandi, *Mater. Des.*, **32**, 2011, 4417.
- [11] J. Zhang, S. Yang, Z. Chen, H. Wu, J. Zhao, Z. Jiang, *Composites Part B: Engineering*, **162**, 2019, 445.
- [12] M. Hosseinzadeh, O. Mirzaee, H. Mohammadian-Semnani, *Journal of Alloys and Compounds*, **782**, 2019, 995.
- [13] B. Hallstedt, *Calculation of Phase Diagrams*, **41**, 2013, 156.
- [14] N. Neill, A. Earnshaw, "Chemistry of the Elements" Greenwood, 1984.
- [15] K.V. Slipchenko, *Journal of Superhard Materials*, **40**, 2018, 226.
- [16] W.M. Haynes, "CRC handbook of chemistry and physics", CRC Press, 2014.
- [17] C.S. Jawalkar, A.S. Verma, N.M. Suri, *Materials Today: Proceedings*, **4**, 2017, 2927.
- [18] M.O. Bodunrin, K.K. Alaneme, L.H. Chow, *Journal of materials research and technology*, **4**, 2015, 434.
- [19] N. Chawake, P. Ghosh, L. Raman, A.K. Srivastav, T. Paul, S.P. Harimkar, J. Eckert, R.S. Kottada, *Scripta Materialia*, **161**, 2019, 36.
- [20] O. Guillon, J. Gonzalez Julian, B. Dargatz, T. Kessel, G. Schiering, J. Rathel, M. Herrmann, *Adv. Eng. Mater.*, **16**, 2014, 830.
- [21] T. Agne, Matthias, M.W. Barsoum, *Journal of Alloys and Compounds*, **665**, 2016, 218.
- [22] E. Ghasali, A. Fazili, M. Alizadeh, K. Shirvanimoghaddam, T. Ebadzadeh, *Materials*, **10**, 2017, 1255.
- [23] D.K. Koli, G. Agnihotri, R. Purohit, *Procedia Mater. Sci.*, **6**, 2014, 567.
- [24] H. Nath, *Key Eng. Mater.*, **684**, 2016, 287.

حرارت دهی مایکروویو فازهای شناسایی شده توسط الگوی پراش پرتو ایکس همچون نمونه تهیه شده توسط روش پلاسمای جرقه‌ای تنها دو فاز آلومینیوم و کاربید وانادیم بودند. بررسی نتایج حاصل از محاسبه خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها نشان داد که بیشینه خواص مکانیکی شامل سختی و استحکام خمشی و همچنین دانسیته نسبی مرتبط روش سینتر پلاسمای جرقه‌ای بود که حضور فشار در حین سینتر، سرعت بالای حرارت دهی و ایجاد جرقه در بین ذرات فلزی از عوامل محتمل در این پدیده می‌باشند.

## مراجع

- [1] Z. Zaiemyekheh, G.H. Liaghat, H. Ahmadi, M.K. Khan, O. Razmkhah, *Mater. Sci. Eng. A*, **753**, 2019, 276.
- [2] A. Thirumoorthy, T.V. Arjunan, K.L.S. Kumar, *Materials Today: Proceedings*, **5**, 2018, 1657
- [3] I. Dinaharan, M. Balakrishnan, J.D.R. Selvam, E.T. Akinlabi, *J. Alloys Compd*, **781**, 2019, 270.
- [4] J. Zhang, S. Yang, Z. Chen, H. Wu, J. Zhao, Z. Jiang, *Composites Part B: Engineering*, **162**, 2019, 445.
- [5] E. Ghasali, M. Alizadeh, T. Ebadzadeh, *J. Alloys Compd*, **655**, 2016, 93.
- [6] E. Ghasali, A. Pakseresht, M. Agheli, A. Marzbanpour, T. Ebadzadeh, *Materials Research*, **18**, 2015, 1197.
- [7] P.K. Krishnan, J.V. Christy, R. Arunachalam, A.H.I. Mourad,