



## ساخت و مشخصه‌یابی کامپوزیت زیرکونیا-آلومینای تقویت شده با گرافیت

مهدی پورملکی<sup>۱</sup>، زهره بلک<sup>۲\*</sup>

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی مواد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

\* نویسنده مسئول: zbalak1983@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

### چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر افزودن گرافیت بر خواص مکانیکی کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا است. به این منظور مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد حجمی گرافیت به کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا افزوده شد و پودرهای حاصله به روش پلاسمای جرقه‌ای تفجوشی گردیدند. ریزساختار نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی، چگالی نسبی و سختی به ترتیب با روش‌های ارشمیدس و راکول مورد ارزیابی قرار گرفت. چگالی نسبی نمونه زیرکونیا-آلومینا خالص ۹۸/۵ درصد بود که با افزودن ۴ درصد حجمی گرافیت، این مقدار ۱ درصد افزایش یافته و به ۹۹/۵ درصد رسید؛ اما با افزایش میزان گرافیت و رسیدن به ۶ درصد حجمی، به دلیل سبک بودن گرافیت چگالی نسبی کاهش یافت و به ۹۷/۵ درصد رسید. نتایج سختی سنجی نشان داد که سختی این کامپوزیت‌ها با افزودن ۲ و ۴ درصد حجمی گرافیت افزایش یافته و از ۴۵/۶ راکول سی به ۵۷/۷ راکولسی رسیده است. اما با افزودن ۶ درصد حجمی گرافیت، سختی کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا-گرافیت اندکی کاهش پیدا کرد و از ۵۷/۷ راکولسی به ۵۴/۶ راکول رسید. به کمک اندازه‌گیری طول ترک‌های ایجاد شده در آزمون سختی، چقرمگی شکست محاسبه گردید. در کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا حاوی ۴ و ۶ درصد حجمی گرافیت، چقرمگی شکست افزایش یافت. حضور گرافیت نرم در زمینه، ضریب اصطکاک را کاهش داد و سبب بهبود مقاومت به سایش کامپوزیت‌ها گردید.

**کلمات کلیدی:** زیرکونیا-آلومینا، گرافیت، سختی، چقرمگی شکست، سایش.

### مقدمه

سرامیک‌های زیرکونیا پلی کریستالی چهار وجهی به دلیل استحکام و سختی بالا، مقاومت در برابر سایش عالی، زیست سازگاری و مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌های فناوری‌های کلیدی مانند یاتاقان‌ها، غلتک‌ها، قالب‌ها، دریچه‌ها، انژکتورهای سوخت، ترمیم‌های دندانی و پروتزهای ران استفاده می‌شوند [۱]. برای گسترش بیشتر کاربردهای این سرامیک‌ها در شرایط عملیاتی تحت بارگذاری شدید، لازم است خواص مکانیکی آنها به ویژه چقرمگی شکست افزایش یابد. در تحقیقات اخیر، پژوهشگران ساز و کارهای مختلفی را برای افزایش چقرمگی و استحکام سرامیک‌ها پیشنهاد کرده‌اند، مانند چقرمه کردن با الیاف‌های استحکام بالا [۲]، چقرمه کردن از طریق ذرات پراکنده و چقرمه کردن از طریق کامپوزیت لایه‌ای [۳]. برخی از ساز و کارهای چقرمه شدن در سرامیک‌ها عبارتند از: پل‌زدن ترک، انحراف ترک، انشعاب ترک و ریزترک [۴]. علاوه بر این، محققان از ذرات ریز (میکرو/نانو) نیز برای بهینه‌سازی خواص مکانیکی در سرامیک‌ها استفاده کرده‌اند [۵]. علاوه بر این، از افزودنی‌های تقویت‌کننده دیگری مانند ویسکرهای سیلیسیوم [۶]، نانولوله‌های کربنی [۷] و ورقه‌های گرافن [۸] در سرامیک‌ها استفاده شده است. به طوری که کلاسن و همکاران [۹] دریافتند که هم استحکام خمشی در دمای بالا و هم چقرمگی شکست سرامیک‌های زیرکونیا پلی کریستال با افزودن ویسکرهای سیلیسیوم تا ۳۰ درصد حجمی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که در آن چقرمه شدن ویسکر و تغییر فاز به طور همزمان در کامپوزیت‌ها رخ می‌دهد. از طرف دیگر، تفجوشی فرآیند کلیدی چگالش و رشد دانه مواد سرامیکی است که نقش مهمی در ریزساختار نهایی و خواص مکانیکی دارد. در سه دهه گذشته، تفجوشی بدون فشار،



تفجوشی به کمک فشار و تفجوشی به کمک میدان به تدریج ظهور کرده‌اند [۱۰]. در سال‌های اخیر یک روش تفجوشی جدید به نام تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای توسعه یافته است. استفاده از این روش برای تفجوشی سرامیک‌های زیرکونیا [۱۱]، نیتريد سيليسیوم [۱۲]، آلومینا [۱۳]، کامپوزیت‌های آلومینا-سیلیسیوم [۱۴]، سرامیک‌های مبتنی بر سیلیسیوم [۱۵] و کاربرد تنگستن-کبالت [۱۶] روز به روز در حال گسترش است. روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای می‌تواند به طور مؤثری به کاهش عیوب، بهبود چگالی و تراکم کامپوزیت‌ها، تسهیل لغزش مرزدانه و انتقال جرم، تسهیل تغییر شکل پلاستیک، جلوگیری از رشد دانه‌ها و بهبود خواص مکانیکی چنین کامپوزیت‌هایی کمک کند. در این پژوهش، کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا-گرافیت با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد حجمی گرافیت به روش اسپارک پلازما زینترینگ<sup>۱</sup> ساخته شدند و تأثیر میزان گرافیت بر خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها با جزئیات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### روش تحقیق

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق شامل پودرهای  $\alpha$ -آلومینا با چگالی ۳/۹۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، زیرکونیای مونوکلینیک با چگالی ۵/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و گرافیت می‌باشد. پودر  $\alpha$ -آلومینا با میانگین اندازه ذرات ۱ میکرون تهیه شد. پودر زیرکونیای مونوکلینیک نیز با میانگین اندازه ذرات ۵ میکرون تهیه شد. از پودر نیتريد بور برای پوشش دادن سطح قالب گرافیتی استفاده شد. برای تولید کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا-گرافیت در ابتدا پودرها مطابق آنچه در جدول (۱) آورده شده است با هم مخلوط شدند.

جدول ۱: نحوه ترکیب پودرهای زیرکونیا، آلومینا و گرافیت برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی.

شماره نمونه	آلومینا (درصد وزنی)	زیرکونیا (درصد وزنی)	گرافیت (درصد حجمی)
۱	۲۰	۸۰	۰
۲	۲۰	۸۰	۲
۳	۲۰	۸۰	۴
۴	۲۰	۸۰	۶

سپس هر کدام از ترکیب‌ها با آسیاکاری سیاره‌ای به مدت ۱۲۰ دقیقه با سرعت ۳۵۰ دور بر دقیقه کاملاً مخلوط شدند (آسیاکاری خشک) تا توزیع یکنواختی از پودرها ایجاد شود. جنس کاپ‌ها، پلی‌اتیلن، گلوله‌ها، اکسید زیرکونیوم و نسبت وزن گلوله‌ها به پودر ۱۰ به ۱، بود. در مرحله بعد مقدار ۵۰ گرم پودر آسیاکاری شده از هر ترکیب به طور جداگانه درون قالب گرافیتی استوانه‌ای شکل به قطر داخلی ۳۰ میلی‌متر از جنس گرافیت و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر قرار داده شد. همچنین از دو عدد سنبه به قطر ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰ میلی‌متر برای فشردن پودر در قالب استفاده شد. جهت تفجوشی پودرهای کامپوزیتی، پودرهای آماده‌سازی شده، با دستگاه اسپارک پلازما زینترینگ مدل SPS-20T-10 تحت تفجوشی قرار گرفتند. فرآیند تفجوشی در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، زمان ۵ دقیقه و فشار ۳۰ مگاپاسکال انجام شد. آماده‌سازی سطحی نمونه‌های تفجوشی شده توسط سنباده‌زنی با کاغذ سنباده‌های شماره ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ و سپس پولیش کاری به کمک پودر آلومینا با اندازه ذرات ۱ میکرون انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری نمونه‌های تفجوشی شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. همچنین برای اندازه‌گیری طول ترک‌های احتمالی ایجاد شده پس از آزمون سختی سنجی نیز از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید.

<sup>1</sup> Spark plasma sintering (SPS)



به منظور بررسی مقاومت سایشی نمونه‌های تفجوشی شده، از دستگاه آزمون سایش پین بر روی دیسک استفاده گردید. سرعت چرخش ۰/۱۱ متر بر ثانیه، بار عمودی وارد شده ۳ کیلوگرم، شعاع دایره چرخش پین، ۱ سانتی‌متر و مسافت کل طی شده ۵۰۰ متر انتخاب شد. پین ساینده از جنس فولاد بلبرینگ عملیات حرارتی شده با سختی ۶۰ راکول سی، قطر ۵ میلی‌متر ارتفاع ۳ سانتی‌متر و شعاع نوک پین ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد. نرخ سایش نمونه‌ها به صورت نسبت ضریب اصطکاک به مسافت طی شده، ارائه شد. سختی نمونه‌ها به روش راکول سی براساس استاندارد ASTM E8 انجام شد. برای این منظور ابتدا سطح نمونه‌ها با پودر آلومینا پولیش شد و از ۵ ایندنت سالم برای تعیین سختی استفاده گردید. چقرمگی شکست نمونه‌ها به روش اندازه‌گیری مستقیم طول ترک ایجاد شده (ناشی از فرو رونده راکول سی) برآورد شد. برای ایجاد ترک یک وزنه ۱ کیلوگرم با فرو رونده ویکرز روی نمونه‌ها بارگذاری گردید و سپس ترک‌های ایجاد شده با میکروسکوپ نوری بررسی و طول آنها اندازه گرفته شد. سرانجام از رابطه انستیس<sup>۱</sup> رابطه (۱) برای محاسبه چقرمگی شکست با اندازه‌گیری طول ترک استفاده شد [17]:

$$K_{IC} = 0.016 \left[ \frac{E}{H_V} \right]^{1/2} \left[ \frac{P}{C^{3/2}} \right] \quad (1)$$

که در آن،  $E$  مدول کشسان برحسب گیگاپاسکال،  $H_V$  سختی ویکرز برحسب گیگاپاسکال،  $P$  نیروی فرو رونده بر حسب نیوتن،  $C$  میانگین طول ترک‌ها با واحد میلی‌متر و  $K_{IC}$  چقرمگی شکست بر حسب مگاپاسکال در جذر متر است.

## نتایج و بحث

شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> از کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا با مقادیر مختلف گرافیت را نشان می‌دهد. طبق تصاویر، با اعمال فشار در طی فرآیند اسپارک پلاسما زینترینگ لایه‌های گرافیت با جهت‌گیری مختلف، بین دانه‌های زمینه توزیع شده‌اند. بر اساس یافته‌های محققان می‌توان دریافت که نواحی سیاه رنگ و نوارهای بلند و باریک در تصاویر شکل (۱) گرافیت می‌باشند اما مناطق ریز کروی ممکن است تخلخل باشند. برای قطعی بودن نتایج ارائه شده از آنالیز عنصری طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شد که نتایج آن در شکل (۲) آورده شده است. هر چند به دلیل سبک بودن کربن، نتایج آنالیز عنصری آن با اندکی خطا همراه است، اعداد مربوط به عنصر کربن می‌تواند بیانگر حضور گرافیت در کامپوزیت‌ها باشد.

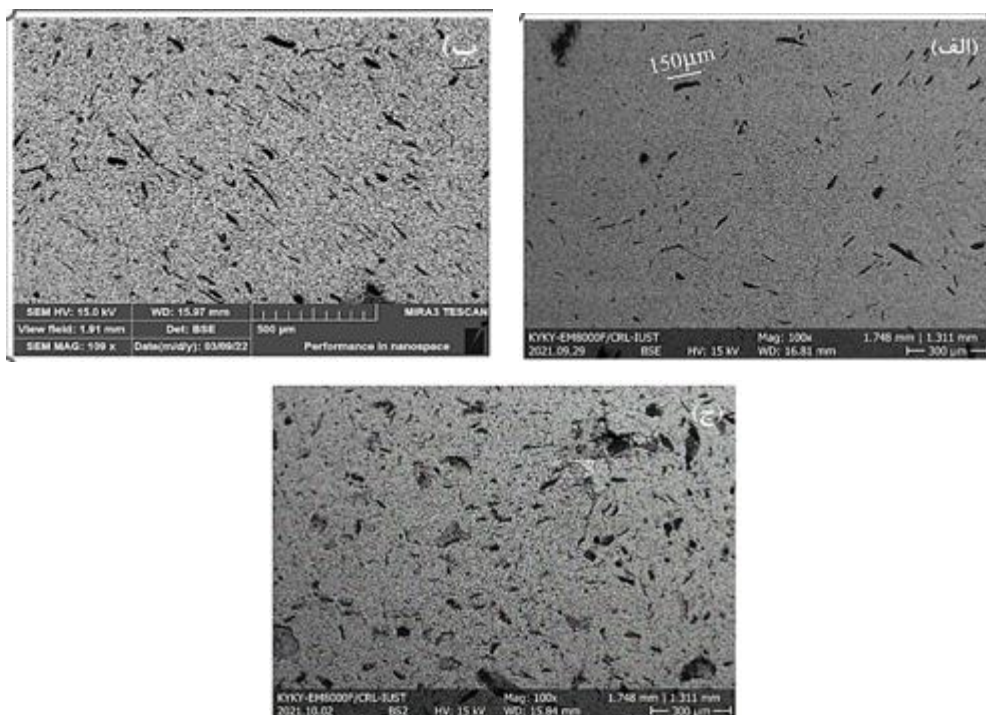
تغییرات چگالی نسبی کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا با و بدون افزودنی گرافیت در شکل (۳) آورده شده است. چگالی بالای کامپوزیت‌ها نشان دهنده مناسب بودن پارامترهای انتخاب شده در روش اسپارک پلاسما زینترینگ برای تفجوشی کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا و کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا-گرافیت می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که چگالی نسبی نمونه زیرکونیا-آلومینا خالص ۹۸/۵ درصد است که با افزودن ۴ درصد حجمی گرافیت، این مقدار ۱ درصد افزایش یافته و به ۹۹/۵ درصد رسیده است؛ دلیل این اتفاق حضور فاز زیرکونیا-مونوکلینیک می‌باشد که منجر به افزایش چگالی نسبی نمونه‌ها می‌شود؛ اما با افزایش میزان گرافیت و رسیدن به ۶ درصد حجمی چگالی نسبی کاهش یافته و به ۹۷/۵ درصد می‌رسد. بنابراین می‌توان دریافت که حد بهینه‌ای از گرافیت برای افزایش چگالی کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا وجود دارد. در شکل (۴) تأثیر میزان گرافیت بر سختی راکول سی کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا-گرافیت آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سختی این کامپوزیت‌ها با افزودن ۲ و ۴ درصد حجمی گرافیت افزایش یافته و به ۵۷/۷ راکول سی رسیده است.

<sup>1</sup>Anstis

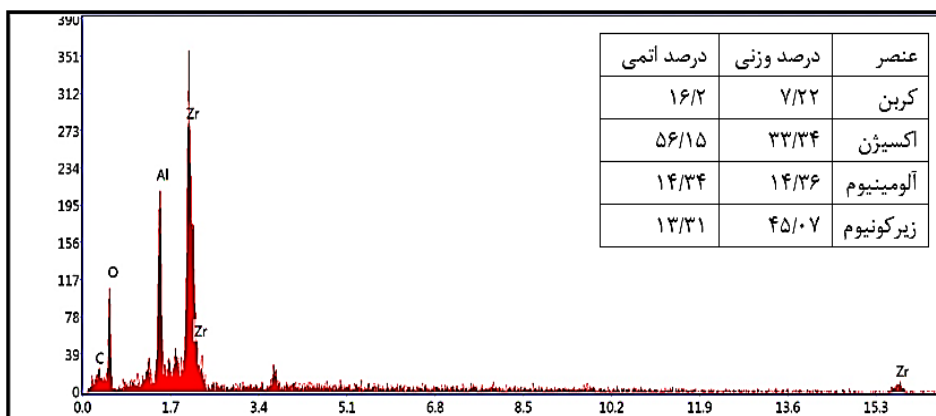
<sup>2</sup> Scanning electron microscope (SEM)



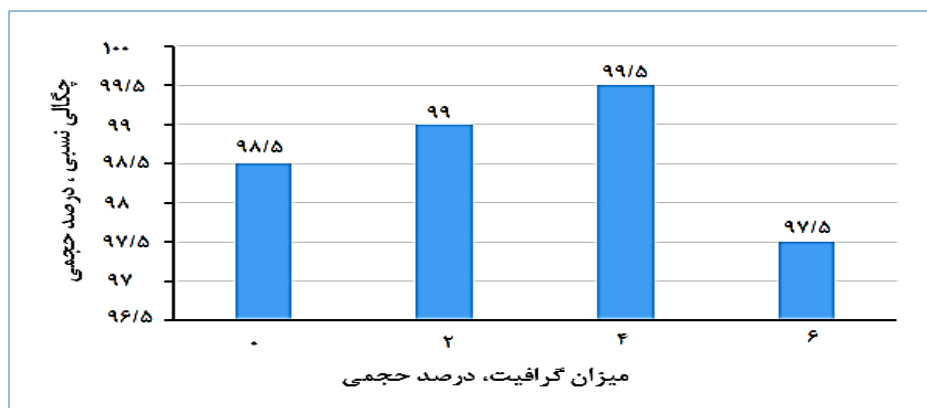
در حین تفجوشی، ذرات گرافیت در مرزدانه‌های کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا-گرافیت قرار می‌گیرند و از رشد دانه‌ها در دماهای بالا جلوگیری می‌کنند. این اتفاق باعث می‌شود در حین تفجوشی رشد بی‌رویه دانه‌ها و به دنبال آن افت خواص مکانیکی کامپوزیت متوقف گردد. از طرف دیگر با افزودن ۶ درصد حجمی گرافیت، سختی کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا-گرافیت اندکی کاهش پیدا می‌کند و از ۵۷/۷ راکول سی به ۵۴/۶ راکول سی می‌رسد. این اتفاق می‌تواند ناشی از نرم بودن ذرات گرافیت و همچنین کلوخه شدن آنها در زمینه زیرکونیا-آلومینا باشد.



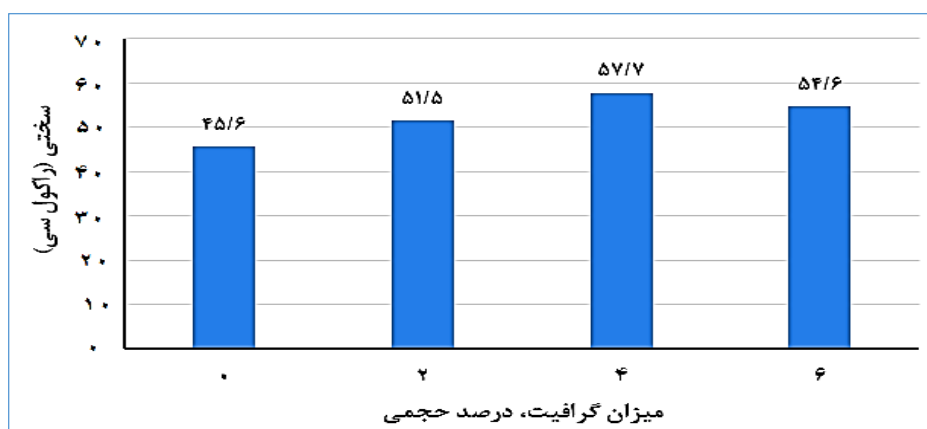
شکل ۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا با مقادیر مختلف گرافیت؛ الف) ۲ درصد حجمی (ب) ۴ درصد حجمی و ج) ۶ درصد حجمی.



شکل ۲: نتایج آنالیز عنصری کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا حاوی ۲ درصد حجمی گرافیت

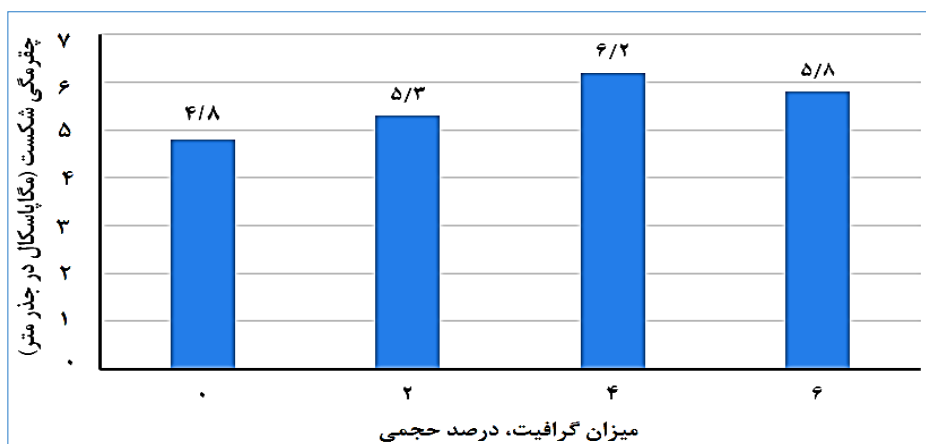


شکل ۳: چگالی نسبی کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا با و بدون افزودنی گرافیت



شکل ۴: تأثیر درصد حجمی گرافیت بر سختی راکول سی کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا-گرافیت

چقرمگی شکست نمونه‌ها با اندازه‌گیری طول ترک ایجاد شده در گوشه‌های فرورنده ویکرز با نیروی ۱ کیلوگرم محاسبه شد. مطابق شکل (۵) نمونه‌هایی که سختی و چگالی بیشتری (تخلخل کمتر) دارند چقرمگی شکست آنها بیشتر است. همان‌طور که پیشتر گفته شد در کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا حاوی ۲ و ۴ درصد حجمی گرافیت بیشترین چگالی وجود دارد و با افزودن ۶ درصد حجمی گرافیت چگالی کاهش می‌یابد؛ مطابق انتظار در کامپوزیت حاوی ۴ درصد حجمی گرافیت بیشترین چقرمگی شکست به آمده است و با افزودن ۶ درصد حجمی گرافیت اندکی کاهش یافته است.

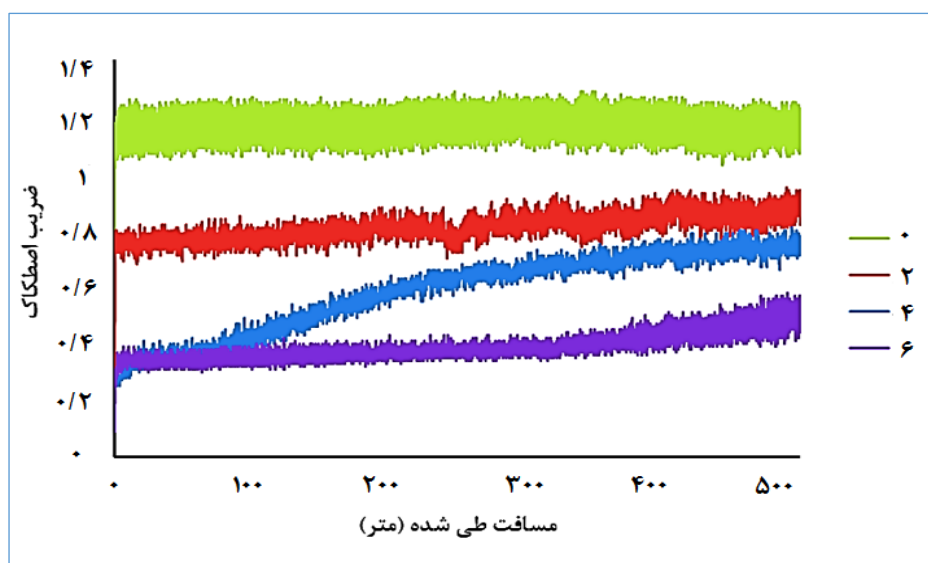


شکل ۵: نمودار چقرمگی شکست کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا حاوی مقادیر مختلف گرافیت



شکل (۶) تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا خالص و با افزودنی گرافیت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا که فاقد گرافیت است بیشترین و کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا-گرافیت حاوی ۶ درصد حجمی گرافیت کمترین ضریب اصطکاک را دارند که این موضوع بیانگر تأثیر مثبت گرافیت بر مقاومت به سایش کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا می‌باشد. در کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا-گرافیت به دلیل حضور گرافیت نرم در زمینه، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.

در حین سایش، ورقه‌های گرافیت از درون کامپوزیت خارج می‌شوند، بر روی سطح آسیب دیده پخش می‌شوند و می‌چسبند و باعث ایجاد یک لایه روان کننده روی سطح سایش می‌گردند. لایه روان کننده از تماس بین جسم ساینده (ساجمه دستگاه سایش) و سطح نمونه جلوگیری می‌کند. در واقع می‌توان گفت لایه روان کننده باعث کاهش ضریب اصطکاک و سرعت سایش می‌شود و سطح ساییده شده را از سایش بیشتر محافظت می‌کند.



شکل ۶: تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا بدون گرافیت و با مقادیر مختلف افزودنی گرافیت

### نتیجه‌گیری

- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ورقه‌های گرافیت به طور همگن و یکنواخت در سراسر کامپوزیت‌ها توزیع شده‌اند.
- با افزودن ۲ و ۴ درصد حجمی گرافیت چگالی نسبی کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا افزایش و با افزودن ۶ درصد حجمی گرافیت، کاهش یافت.
- کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا ساخته شده با ۴ درصد حجمی گرافیت بیشترین و کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا کمترین سختی را داشتند.
- کامپوزیت‌های زیرکونیا-آلومینا حاوی ۴ و ۶ درصد حجمی بیشترین چقرمگی شکست را داشت.
- کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا خالص بیشترین و کامپوزیت زیرکونیا-آلومینا حاوی ۶ درصد حجمی گرافیت کمترین ضریب اصطکاک را داشتند.





## مراجع

- [1] Yang, C.C.T., Wei, W.C.J., (2000). Effects of material properties and testing parameters on wear properties of fine-grain zirconia (TZP), *Wear*, 242, pp 97–104.
- [2] Lin, J., Huang, Y., Zhang, H., (2015). Damage resistance, R-curve behavior and toughening mechanisms of ZrB<sub>2</sub>-based composites with SiC whiskers and ZrO<sub>2</sub> fibers, *Ceram. Int.*, 41, pp 2690–2698.
- [3] Liu, J., Yan, H.X., Reece, M.J., Jiang, K., (2012). Toughening of zirconia/alumina composites by the addition graphene platelets, *Journal of the European Ceramic Society*, 32(16), pp 4185–4193.
- [4] Parchovianský, M., Balko, J., Švančárek, P., Sedláček, J., Dusza, J., Lofaj, F., Galusek, D., (2017). Mechanical properties and sliding wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC nanocomposites with 3-20 vol% SiC, *Journal of the European Ceramic Society*, 37(14), pp 4297–4306.
- [5] Zhang, F., Vanmeensel, K., Inokoshi, M., Batuk, M., Hadermann, J., (2015). Critical influence of alumina content on the low temperature degradation of 2-3 mol% yttria-stabilized TZP for dental restorations, *Journal of the European Ceramic Society*, 35(2), pp 741–750.
- [6] Liu, X., Liu, H., Huang, C., Wang, L., Zou, B., Zhao, B., (2016). Synergistically toughening effect of SiC whiskers and nanoparticles in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based composite ceramic cutting tool material, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 29, pp 977–982.
- [7] Yazdani, B., Xia, Y., Ahmad, I., Zhu, Y., (2015). Graphene and carbon nanotube (GNT)-reinforced alumina nanocomposites, *Journal of the European Ceramic Society*, 35(1) pp 179–186.
- [8] Munozferreiro, C., Moralesrodriguez, A., Rojas, T.C., Jimenezpique, E., Lopezpernia, C., Poyato, R., Gallardolopez, A., (2019). Microstructure, interfaces and properties of 3YTZP ceramic composites with 10 and 20 vol% different graphene-based nanostructures as fillers, *Journal of Alloys and Compounds*, 777, pp 213–224.
- [9] Claussen, N., Weisskopf, K.L., Rühle, M., (1986). Tetragonal zirconia polycrystals reinforced with SiC whiskers, *Journal of the American Ceramic Society*, 69(3), pp 288–292.
- [10] Casellas, D., Feder, A., Llanes, L., Anglada, M., (2001). Fracture toughness and mechanical strength of Y-TZP/PSZ ceramics, *Scripta Mater*, 45(2), pp 213–220.
- [11] Li, S., Wei, C., Wang, P., Gao, P., Zhou, L., Wen, G., (2020). Fabrication of ZrO<sub>2</sub> whisker modified ZrO<sub>2</sub> ceramics by oscillatory pressure sintering. *Ceramics International*, 46(11), pp 17684-17690.
- [12] Li, S., Wei, C., Zhou, L., Wang, P., Wang, W., (2019). Microstructure and fracture strength of silicon nitride ceramics consolidated by oscillatory pressure sintering. *Ceramics International*, 45(12), pp 15671-15675.
- [13] Han, Y., Li, S., Zhu, T., Wu, W., An, D., Xie, Z., (2018). Enhanced properties of pure alumina ceramics by oscillatory pressure sintering. *Ceramics International*, 44(5), pp 5238-5241.
- [14] Zhu, T., Xie, Z., Han, Y., Li, S., An, D., Luo, X., (2017). Improved mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-25 vol% SiCw composites prepared by oscillatory pressure sintering. *Ceramics International*, 43(17), pp15437-15441.
- [15] Li, S., Luo, X., Zhao, L., Wei, C., Gao, P., Wang, P., (2020). Crack tolerant silicon carbide ceramics prepared by liquid-phase assisted oscillatory pressure sintering. *Ceramics International*, 46(11), pp 18965-18969.
- [16] Zhu, T., Zhang, J., An, D., Xie, Z., Li, Y., Sang, S., Dai, J., (2020). Oscillatory pressure sintering: A new method for preparing WC-Co cemented carbides. *Journal of Alloys and Compounds*, 816, p 152521.
- [17] Stanley, L. R., Elizabeth, J. O., Michael, C. H., James, D. K., Mrityunjay, S., Jonathan, A. S., (2002). Evaluation of ultra-high temperature ceramics for aero propulsion use, *Journal of the European Ceramic Society*.