

## بررسی تأثیر همزمان ذرات کاربید سیلیسیم نانو و میکرون بر خواص ریزساختاری و رفتار مکانیکی کامپوزیت بر پایه دیورید زیر کونیم تقویت شده با نیتريد آلومینیم

زینب نصیری\*، مهری مشهدی

مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* zeynabnasiri@mut.ac.ir

### چکیده:

در این تحقیق، تفجوشی نانو کامپوزیت  $ZrB_2-SiC$  به روش تفجوشی بدون فشار بررسی گردید. از پودر  $AIN$  در مقیاس میکرون به عنوان تقویت کننده استفاده شد. به منظور بررسی تأثیر حضور همزمان ذرات  $SiC$  نانو و میکرون ابتدا پودر  $ZrB_2$  به همراه درصد‌های مختلف از  $SiC$  نانو و میکرون در آسیاب سیاره‌ای با به مدت ۲ ساعت با سرعت  $2000rpm$  آسیاب شدند. مخلوط حاصل ابتدا توسط پرس تک محوری در دمای  $800^\circ C$  و فشار  $100MPa$  پرس گردید و سپس تحت فرآیند پرس ایزواستاتیک سرد (CIP) قرار گرفته و در دمای  $2150^\circ C$  درجه سانتیگراد در اتمسفر آرگون زینتر شد. به منظور تعیین نسبت بهینه  $SiC$  نانو به میکرون، چگالی نسبی، سختی و چقرمگی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. سپس ذرات  $AIN$  به کامپوزیت  $ZrB_2-SiC$  اضافه شده و ریزساختار و خواص مکانیکی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل شده از تمامی نمونه‌ها در ترکیبات مختلف نشان می‌دهند که با تغییر درصد حجمی  $SiC$  نانو از ۲۰ درصد حجمی نانو به ۱۵ درصد نانو و ۵ درصد میکرون، کاهش در تخلخل و افزایش در چگالی نسبی ( $95/1$ ) رخ می‌دهد. با بررسی ریز ساختاری و اندازه‌گیری خواص مکانیکی نمونه‌ها بیشترین سختی و تافنس شکست نیز، در ترکیب دارای به ترتیب ۱۵ و ۵ درصد حجمی  $SiC$  نانو و میکرون و با مقادیر  $15/9Gpa$  و  $4/9Mpa.m^{1/2}$  مشاهده شد. با افزودن ذرات  $AIN$  چگالی نسبی به  $98/1$  درصد و مقادیر سختی و چقرمگی شکست به  $17/1GPa$  و  $5/7Mpa.m^{1/2}$  افزایش یافت.

### اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۱ فروردین ۱۳۹۶

پذیرش: ۲۰ تیر ۱۳۹۶

### کلید واژه:

نانو کامپوزیت، دیورید زیرکونیم، کاربید سیلیسیم، نیتريد آلومینیم، زینتر بدون فشار

### ۱- مقدمه

در صنایع هوا فضا دو سرامیک  $ZrB_2$  و  $HfB_2$  را به عنوان سرامیک‌های فوق دمای بالا می‌شناسند. این دو بورید دارای

نقطه ذوب بالایی هستند (بیش از  $3200^\circ C$  درجه سانتی‌گراد) [۱] و همچنین هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، سختی بالا، استحکام خوب و پایداری شیمیایی در دماهای بالا دارند. ویژگی‌های گفته شده برای دی‌بوریدها به ویژه هدایت



نمونه‌های حاوی ۱۰٪ حجمی AlN، ۲۰٪ حجمی SiC پس از پرس گرم در دمای  $1800^{\circ}\text{C}$  حدود ۹۸/۷٪ است، اما چگالی نسبی  $\text{ZrB}_2$  خالص پس از پرس گرم در دمای ۲۲۰۰ درجه سانتیگراد تنها ۸۹-۸۵٪ می‌باشد. حضور AlN و SiC علاوه بر بالا رفتن چگالی نسبی باعث افزایش خواص مکانیکی از جمله استحکام و سختی نسبت به  $\text{ZrB}_2$  خالص می‌شود.

یکی از محدودیت‌های ذاتی کامپوزیت‌های  $\text{ZrB}_2$ -SiC، تردی بسیار زیاد آن‌هاست. یکی از راه‌های کاهش تردی این کامپوزیت‌ها، افزودن AlN می‌باشد. ثابت شده است که حضور فازهای ثانویه نانومتری در زمینه سرامیکی باعث افزایش چشمگیر در خواص کامپوزیت می‌شود. البته این در صورتی است که توزیع ذرات نانومتری بطور یکنواخت صورت گرفته و تا حد ممکن از آگلومره شدن آن‌ها جلوگیری شود. در چند سال اخیر گزارش‌هایی مبنی بر استفاده همزمان از ذرات تقویت‌کننده نانومتری و میکرومتری در پوشش‌های سرامیکی ارائه شده است [۸]. نتایج این گزارش‌ها نشان می‌دهد که استفاده همزمان از یک تقویت‌کننده در دو اندازه مختلف می‌تواند خواص مکانیکی را بهبود بخشد. اما تاکنون هیچ گزارشی مبنی بر حضور همزمان ذرات SiC نانو و میکرون در کامپوزیت‌های بر پایه  $\text{ZrB}_2$  ارائه نشده است. بر همین اساس در این تحقیق، به منظور دستیابی به توزیع یکنواخت ذرات SiC نانو و شکسته شدن آگلومره‌ها، پودر SiC نانو به همراه میکرون به عنوان فاز تقویت‌کننده در کامپوزیت بر پایه  $\text{ZrB}_2$  مورد استفاده قرار گرفت و پس از تعیین نسبت بهینه ذرات SiC نانو به میکرون، به منظور بهبود خواص مکانیکی

حرارتی بسیار بالای آن‌ها موجب شده است که استفاده از دی‌بوریدها (به ویژه  $\text{ZrB}_2$  و  $\text{HfB}_2$ ) در کاربردهایی که تحت تنش‌های حرارتی هستند، بسیار مناسب باشند [۲]. به دلیل داشتن این خواص، دی‌بورید زیر کونیوم دارای پتانسیل کافی به منظور کاربرد در صنایع هوافضا می‌باشد. اما این سرامیک دارای معایبی نیز هست. از جمله این معایب می‌توان به مشکل بودن فرآیند ساخت به دلیل حضور ناخالصی‌های اکسیدی روی سطح ذرات دی‌بورید، مقاومت به اکسیداسیون ضعیف به دلیل تشکیل لایه متخلخل زیر کونیا و نیز فشار بخار بالای اکسید بور مذاب و همچنین ویسکوزیته پایین اکسید بور، خواص مکانیکی ضعیف و ... اشاره کرد. به منظور رفع مشکلات یاد شده از افزودنی‌هایی مانند:  $\text{C}_4\text{B}_4$ ،  $\text{SiC}$ ،  $\text{MoSi}_2$ ،  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ،  $\text{HfB}_2$  و ... استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که از این افزودنی‌ها هم به عنوان کمک زینتر و هم به عنوان فاز ثانویه (تقویت‌کننده) استفاده می‌کنند [۳، ۴]. به عنوان مثال، حضور AlN و SiC علاوه بر بالا رفتن چگالی نسبی باعث افزایش خواص مکانیکی از جمله استحکام و سختی نسبت به  $\text{ZrB}_2$  خالص می‌شود [۵]. Han و همکارانش [۶] گزارش کرده‌اند که با افزودن AlN، کامپوزیت  $\text{ZrB}_2$ -SiC زینترپذیری بهتری پیدا می‌کند، که این به دلیل تشکیل محلول جامد حاصل از SiC و AlN می‌باشد، به طوری که چگالی نسبی کامپوزیت  $\text{ZrB}_2$ -SiC بدون افزودن AlN، ۹۲٪ می‌باشد، ولی با افزودن تنها ۵ درصد حجمی AlN، چگالی نسبی به ۹۷/۵٪ رسیده است. نتایج تحقیقاتی که Liang و همکارانش [۷] بر روی رفتار چگالش کامپوزیت  $\text{ZrB}_2$ -SiC-AlN به روش پرس گرم انجام داده‌اند نشان می‌دهد که چگالی نسبی



به منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، پودر  $ZrB_2$  به همراه پودرهای SiC نانو و میکرون با نسبت‌های 20:0، 15:5، 10:10 و 5:15 در آسیاب سیاره‌ای (با محفظه و گلوله‌های زیرکونیا) به مدت ۲ ساعت با سرعت ۲۰۰ rpm در محیط ایزوپروپانول آسیاب گردید. مخلوط حاصل پس از پرس تک مجوری در دمای  $80^\circ C$  جهت افزایش استحکام خام تحت فرآیند پرس ایزواستاتیک سرد (CIP) با فشار ۲۰۰۰ bar قرار گرفت. پس از عملیات CIP، نمونه‌ها در دمای  $950^\circ C$  درجه سانتیگراد پیرولیز شده و سپس فرآیند زینتر بدون فشار نیز در دمای  $2150^\circ C$  در کوره دما بالا با المنت‌های گرافیتی در اتمسفر آرگون به مدت ۲ ساعت صورت گرفت. پس از تعیین نسبت بهینه ذرات SiC نانو به میکرون، به منظور بهبود خواص کامپوزیت  $ZrB_2$ -SiC، ذرات AlN (با درصد‌های حجمی ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵) به آن اضافه گردید. در جدول‌های ۱ و ۲ نام و ترکیب نمونه‌های تولید شده در این تحقیق آورده شده است. جهت بررسی تأثیر حضور همزمان ذرات SiC نانو و میکرون و ذرات AlN مقادیر دانسیته نسبی و درصد تخلخل به روش ارشمیدس (استاندارد ASTM C 373-88) محاسبه گردید. برای مقایسه ریزساختار نمونه‌ها نیز از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VEGA3 TESCAN مجهز به طیف‌سنج EDS و آنالیز XRD (دستگاه پراش پرتو ایکس XRD, Seifert 3000 PTS) استفاده شد. سطح نمونه‌ها جهت بررسی‌های ریزساختاری ابتدا به وسیله سنگ CBN و سپس با سمباده‌های ۶۰، ۲۲۰، ۴۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ سمباده کاری شد. سختی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ۱۳۲۷ASTMC با استفاده از دستگاه سختی‌سنج ویکرز

کامپوزیت  $ZrB_2$ -SiC، ذرات AlN به عنوان افزودنی به آن اضافه گردید.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

در این تحقیق، از روش زینتر بدون فشار برای تولید کامپوزیت  $ZrB_2$ -SiC استفاده شد. پودر  $ZrB_2$  با متوسط اندازه ذرات ۱۰ میکرون (با درصد خلوص بیش از ۹۸ درصد ساخت کشور روسیه) به عنوان زمینه کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. از پودر SiC نانو (با متوسط اندازه ذرات ۴۰ نانومتر با درصد خلوص بیش از ۹۵ درصد ساخت کشور چین)، SiC میکرون (با متوسط اندازه ذرات ۱۰ میکرون با درصد خلوص بیش از ۹۸ درصد ساخت کشور چین) و AlN (با متوسط اندازه ذرات ۱۰ میکرون و درصد خلوص بیش از ۹۸ درصد ساخت کشور روسیه) نیز به عنوان فاز تقویت‌کننده استفاده شد.

در تحقیقات قبلی ثابت شد [۴] که حضور فازهای ثانویه نانومتری در زمینه سرامیکی باعث افزایش چشمگیر در خواص کامپوزیت می‌شود. البته این در صورتی است که توزیع ذرات نانومتری بطور یکنواخت صورت گرفته و تا حد ممکن از آگلومره شدن آن‌ها جلوگیری شود. به همین دلیل در این تحقیق، به منظور دستیابی به توزیع یکنواخت ذرات SiC نانو و شکسته شدن آگلومره‌ها، پودر SiC نانو به همراه SiC میکرون در آسیاب سیاره‌ای در محیط ایزوپروپانول با نسبت گلوله به پودر ۱:۲۰ به مدت ۱ ساعت و با سرعت ۲۰۰ rpm آسیاب گردید. در این مرحله، ایزوپروپانول در واقع نقش دیسپرسانت آلی را داشته و به شکسته شدن آگلومره‌ها کمک می‌کند.



$$K_{IC} = 0.16.H_v.a^{1/2}.\left(\frac{C}{a}\right)^{-2/3}$$

که در آن C نصف طول ترک،  $H_v$  سختی و a نصف قطر اثر می‌باشد.

(-Microhardness tester FM-70) تحت بار ۱ کیلوگرم و مدت زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه، اندازه‌گیری شد. چقرمگی شکست نمونه‌ها نیز طبق استاندارد ASTM C1327 با استفاده از دستگاه ماکرو سختی سنج ویکرز بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید:

جدول ۱- کدگذاری نمونه‌های  $ZrB_2-SiC_{nano/micron}$

نام نمونه	ZS20/0	ZS15/5	ZS10/10	ZS5/15
درصد حجمی فاز SiC نانو و میکرو	20nano/0micron	15nano/5micron	10nano/10micron	5nano/15micron

Z:  $ZrB_2$ , S: SiC

جدول ۲- کدگذاری نمونه‌های  $ZrB_2-SiC_{nano/micron}-AlN$

نام نمونه	ZS	ZSA1	ZSA2	ZSA3	ZSA4	ZSA5	ZSA6
درصد حجمی فاز AlN	۰	۲/۵	۵	۷/۵	۱۰	۱۲/۵	۱۵

Z:  $ZrB_2$ , S: SiC, A: AlN

در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج حاصل از محاسبه دانسیته نسبی و درصد تخلخل نمونه‌های حاوی فاز تقویت کننده SiC نانو و میکرون در دمای تفجوشی  $2150^{\circ}C$  آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بهترین نتیجه در نسبت  $SiC_{nano}/SiC = 15/5$  به دست آمده است. بطوری‌که چگالی نسبی در این حالت (۹۵/۱) حتی از چگالی نسبی نمونه‌های  $ZrB_2-10\%vol$  و  $ZrB_2-20\%vol$   $SiC_{nano}$  (یعنی ۹۳/۸ و ۹۱/۳) نیز بیشتر است. این نشان می‌دهد که حضور همزمان ذرات SiC نانو و میکرون در زمینه  $ZrB_2$  در مقایسه با نمونه‌هایی که فقط دارای ذرات تقویت کننده نانومتری هستند، تأثیر بسیار بیشتری بر بهبود خواص کامپوزیت دارد که این تنها با افزودن ۵ درصد حجمی SiC میکرون به دست آمد. این مسئله با توزیع غیر

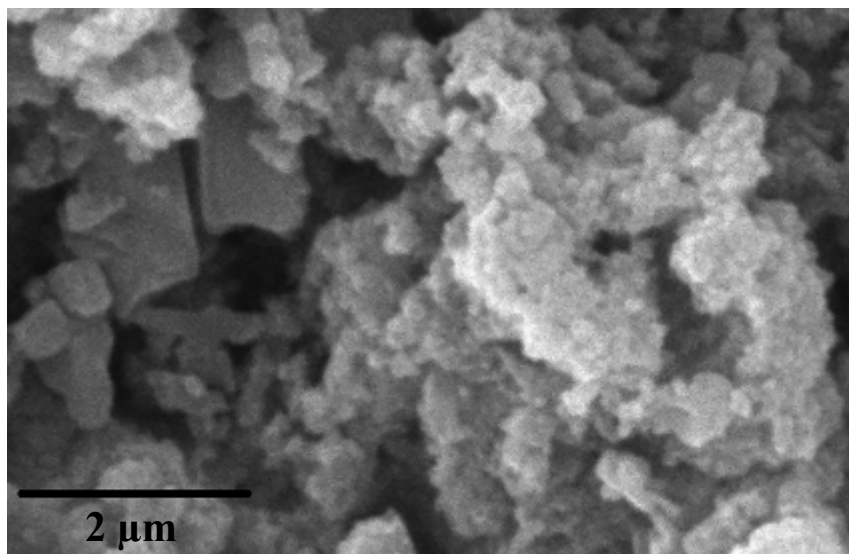
### ۳- نتایج و بحث

تصویر SEM از مخلوط پودر  $SiC-SiC_{nano}$  پس از آسیاب (شکل ۱) نشان می‌دهد که نانو ذرات SiC در اطراف ذرات SiC میکرون تجمع کرده و به این ترتیب تا حدود زیادی از آگلومره شدن آن‌ها جلوگیری به عمل آمده است. به عبارت بهتر ذرات SiC میکرون مانع آگلومره شدن بیش از حد نانو ذرات شده است. در پژوهش‌های قبلی انجام شده میزان بهینه درصد حجمی SiC نانو ۲۰ درصد گزارش شد [۷] بنابراین در این تحقیق با اضافه کردن مقادیر متفاوتی از SiC میکرون در ترکیب بهینه کامپوزیت به بررسی تأثیر آن در خواص نهایی و رفتار تفجوشی نمونه پرداخته می‌شود.

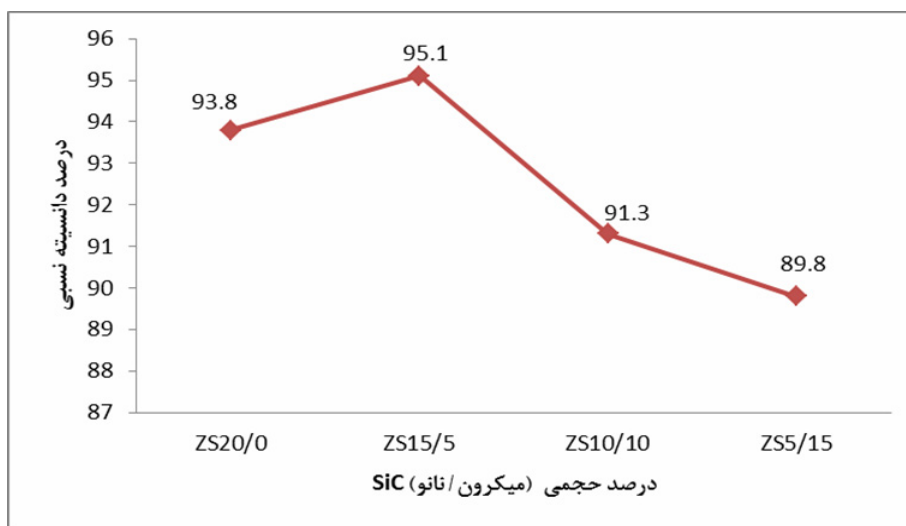


خواص می‌شوند [۱۰]. کاهش آگلومره شدن ذرات منجر به بهبود رفتار تفجوشی بدون فشار و فرآیند چگالش شده و همانطور که در تصویر SEM شکل ۴ دیده می‌شود، درصد تخلخل‌های کامپوزیت به شدت کاهش می‌یابد.

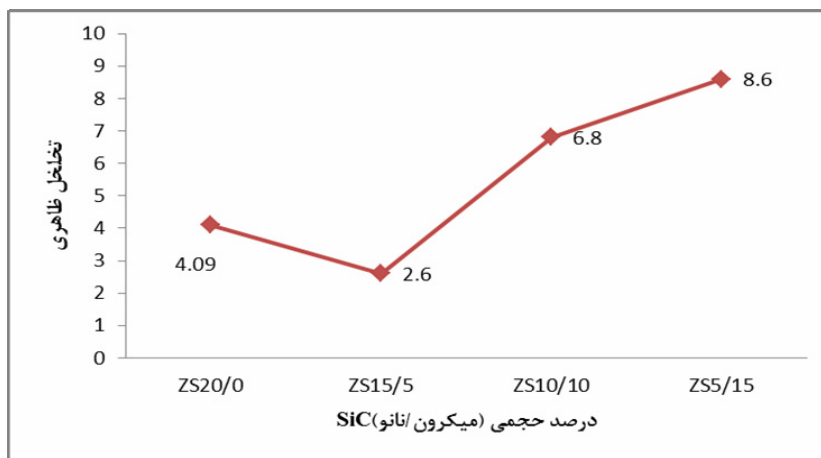
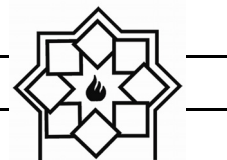
یکنواخت ذرات SiC نانو توجیه می‌شود [۹]. در نمونه‌های نانو با افزایش درصد حجمی SiC نانو، پدیده آگلومره شدن تشدید شده و در نتیجه درصد تخلخل ظاهری افزایش می‌یابد. کاملاً واضح است که وجود ذرات میکرون به دلیل کاهش پدیده آگلومره شدن در این نمونه‌ها باعث بهبود



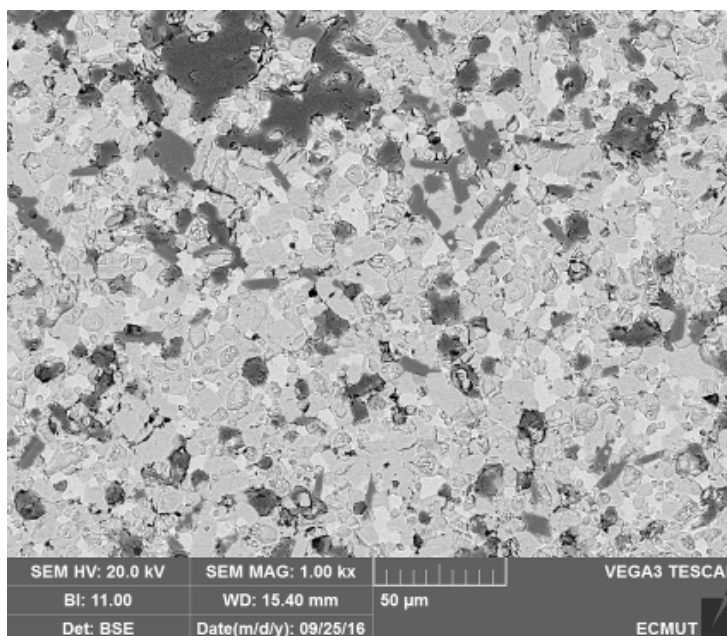
شکل ۱- تصویر SEM از مخلوط پودری SiC-SiC<sub>nano</sub> پس از ۲ ساعت آسیاب



شکل ۲- مقادیر دانسیته نسبی بر حسب تغییرات درصد حجمی SiC نانو و میکرون در دمای زینتر ۲۱۵۰ درجه سانتیگراد



شکل ۳- مقادیر تخلخل ظاهری برحسب تغییرات درصد حجمی SiC نانو و میکرون در دمای زینتر ۲۱۵۰ درجه سانتیگراد



شکل ۴- تصویر الکترون‌های ثانویه از کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-15%SiC<sub>nano</sub>-5%SiC

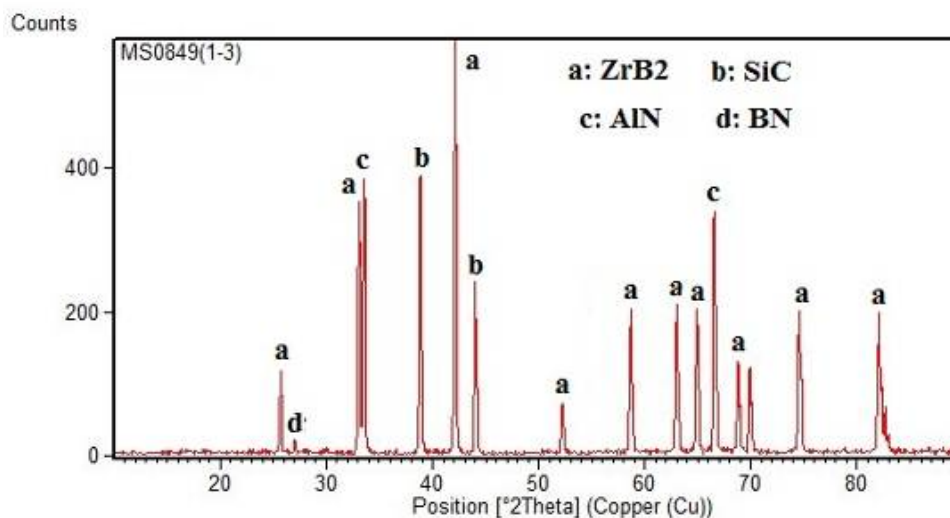
### ۳-۱- مشخصه‌یابی ریزساختاری

#### نانوکامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC<sub>nano</sub>/micron- AlN

الگوی پراش پرتو X کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC<sub>15nano</sub>/5micron- AlN پس از پخت در دمای ۲۱۵۰ به مدت ۱ ساعت در اتمسفر آرگون در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به اینکه بیشترین درصد دانسیته نسبی و کمترین میزان تخلخل در کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC در نسبت SiC نانو به میکرون ۱۵ به ۵ به دست آمد؛ در مرحله بعدی به این کامپوزیت، درصدهای مختلفی از فاز تقویت کننده AlN اضافه گردید.





شکل ۵- آنالیز XRD از نمونه کامپوزیتی مربوط به کد ZSA4

نیترژن در آنالیز EDS احتمالاً به دلیل تشکیل فاز BN حاصل از واکنش ۱ است.

در شکل ۷ نمودار تغییرات درصد چگالی نسبی نمونه‌ها بر حسب درصدهای مختلف AlN آورده شده است. با توجه به این شکل بیشترین چگالی در ۷/۵ درصد حجمی AlN به دست آمده است. به عبارت دیگر با افزایش درصد حجمی AlN از ۰ تا ۷/۵ درصد حجمی، چگالی نسبی افزایش یافته و پس از آن با افزایش درصد حجمی تا ۱۵ درصد، چگالی نسبی نیز کاهش می‌یابد. همانطور که در بخش قبل گفته شد، در حین فرآیند زینتر در اثر واکنش بین AlN و B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> فاز BN تشکیل می‌شود. از آنجاییکه حضور ناخالصی اکسیدی بر روی ذرات ZrB<sub>2</sub> به عنوان یک مانع در برابر پیشرفت فرآیند زینتر عمل کرده و مانع چگالش کامل نمونه می‌شود بنابراین چون با انجام این واکنش لایه اکسیدی از روی ذرات ZrB<sub>2</sub> حذف می‌شود پس می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد حجمی AlN فرآیند چگالش و در نتیجه چگالی نسبی بهبود یابد. همانطور که در آنالیز EDS

همانطور که دیده می‌شود نمونه شامل فازهای ZrB<sub>2</sub>، SiC، AlN و مقدار کمی BN است. BN در نتیجه واکنش بین AlN و B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> طبق رابطه زیر به وجود آمده است [۶]:

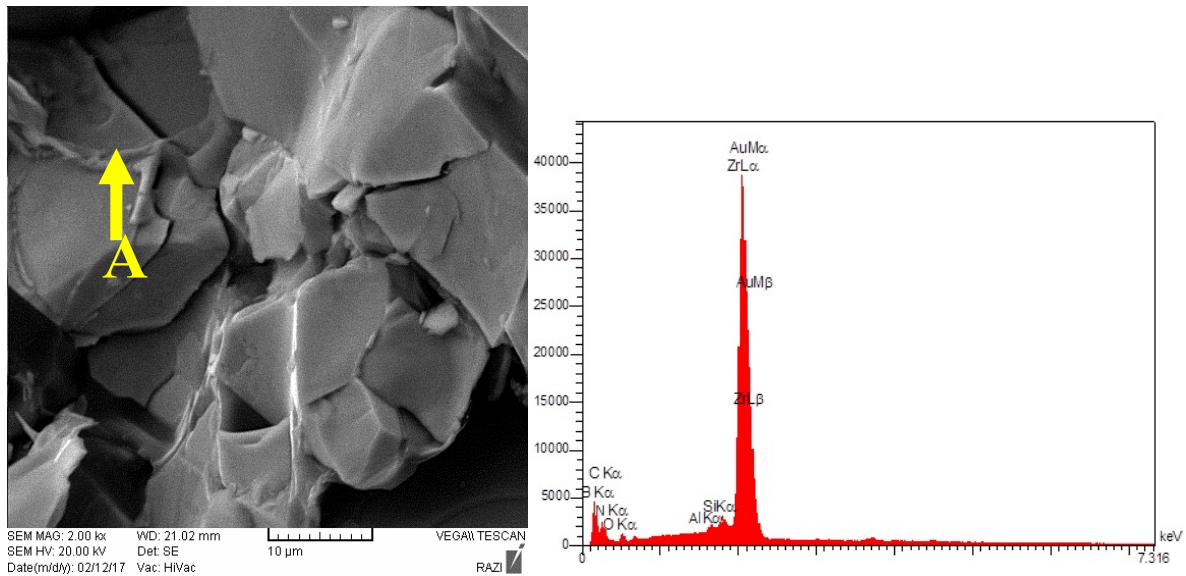


طبق این واکنش، B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> که به عنوان ناخالصی بر روی سطح ذرات ZrB<sub>2</sub> وجود دارد توسط AlN احیا شده و فاز BN را به وجود می‌آورد. از آنجایی که این فاز بر روی سطح ذرات ZrB<sub>2</sub> تشکیل می‌شود امکان مخلوط شدن آن با فاز مایع تشکیل شده در مرزدانه (در حین عملیات تفجوشی) وجود دارد. این موضوع در تصویر SEM با بزرگنمایی بالا که از کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC-10AlN تهیه شده است نیز قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۶). آنالیز EDS گرفته شده از نقطه A نشان دهنده تشکیل فاز مایع در مرزدانه در حین فرآیند تفجوشی که حضور همزمان چندین عنصر مختلف شامل زیرکونیم، سیلیسیم، بور، کربن به همراه مقادیر کمی از نیترژن و آلومینیم را نشان می‌دهد. حضور عناصر بور و

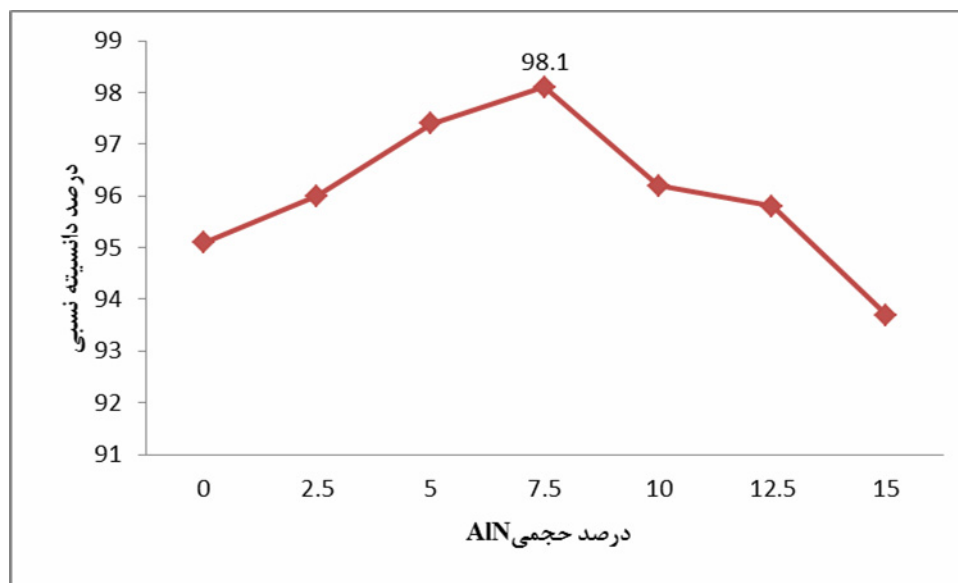


بهبود چگالش کمک نکرده بلکه منجر به کاهش چگالی نسبی و رشد دانه نیز می‌شود که این در تحقیقات قبلی نیز ثابت شده است [۱۱].

شکل ۶ نشان داده شد، فاز مایع مرزدانه‌ای در واقع نوعی فاز شیشه‌ای آلومینوسیلیکاتی است که می‌تواند به بهبود فرآیند تفجوشی طبق مکانیزم فاز مایع کمک کند. اما با افزایش مقدار فاز شیشه‌ای در زمینه کامپوزیت، نه تنها به



شکل ۶- تصویر SEM با بزرگنمایی بالا از نمونه  $ZrB_2-SiC-10AlN$  به همراه آنالیز EDS



شکل ۷- مقادیر چگالی نسبی بر حسب تغییرات درصد حجمی AlN در دمای زینتر ۲۱۵۰ درجه سانتیگراد

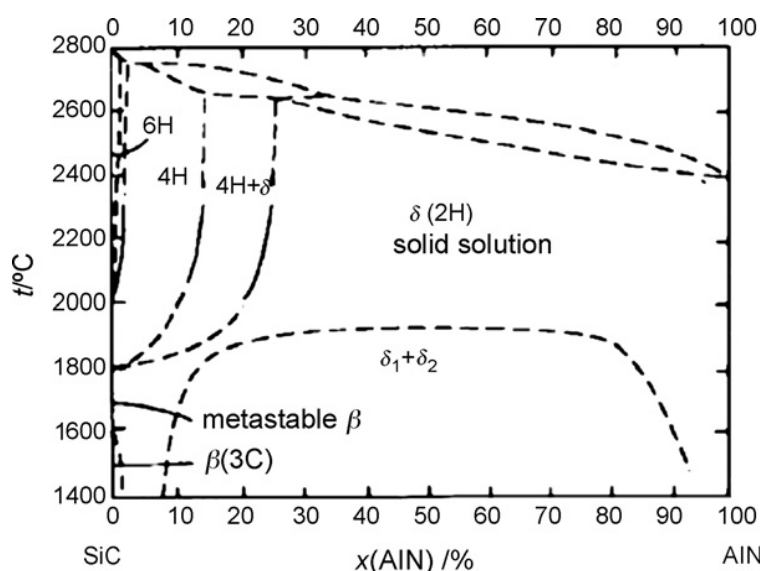




خواص مکانیکی کامپوزیت کمک کند [۱۲].

از طرف دیگر با اضافه شدن AIN به کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC طبق دیاگرام فازی AIN-SiC (شکل ۸) در دمای زینتر، یک محلول جامد SiC+AIN تشکیل می‌شود که به بهبود فرآیند تفجوشی و افزایش چگالی نسبی نمونه کمک می‌کند. همانطور که در دیاگرام فازی AIN-SiC مشاهده می‌شود، در دماهای بالاتر از ۱۶۰۰ درجه دو فاز SiC و AIN، تشکیل محلول جامد می‌دهند [۱۰].

همچنین با افزایش مقدار افزودنی AIN در ترکیب کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC میزان تشکیل فاز BN طبق واکنش ۱ نیز افزایش پیدا می‌کند. از آنجایی که BN دارای سختی پایین‌تر (حدود ۱۱ GPa) نسبت به دیگر اجزاء کامپوزیت است، طبق قانون مخلوطها افزایش کسر حجمی آن خواص مکانیکی کامپوزیت را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر فاز BN یک فاز نرم محسوب می‌شود بنابراین تشکیل بیش از اندازه آن می‌تواند موجب کاهش استحکام فصل مشترک‌ها شده و در نتیجه به رشد افراطی دانه‌ها و متعاقباً به افت



شکل ۸- دیاگرام فازی دوتایی AIN-SiC [۱۰]

فرآیند زینتر ذرات AIN در بین ذرات ZrB<sub>2</sub> قرار می‌گیرند و انرژی فعال‌سازی نفوذ مرز دانه‌ای را کاهش می‌دهند و از نفوذ سطحی جلوگیری می‌کنند. به معنای دیگر مانع از رشد دانه می‌شوند. در واقع ذرات AIN با کاهش انرژی فعال‌سازی نفوذ مرز دانه‌ای (Q<sub>GB</sub>) و ممانعت از رشد دانه (Q<sub>G</sub>)، طبق معادله زیر، باعث کاهش انرژی فعال‌سازی موثر برای تفجوشی می‌شوند [۱۳]:

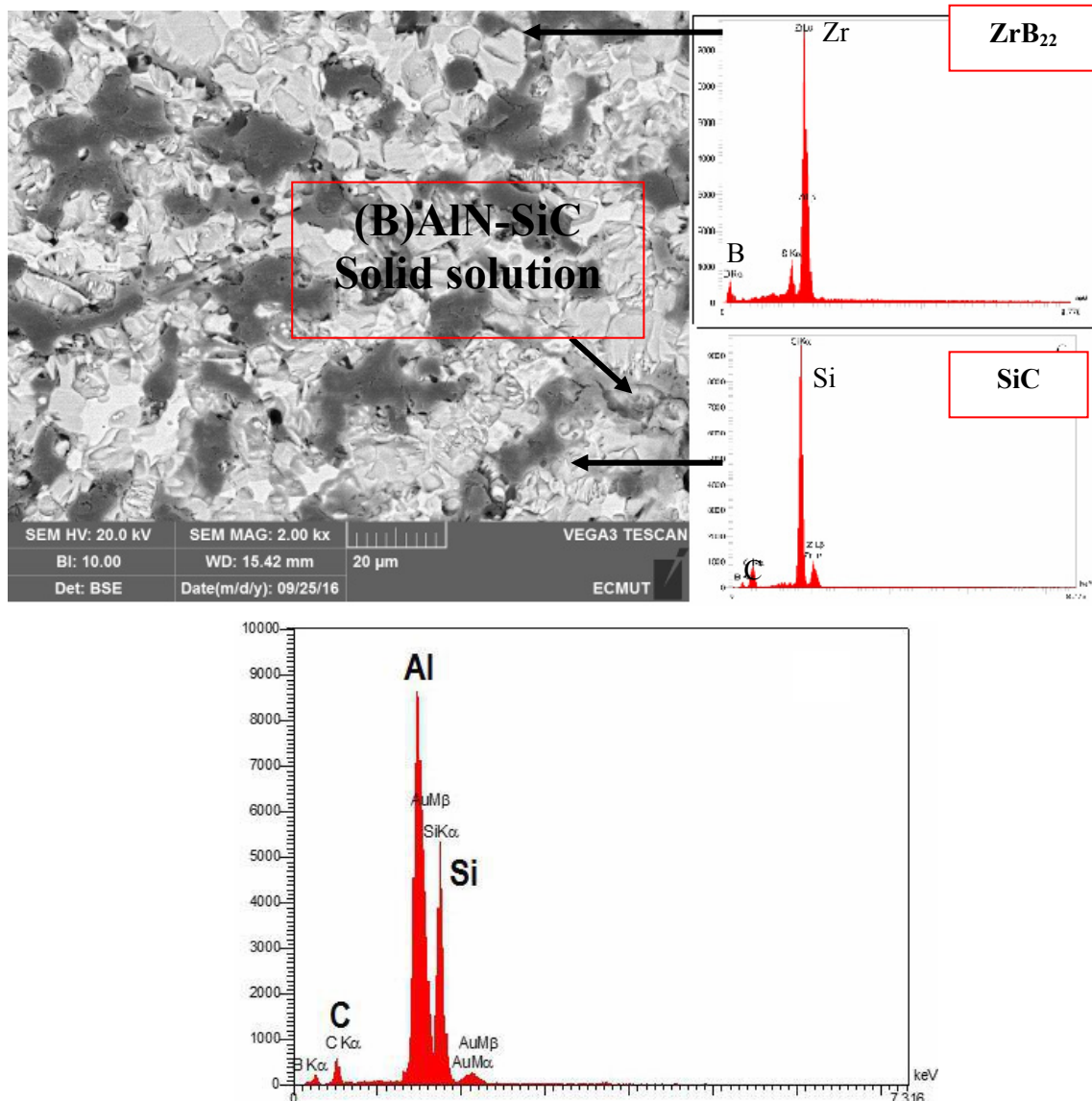
تفجوشی فاز AIN در کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC با مکانیزم‌های تفجوشی فاز جامد قابل توجه است. وقتی سیستم حرارت می‌بیند، سعی می‌کند انرژی سطحی را با کاهش سطح کم کند. نیروی محرکه برای تفجوشی، کاهش انرژی آزاد کل  $\Delta G_T = \Delta G_v + \Delta G_b + \Delta G_s$  یعنی  $\Delta G_T$  است که در آن  $\Delta G_v$  انرژی آزاد نفوذ حجمی،  $\Delta G_b$  انرژی آزاد نفوذ مرز دانه‌ای و  $\Delta G_s$  انرژی آزاد نفوذ سطحی می‌باشد. در حین



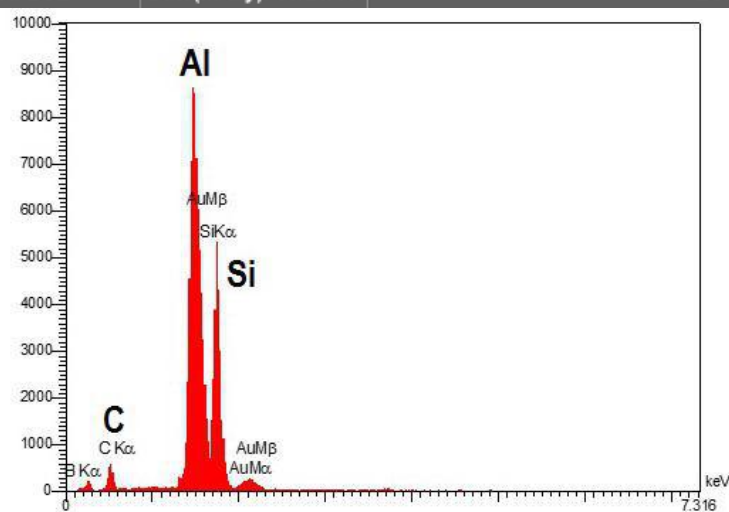
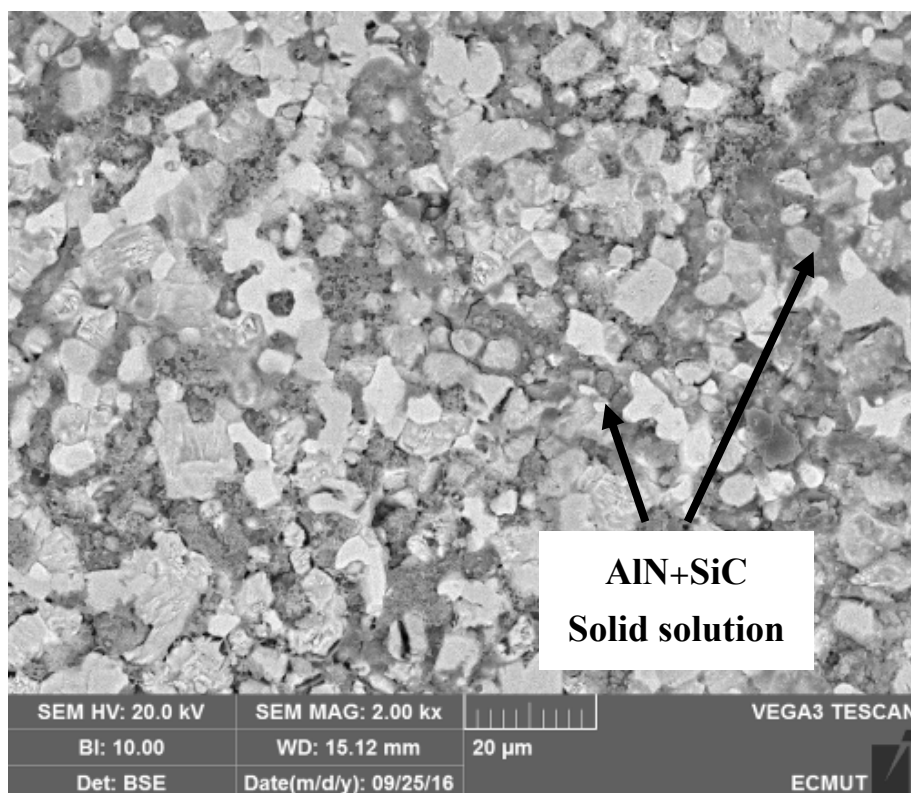
نواحی خاکستری احتمالاً بیانگر وجود محلول جامد  $\text{SiC}+\text{AlN}$  در نمونه می‌باشد. با مقایسه تصاویر SEM نمونه‌های ZSA1 و ZSA3 در تصاویر شکل ۹ و ۱۰ مشخص می‌شود که با افزایش درصد حجمی  $\text{AlN}$  تا ۷/۵ درصد، مقدار محلول جامد تشکیل شده در مرزخانه‌ها بیشتر شده است.

$$Q_{EF} = Q_{GB} - Q_G \quad (2)$$

بنابراین حضور فاز  $\text{AlN}$  باعث پیشرفت زینتر کامپوزیت  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$  می‌شود. تشکیل محلول جامد  $\text{AlN-SiC}$  را می‌توان در تصویر SEM نمونه ZSA1 (شکل ۸) مشاهده کرد. با توجه به این شکل نواحی سیاه رنگ نشان دهنده ذرات  $\text{SiC}$ ، نواحی روشن مربوط به فاز زمینه ( $\text{ZrB}_2$ ) و



شکل ۹- تصویر الکترون‌های برگشتی از نمونه ZSA1 که نشان دهنده تشکیل محلول جامد در حین فرآیند زینتر می‌باشد.



شکل ۱۰- تصویر SEM از کامپوزیت  $ZrB_2-SiC$  حاوی ۷/۵ درصد حجمی  $AlN$

بر حسب درصد حجمی  $AlN$  (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که افزودن  $AlN$  تا ۷/۵ درصد حجمی موجب افزایش سختی تا ۱۷/۱ GPa می‌شود.

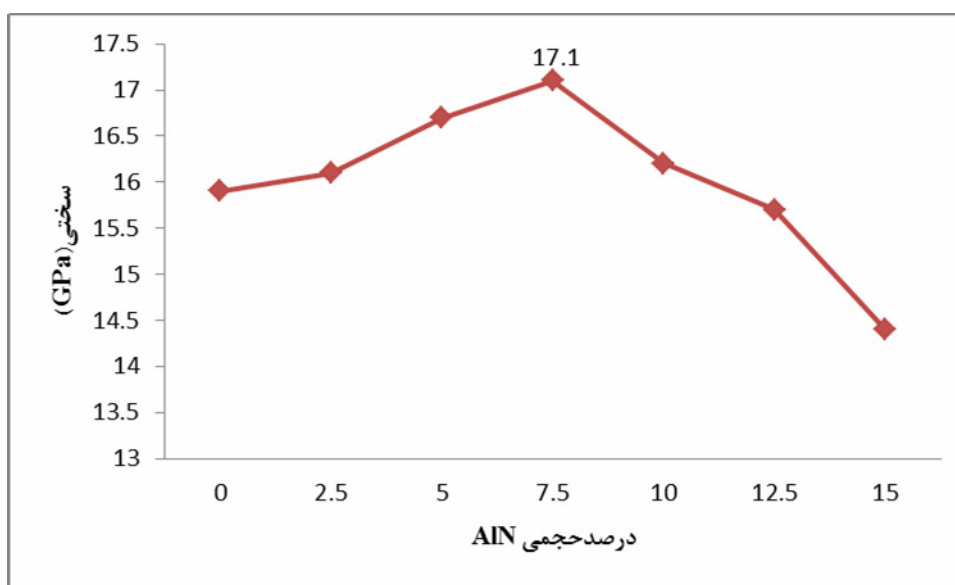
### ۲-۳- رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت $ZrB_2-SiC_{nano/micron}-AlN$

در جدول ۳ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت  $ZrB_2-SiC_{nano/micron}-AlN$  ارائه شده است. نمودار تغییرات سختی



جدول ۳- مقادیر سختی و تافنس شکست نمونه‌های  $ZrB_2-SiC_{nano/micron}-AlN$  زینتر شده در دمای ۲۱۵۰ درجه

درصد حجمی فاز AlN	کد نمونه	دمای ۲۱۵۰°C	
		سختی (GPa)	چقرمگی شکست ( $MPa.m^{1/2}$ )
۰	ZS	۱۵/۹	۴/۹
۲/۵	ZSA1	۱۶/۱	۵
۵	ZSA2	۱۶/۷	۵/۵
۷/۵	ZSA3	۱۷/۱	۵/۷
۱۰	ZSA4	۱۶/۲	۴/۶
۱۲/۵	ZSA5	۱۵/۷	۴/۵
۱۵	ZSA6	۱۴/۴	۴



شکل ۱۱- مقادیر سختی بر حسب تغییرات درصد حجمی AlN در دمای زینتر ۲۱۵۰ درجه سانتیگراد

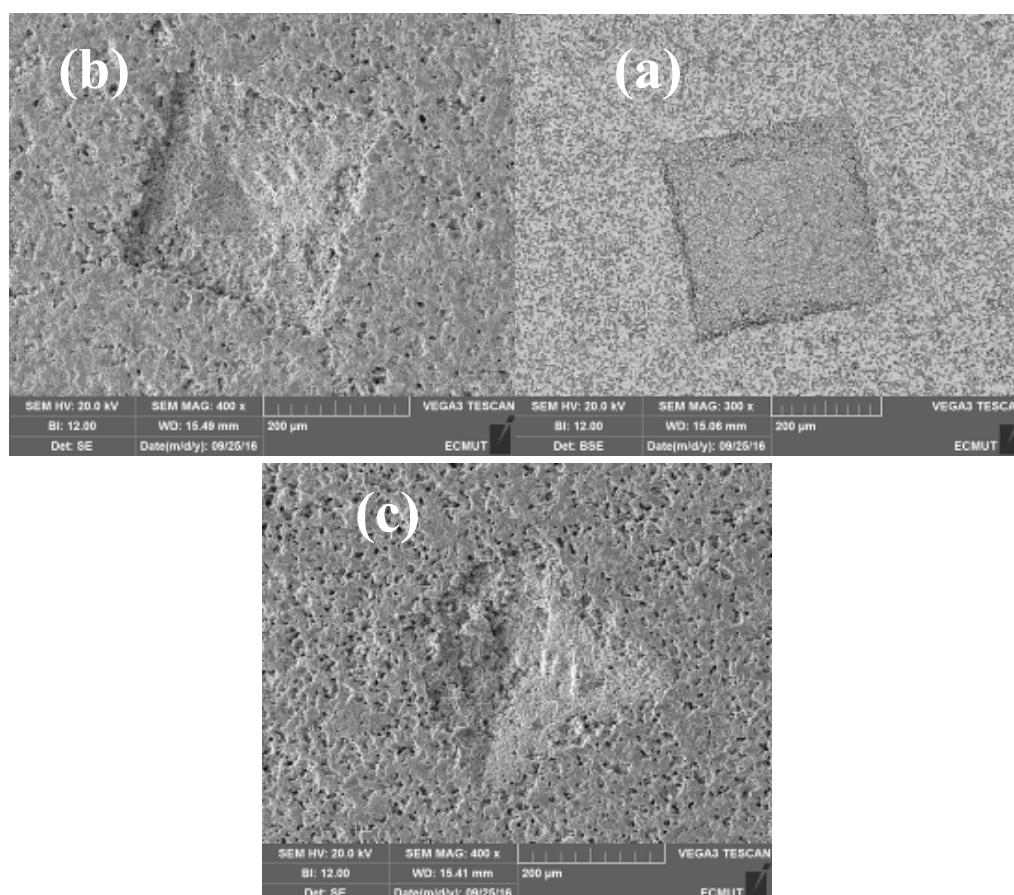
مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌باشد. در تصویر شکل ۱۲ ساختار فشرده‌تر نمونه حاوی ۷/۵ درصد حجمی AlN نسبت به سایر نمونه‌ها کاملاً مشخص است. از طرف دیگر در نمونه ۲/۵ درصد حجمی به دلیل تخلخل زیاد نمونه، اثر سختی نامنظم است. از سوی دیگر مقدار بیش از حد AlN (بیش از ۷/۵ درصد) اثر معکوس بر زینترپذیری کامپوزیت  $ZrB_2$ -

در شکل ۱۲ تصویر اثر سختی سنج ویکرز بر روی کامپوزیت‌های  $ZrB_2-SiC$  حاوی ۲/۵، ۷/۵ و ۱۲/۵ درصد حجمی AlN نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در نمونه حاوی ۷/۵ درصد AlN اثر سختی کاملاً منظم بوده و هیچگونه تغییر فرمی در اطراف آن مشاهده نمی‌شود. این مسئله به دلیل دانسیته بالای این نمونه در



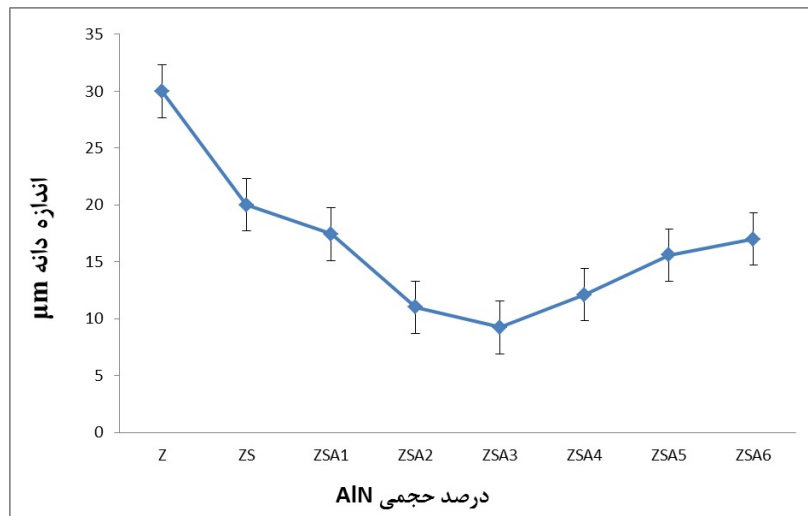
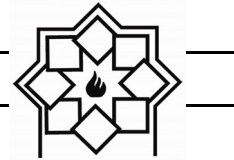
درصد اندازه دانه کاهش می‌یابد به حضور ذرات AlN و تشکیل محلول جامد SiC-AlN در مرزدانه‌ها نسبت داده می‌شود. اما با افزایش مقدار AlN (بیشتر از ۷/۵ درصد) رشد دانه رخ می‌دهد که دلیل این مسئله می‌تواند تشکیل مقدار بیشتری فاز BN (در درصدهای بالای AlN) و همچنین افزایش فاز شیشه‌ای آلومینوسیلیکاتی در مرز به مکانیزم تفجوشی فاز مایع و تشکیل فاز شیشه‌ای و اسپینل می‌یابد متوسط اندازه دانه‌های زمینه کاهش یافته است که این نشان می‌دهد که ذرات AlN نقش جلوگیری کننده از رشد دانه را دارند.

SiC دارد. زیرا مقادیر بالای AlN به دلیل تشکیل بیش از حد فازهای ثانویه موجب گسستگی ساختار و افزایش تخلخل‌های ظاهری شده که این امر سختی کامپوزیت را کاهش می‌دهد (شکل ۱۲(c)). از طرفی افزودن AlN بر اندازه دانه‌های زمینه نیز تأثیرگذار است. در شکل ۱۳ اثر افزودن AlN بر اندازه دانه کامپوزیت‌های ZrB<sub>2</sub>-SiC زینتر شده در دمای ۲۱۵۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که اندازه دانه در نمونه ZrB<sub>2</sub> خالص (بدون افزودنی‌های SiC و AlN) حدود ۳۰ میکرومتر است اما افزودن AlN منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ای در اندازه دانه‌ها شده است. با افزایش کسر حجمی AlN تا ۷/۵



شکل ۱۲- اثر سختی سنج ویکرز در کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC حاوی: (a) ۲/۵، (b) ۷/۵ و (c) ۱۲/۵ درصد حجمی AlN





شکل ۱۳- تأثیر درصد حجمی AlN بر اندازه دانه‌های کامپوزیت  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$

سختی است. یعنی با افزایش درصد حجمی AlN چقرمگی شکست افزایش یافته و در ۷/۵ درصد به مقدار ماکزیمم خود یعنی  $5/7 \text{ MPa.m}^{1/2}$  می‌رسد و سپس با افزایش درصد AlN دوباره کاهش می‌یابد. یکی از محدودیت‌های ذاتی کامپوزیت‌های  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ ، تردی نسبتاً زیاد آن‌هاست. یکی از راه‌های کاهش تردی این کامپوزیت‌ها، افزودن AlN می‌باشد. افزودن ذرات AlN به کامپوزیت  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$  باعث افزایش قابلیت تغییر شکل پلاستیک آن می‌شود. دلیل این مسئله به افزایش زینتر پذیری پودر  $\text{ZrB}_2$  به دلیل حضور ذرات AlN و در نتیجه کاهش اندازه دانه‌های زمینه ( $\text{ZrB}_2$ ) نسبت داده می‌شود. لازم به ذکر است که مکانیزم تغییر شکل کامپوزیت  $\text{ZrB}_2\text{-SiC-AlN}$  شامل لغزش مرزدانه‌ها و تشکیل فاز شیشه‌ای در مناطق بین دانه‌ای می‌باشد [۷]. از طرف دیگر کاهش اندازه ذرات  $\text{ZrB}_2$  (ناشی از افزایش درصد حجمی ذرات AlN) باعث بهبود تافنس کامپوزیت  $\text{ZrB}_2\text{-SiC-AlN}$  می‌شود. چراکه با کاهش اندازه ذرات، چقرمگی شکست از طریق مکانیزم پل

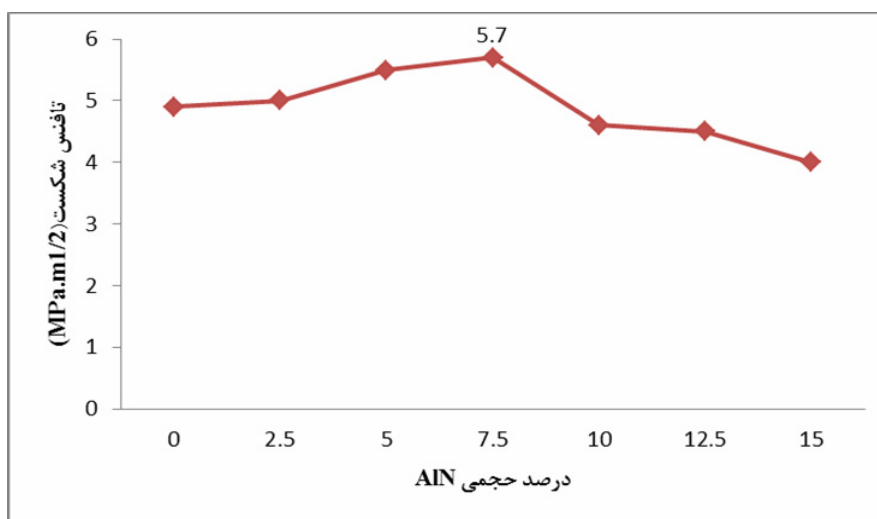
طبق نتایج حاصل از نمودار تغییرات چقرمگی در شکل ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت که افزودن AlN تا ۷/۵ درصد حجمی موجب افزایش چقرمگی تا  $5/7 \text{ MPa.m}^{1/2}$  می‌شود، در حالی که در نمونه مشابه بدون حضور AlN بیشترین میزان تافنس  $4/9 \text{ MPa.m}^{1/2}$  بوده است. طبق نظر Zhang و همکارانش [۱۱]، یکی از دلایل بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های  $\text{ZrB}_2\text{-SiC-AlN}$  ریزدانه شدن ساختار به دلیل حضور ذرات AlN می‌باشد. بر این اساس از آنجایی که تصویر SEM نمونه  $\text{ZrB}_2\text{-SiC-AlN}$  7.5% (شکل ۱۵) نشان‌دهنده ساختار ریزدانه می‌باشد، بنابراین می‌توان سختی بالای آن را نسبت به سایر نمونه‌ها توجیه کرد. Han و همکارانش [۶] نیز گزارش کرده‌اند که یکی از دلایل بهبود خواص مکانیکی با افزایش درصد حجمی AlN، افزایش دانسیته و کاهش اندازه دانه‌های زمینه می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، تغییرات چقرمگی شکست بر حسب درصد حجمی AlN نیز شبیه به تغییرات

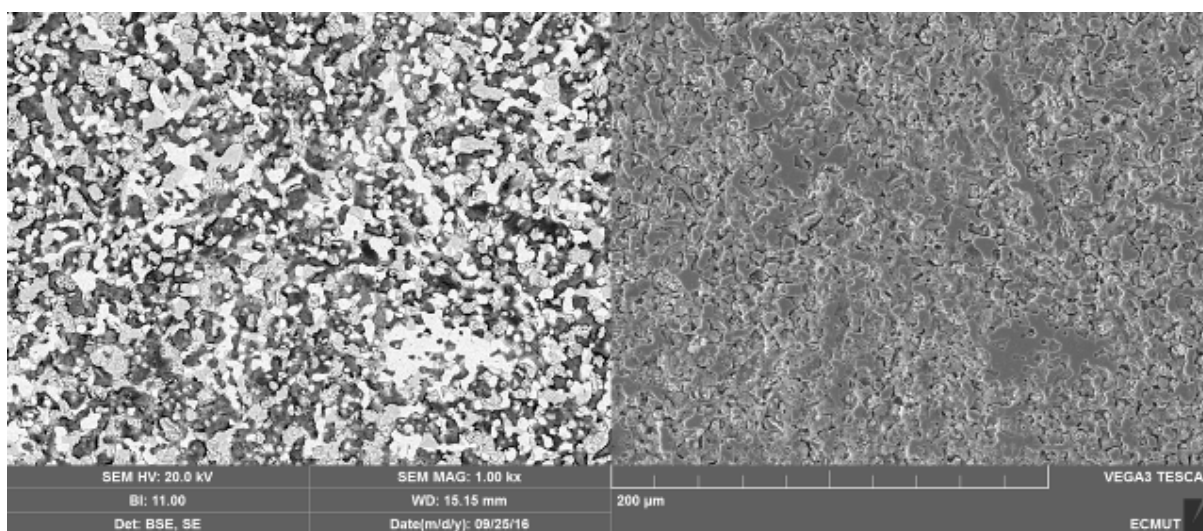




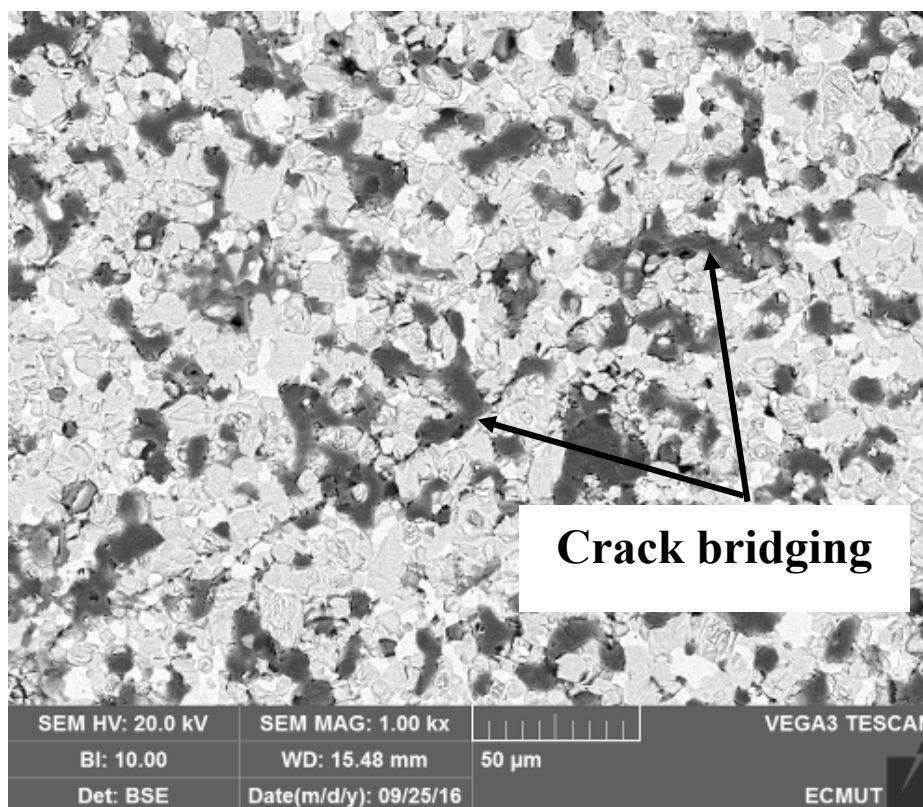
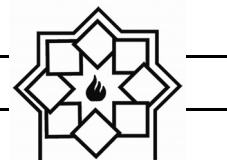
زنی ترک بهبود می‌یابد (شکل ۱۶). در واقع این مکانیزم تنش‌های مکانیکی شده و به این ترتیب چقرمگی شکست (پل زنی ترک) باعث کاهش انرژی ترک در حین اعمال کامپوزیت را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۴- مقادیر تافنس شکست بر حسب تغییرات درصد حجمی AlN در دمای زینتر ۲۱۵۰ درجه سانتیگراد



شکل ۱۵- ریزساختار کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC حاوی ۷/۵ درصد حجمی AlN



شکل ۱۶- افزایش تافنس کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC-AlN از طریق پل زنی ترک

#### ۴- نتیجه گیری

درصد حجمی نانو، اضافه شد. نتایج حاصل از آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی نشان داد که افزودن AlN موجب بهبود خواص کامپوزیت ZrB<sub>2</sub>-SiC<sub>nano/micron</sub> شده، بطوری‌که بهترین نتایج در ۷/۵ درصد حجمی AlN بدست آمد. در این ترکیب بهینه چگالی بالک به ۹۸ درصد رسید و در بررسی خواص مکانیکی، سختی و چقرمگی نیز افزایش یافت و به ترتیب به بیشینه مقدار ۱۷/۱ GPa و ۵/۷ MPa.m<sup>1/2</sup> رسید.

#### مراجع

- [1] Justin, J. and A. Jankowiak, Ultra High Temperature Ceramics: Densification, Properties and Thermal Stability. AerospaceLab, (3): p. p. 1-11, 2011.

در این تحقیق رفتار تفجوشی بدون فشار و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های بر پایه ZrB<sub>2</sub> حاوی ذرات SiC نانو و میکرون با و بدون افزودنی AlN پس از پخت در دمای ۲۱۵۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت در اتمسفر آرگون مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که در نمونه‌های حاوی ذرات SiC نانو و میکرون با افزودن ۵ درصد حجمی SiC میکرون و حضور ۱۵ درصد حجمی SiC نانو، دانسیته نسبی کامپوزیت تا ۹۵/۱ درصد افزایش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر میزان ذرات SiC میکرون خواص رو به کاهش می‌رود. در مرحله بعد مقادیر مختلفی از AlN به ترکیب بهینه شامل ۵ درصد حجمی میکرون و ۱۵



- size and additive effects. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(5): p.p 1398-1404, 2008.
- [12] Wu, W.-W., et al., Synthesis, microstructure and mechanical properties of reactively sintered ZrB<sub>2</sub>-SiC-ZrN composites. *Ceramics International*, 39(6): p.p 7273-7277, 2013.
- [13] Shaw, N.J., *Densification and coarsening during solid state sintering of ceramics: A review of the models. II-Grain growth*. 1989.
- [2] Guo, S.-Q., Densification of ZrB<sub>2</sub>-based composites and their mechanical and physical properties: a review. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(6): pp 995-1011, 2009.
- [3] Han, J., et al., Oxidation-resistant ZrB<sub>2</sub>-SiC composites at 2200 C. *Composites Science and Technology*, 68(3): p.p 799-806, 2008.
- [4] Nasiri, Z., M. Mashhadi, and A. Abdollahi, Effect of short carbon fiber addition on pressureless densification and mechanical properties of ZrB<sub>2</sub>-SiC-C sf nanocomposite. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 51: p.p 216-223, 2015.
- [5] Asl, M.S. and M. G. Kakroudi, Fractographical assessment of densification mechanisms in hot pressed ZrB<sub>2</sub>-SiC composites. *Ceramics International*, 40(9): p.p 15273-15281, 2014.
- [6] Han, W., et al., Effect of AlN as sintering aid on hot-pressed ZrB<sub>2</sub>-SiC ceramic composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 471(1): p.p 488-491, 2009.
- [7] Liang, J., et al., Research on thermal shock resistance of ZrB<sub>2</sub>-SiC-AlN ceramics using an indentation-quench method. *Journal of Alloys and Compounds*, 493(1): p.p 695-698, 2010.
- [8] Li, H.-J., et al., Oxidation behavior of SiC nanoparticle-SiC oxidation protective coating for carbon/carbon composites at 1773K. *Carbon*, 45(13): p.p 2704-2707, 2007.
- [9] Johnson, S., M. Gasch, and M. Stackpoole, *Assessment of the state of the art of ultra high temperature ceramics*. 2009.
- [10] Nasiri, Z. and M. Mashhadi, Effect of sintering temperature and SiC particles size on the microstructure and mechanical properties of ZrB<sub>2</sub>-SiC composites, in *international symposium on nanotechnology*. 2015: Iran.
- [11] Fahrenholtz, W.G., et al., Pressureless sintering of zirconium diboride: particle