

## بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات کاربید سیلیسیم بر خواص مکانیکی و سطحی نانوکامپوزیت Al/SiC<sub>p</sub> تولید شده به روش متالورژی پودر

حسن شریفی<sup>۱\*</sup>، حسین رفیعی<sup>۱</sup>، حمید غیور<sup>۲</sup> و مهدی علیزاده<sup>۳</sup>

- ۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
- ۲- مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران
- ۳- پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، کرج، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۴/۰۲/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۴/۰۴/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۰۵/۱۲

### چکیده

هدف از انجام این پژوهش، بررسی خواص مکانیکی و رفتار سایشی نانوکامپوزیت Al/SiC<sub>p</sub> در بارهای اعمالی مختلف و کسر حجمی‌های ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد از تقویت کننده نانوذرات کاربید سیلیسیم می‌باشد. بدین منظور نمونه‌ها در یک آسیا پر انرژی به مدت ۱ ساعت تحت اتمسفر آرگون و با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ آسیا شدند. جهت بررسی اثر بار اعمالی بر رفتار سایشی نمونه‌ها، آزمون سایش تحت بارهای ۳، ۸ و ۲۰ نیوتن در شرایط سرعت لغزش ۰/۱۱ m/s در دمای محیط و مسافت لغزش ۱۰۰۰ m قرار گرفت. نتایج نشان داد در تمامی بارهای اعمالی یکسان، نمونه‌های کامپوزیتی نرخ سایش کمتری نسبت به آلومینیم تقویت نشده دارند. همچنین افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده، باعث کاهش میزان نرخ سایش و ضریب اصطکاک نمونه‌های کامپوزیتی گردید که این شرایط برای نمونه Al-5vol%SiC از نمود بیشتری برخوردار می‌باشد. با توجه به تصاویر SEM در بار اعمالی ۳ نیوتن مکانیزم غالب سایش نمونه‌ها، خراشان و با افزایش نیرو این مکانیزم برای تمامی نمونه‌ها به جز نمونه Al-5vol%SiC به حالت چسبان تغییر پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نانوکامپوزیت، Al/SiC<sub>p</sub>، سایش، متالورژی پودر، SEM.

### ۱- مقدمه

کاربردی آنها می‌شود. انواع متنوعی از سرامیک‌ها به سبب خواص ویژه‌ای چون سختی بالا، مقاومت فشاری بالا و مقاومت به سایش خوب به عنوان تقویت کننده برای زمینه آلومینیم به کار می‌روند که از مهمترین و پرکاربردترین آنها می‌توان به ذرات SiC و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> اشاره کرد [۱-۴]. برخی دیگر از تقویت کننده‌های ذره‌ای معمول برای آلومینیم و آلیاژهای آن عبارتند از: AlN، TiC، ZrO<sub>2</sub>، B<sub>4</sub>C، Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>، BN و TaC [۵،۶]. روش‌های بسیار متنوعی مانند پودری و

آلومینیم به سبب دانسیته پایین، رسانایی حرارتی بالا، دمای ذوب نسبتاً پایین و شکل‌پذیری خوب از جمله مواد مطلوب برای بسیاری از کاربردهای مهندسی است، اما آلومینیم به تنهایی خواص تریبولوژیکی ضعیفی دارد. افزودن تقویت کننده‌های سرامیکی به آلومینیم باعث بهبود استحکام، افزایش مقاومت به سایش و حتی بالا بردن دمای

\* عهده‌دار مکاتبات: حسن شریفی

نشانی: شهرکرد، بلوار رهبر، دانشگاه شهرکرد

تلفن: ۰۲۸۳-۴۴۲۴۴۰۶، دورنگار: ۰۲۸۳-۴۴۲۴۴۳۸، پست الکترونیکی: sharifi@eng.sku.ac.ir

ذوبی، جهت تهیه کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی وجود دارد، اما اولین نیاز یک کامپوزیت برای داشتن کارایی لازم، توزیع یکنواخت فاز تقویت کننده در فاز زمینه است. متالورژی پودر روشی است که در آن توزیع ذرات بسیار یکنواخت و همگنی را می‌توان ایجاد کرد و به همین دلیل توجه ویژه‌ای به آن شده است [۷-۱۰]. کامپوزیت‌های آلومینیمی با تقویت کننده غیرپیوسته به دلیل خواص مطلوبی همچون دانسیته پایین، سفتی ویژه بالا، کاهش ضریب انبساط حرارتی، بهبود مقاومت به سایش و خستگی و نیز قیمت پایین بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع باعث شده که کاربردهای بسیار وسیعی در صنایع پیشرفته همچون هوافضا، خودروسازی، دفاعی و حتی ورزشی مورد استفاده قرار گیرند [۱۱-۱۴]. مقاومت سایشی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیم توسط بسیاری از محققین مورد بررسی قرار گرفته است، اما قیاس بین نتایج آنها ممکن نیست. علت این مسئله آن است که مقاومت در برابر اصطکاک و سایش جزو خواص ذاتی ماده نبوده و بسته به شرایط از جمله بار اعمالی، دمای محیط، سرعت لغزش، نوع و درصد حجمی تقویت کننده تغییر می‌کند. در تقویت نمودن آلیاژهای آلومینیم با ذرات سرامیکی، دیده شده که عمدتاً رفتار سایشی ماده بهبود می‌یابد. اگر تقویت کننده به خوبی با زمینه پیوند داشته باشد، نرخ سایش توسط نرخ سایش تقویت کننده کنترل می‌شود و عمدتاً افزایش کسر حجمی تقویت کننده باعث کاهش نرخ سایش کامپوزیت می‌گردد [۱۵]. بار اعمالی در هنگام فرآیند سایش، کنترل کننده میزان تغییر شکل پلاستیک در نقاط تماس زبری‌های سطوح سایشی است. بنابراین، در صورتی که میزان بار اعمالی ناچیز باشد، این تغییر شکل در حد الاستیک باقیمانده و سایش ایجاد شده احتمالاً بر اثر خستگی است. با این حال با افزایش میزان بار اعمالی، میزان سایش نیز بیشتر می‌شود [۱۶]. Bauri و همکارانش در بررسی اثر بار اعمالی بر نرخ سایش کامپوزیت Al-Li/SiC دریافتند که نرخ سایش پس از رسیدن بار به یک حد معین، به شدت افزایش می‌یابد. آنها افزایش ناگهانی ضریب اصطکاک و نرخ سایش با افزایش بار، از یک بار بحرانی را به گذار از سایش ملایم به سایش شدید مرتبط دانسته‌اند [۱۷]. Qutub و همکارانش بر پایه مطالعات خود اعلام کرده‌اند که در کامپوزیت

Al6061/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در فرسایش ملایم اثرات سایش خراشان به چشم می‌خورد در حالی که بر این نمونه‌های در حال گذر، مکانیزم حاکم لایه لایه شدن و در مورد نمونه‌های ساییده شده با نیروی بالا، مکانیزم غالب چسبندگی است [۱۸]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روند افزایش سایش با افزایش بار اعمالی را می‌توان با مکانیزم تشکیل مناطق تغییر شکل پلاستیک یافته در لایه‌های زیر سطح سایش توضیح داد. در بارهای کم این مناطق محدود و کوچک بوده و سایش ملایم است اما با افزایش بار، این مناطق افزایش می‌یابند و در تعامل با یکدیگر سبب سایش شدید می‌شوند [۱۹]. در این پژوهش ابتدا نانوکامپوزیت Al/SiC<sub>p</sub> به روش متالورژی پودر تهیه شده و در ادامه اثر کسر حجمی فاز تقویت کننده بر سایش خشک این گروه از نانوکامپوزیت‌ها در بارهای اعمالی مختلف پرداخته می‌شود.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

در این پژوهش از پودر آلومینیم با خلوص ۹۹/۷٪ با متوسط اندازه ذرات ۴۵ μm ساخت شرکت متالورژی پودر خراسان به‌عنوان زمینه و از نانوپودر بتا SiC با ساختار مکعبی و با خلوص ۹۹/۹۹٪ با متوسط اندازه ذرات ۴۵ nm ساخت شرکت USnano به عنوان فاز تقویت کننده استفاده شد. شکل ۱ و ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیز EDX آلومینیم و SiC را نشان می‌دهد. نمونه‌های کامپوزیتی در کسر حجمی های ۰، ۱، ۳ و ۵ درصد نانو کاربرد سیلیسیم به روش متالورژی پودر در آسیا پراورزی تهیه گردیدند. آسیاکاری نمونه‌ها در یک آسیا سیاره‌ای پر انرژی مدل MPM-4\*350 با ۲۵۰ دور در دقیقه و نسبت وزنی پودر به گلوله ۱۰:۱ با گلوله‌های فولادی زنگ‌نزن ضد سایش و تحت آتمسفر گاز خنثی آرگون با خلوص ۹۹/۹۹٪ به مدت ۱ ساعت انجام شد. همچنین به دلیل چسبندگی ذرات آلومینیم به گلوله‌ها از اسید استئاریک به میزان ۱٪ استفاده گردید. بررسی ساختار محصولات نیز به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) مدل (Philips-XLS) انجام گرفت. نمونه‌ها در یک قالب یک طرفه و تحت فشار ۵۰۰ MPa فشرده شده و در یک کوره لوله‌ای تحت آتمسفر

آرگون مدل TF5/40-1500 ساخت شرکت آذر کوره ایران به مدت ۲ ساعت در دمای °C ۶۱۰ تفجوشی شدند. جهت بررسی و اندازه‌گیری سختی نمونه‌های کامپوزیتی، از دستگاه سختی‌سنج Universal شرکت البرز کوشا استفاده گردید. سختی نمونه‌ها در مقیاس راکول B و بر اساس استاندارد ASTM (E18-03) اندازه‌گیری شد.

رفتار سایشی نمونه‌ها، با استفاده از آزمون سایش و با دستگاه پین روی دیسک متحرک با قابلیت اعمال دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون با نمونه‌های دیسکی شکل به ضخامت ۵ mm و قطر ۴۰ mm با پین ساینده به ارتفاع ۵۰ mm و قطر ۵ mm با سطح تماس ۳ mm از جنس فولاد ۵۲۱۰۰ با سختی R<sub>C</sub> ۶۴ انجام شد. جهت بررسی اثر بار اعمالی بر رفتار سایشی نمونه‌ها، این آزمون در نیروهای ۳، ۸ و ۲۰ نیوتن انجام گردید. این نیروها با انجام آزمایش‌های اولیه و تست بارپذیری انتخاب شدند. جدول ۱ بیان‌گر شرایط تست سایش نمونه‌ها می‌باشد. برای انجام این آزمون مسافت سایش ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شد که نمونه‌ها در پایان هر ۲۰۰ m توزین شده و کاهش وزن نمونه‌ها حاصل و نرخ سایش آنها طبق رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$(1) \quad \text{نرخ سایش} = \frac{\text{کاهش وزن}}{\text{مسافت طی شده}}$$

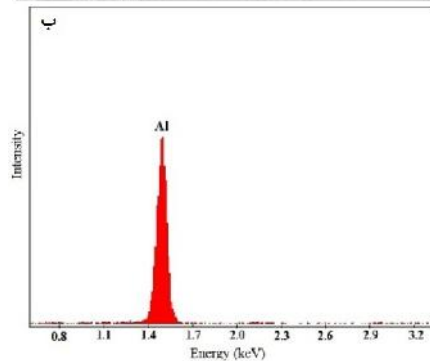
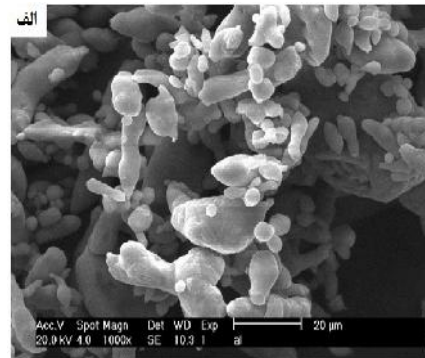
جدول ۱: شرایط تست سایش نمونه‌ها.

۰/۱۱	سرعت خطی (m/s)
۱۰۰۰	مسافت (m)
۲۳	دما (°C)
۶۰	٪رطوبت
۱۵	شعاع سایش (mm)

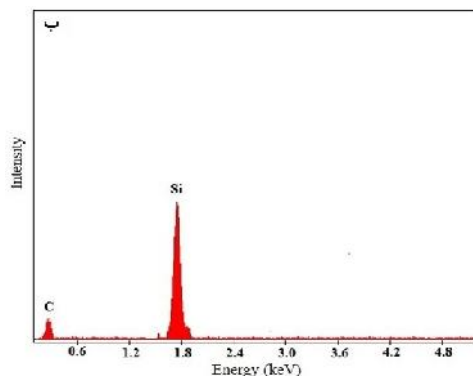
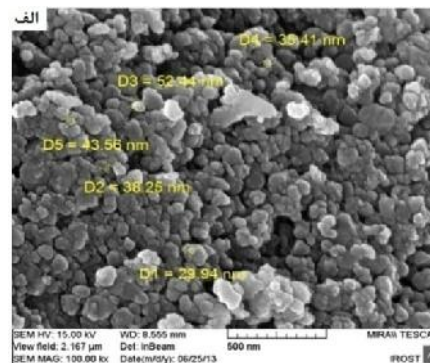
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ریز ساختار

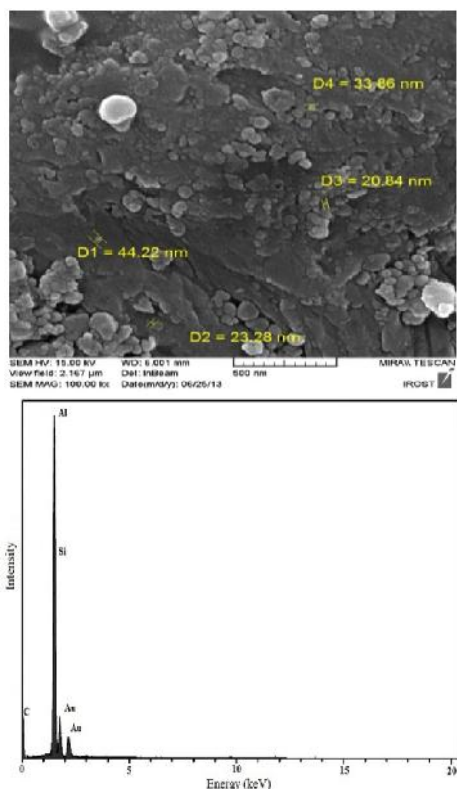
شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب ریزساختار نانوکامپوزیت‌های Al-1%SiC، Al-3%SiC و Al-5%SiC را به همراه آنالیز EDS آنها را نشان می‌دهد.



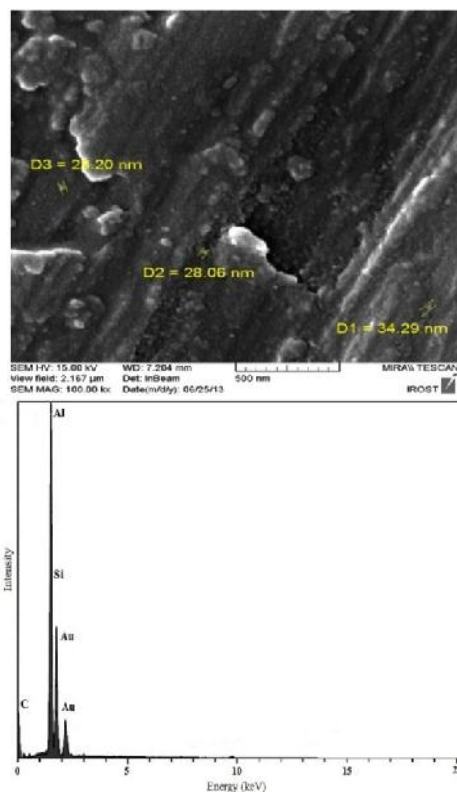
شکل ۱: الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر آلومینیوم و ب) آنالیز EDS از آن.



شکل ۲: الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر SiC و ب) آنالیز EDS از آن.

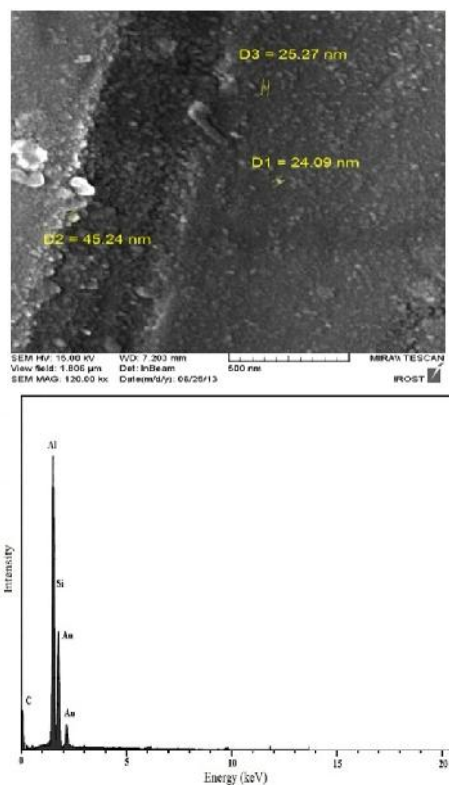


شکل ۵: تصویر ریزساختار کامپوزیت Al-5%SiC به همراه آنالیز EDS.



شکل ۳: تصویر ریزساختار کامپوزیت Al-1%SiC به همراه آنالیز EDS.

یکی از مزایای کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تهیه شده به روش متالورژی پودر، توزیع پیوسته و یکنواخت فاز تقویت کننده در زمینه است، به ویژه در بحث نانوکامپوزیت‌ها که توزیع فاز تقویت کننده به صورت همگن مشکل است. با استفاده از روش متالورژی پودر می‌توان به توزیع یکنواختی از فاز تقویت کننده دست یافت. این توزیع یکنواخت و پیوسته از فاز تقویت کننده می‌تواند بر بهبود خواص مکانیکی حاصل شده، موثر واقع شود [۸]. تصاویر مربوط به ریزساختار کامپوزیت‌های ساخته شده، گویای آن است که نانوذرات SiC توزیع یکنواخت و تقریباً همگنی را در بین ذرات آلومینیم داشته و پدیده توده‌ای شدن نانوذرات SiC که در بحث فناوری نانو یک امر طبیعی و ناخواسته است در اینجا کمتر مشاهده می‌شود. البته باید به این موضوع نیز اشاره داشت که با افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC، میل به توده‌ای شدن نانوذرات SiC بیشتر می‌شود و همان‌طور که در تصاویر ریزساختاری کامپوزیت‌ها مشخص است، کامپوزیت با ۵٪ نانو SiC، دارای نواحی توده‌ای شده بیشتری است.

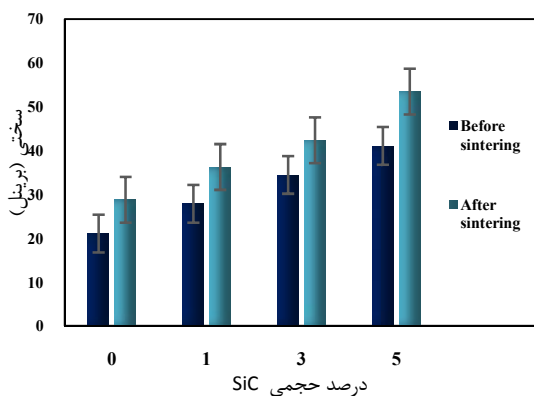


شکل ۴: تصویر ریزساختار کامپوزیت Al-3%SiC به همراه آنالیز EDS.

کامل تخلخل‌ها و حفرات در نمونه‌های ساخته شده به روش متالورژی پودر بسیار مشکل است و بیشتر سعی بر کم کردن تخلخل‌ها و افزایش درصد تراکم نمونه‌ها است.

### ۳-۲- سختی سنجی

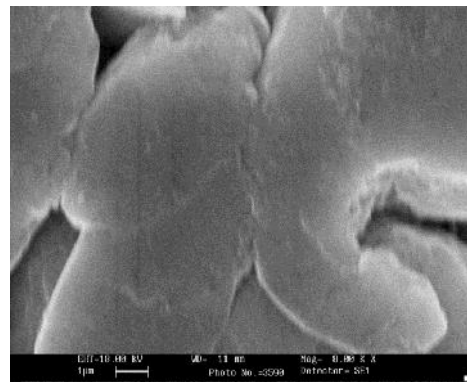
شکل ۷ سختی نمونه‌های کامپوزیتی و آلومینیم تقویت نشده را قبل و بعد از فرآیند تفجوشی نشان می‌دهد. نکته بارز در این شکل، افزایش سختی نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با آلومینیم تقویت نشده، قبل و بعد از فرآیند تفجوشی است.



شکل ۷: تغییرات میزان سختی قبل و بعد از فرآیند تفجوشی.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده، سختی نمونه‌ها (چه قبل و بعد از فرآیند تفجوشی) افزایش می‌یابد. در مورد این پدیده باید توضیح داد که آلومینیم و کاربید سیلیسیم، در مقیاس موس به ترتیب دارای سختی ۲/۷۴ و ۹/۴ هستند. بدیهی است که با افزودن نانوذرات SiC به آلومینیم، سختی کامپوزیت تهیه شده در مقایسه با آلومینیم تقویت نشده افزایش می‌یابد که این افزایش سختی با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده نیز بیشتر می‌شود. نکته قابل مشاهده دیگر، افزایش سختی تمامی نمونه‌ها، اعم از آلومینیم تقویت نشده و نمونه‌های کامپوزیتی، بعد از فرآیند تفجوشی است. همان‌طور که در شکل ۷ قابل ملاحظه است، سختی نمونه آلومینیم تقویت نشده بعد از فرآیند تفجوشی ۳۶٪ افزایش داشته است. همچنین سختی نمونه‌های Al-1%SiC، Al-3%SiC و Al-5%SiC بعد از فرآیند تفجوشی به ترتیب ۳۰ و ۲۲ و ۳۱ درصد

با توجه به آنالیز EDS که برای نانوکامپوزیت‌های با کسر حجمی‌های مختلف نشان داده شده است، مشخص است که نمونه‌ها آنالیز تقریباً ثابتی داشته و دارای پیک‌های یکسانی هستند. پیک Al گویای وجود این فاز و پیک‌های Si و C نشان دهنده وجود نانوذرات SiC است. نکته قابل توجه این آنالیزها، عدم وجود عناصر ناخواسته به ویژه اکسیژن است که نشان می‌دهد اثری از فاز اکسید آلومینیم وجود ندارد و کامپوزیت از شرایط ترکیبی بسیار مناسبی برخوردار است، چرا که جلوگیری از اکسید شدن کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی در حین فرآیند ساخت، یک امر بسیار دشوار است. قابل ذکر است که فاز مضر  $Al_4C_3$  در نمونه‌ها وجود ندارد، چرا که حداقل دما برای تشکیل این فاز  $727/8^\circ C$  است [۲۱] و با توجه با دمای تفجوشی نمونه‌ها ( $610^\circ C$ )، تشکیل این فاز از نظر ترمودینامیکی غیرممکن است. یکی از موارد مهم در ساخت کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی به روش متالورژی پودر، اتصال و پیوند ذرات آلومینیم و ایجاد زمینه یکنواخت و یکپارچه است. شکل ۶ تصویر میکروسکوپی از اتصال ذرات آلومینیم به یکدیگر را برای نمونه Al-5%SiC را نشان می‌دهد.



شکل ۶: تصویر میکروسکوپی از ذرات آلومینیم در کامپوزیت Al-5%SiC.

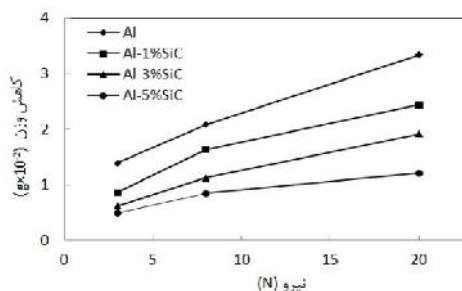
همان‌گونه که در شکل مشخص است، ذرات پودر آلومینیم اتصال نسبتاً خوبی با یکدیگر داشته و به نظر می‌رسد که فشار پرس، دما و زمان تفجوشی در حین فرآیند ساخت مناسب و مطلوب بوده است. وجود حفره و تخلخل که در روش متالورژی پودر یک امر طبیعی است نیز در این شکل قابل مشاهده است. باید به این نکته اشاره داشت که حذف

افزایش کسر حجمی تقویت کننده سبب بهبود مقاومت به سایش می‌شود. همچنین به وضوح مشخص است با افزایش بار عمودی وارد شده در هنگام آزمون سایش، شدت سایش و میزان کاهش وزن تمامی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. علت چنین رفتاری را اینگونه می‌توان توجیه کرد که با افزایش بار اعمالی، میزان نفوذ پین سایش‌گر به درون نمونه افزایش می‌یابد. حال هر چه سختی نمونه بیشتر باشد، میزان نفوذ پین سایش‌گر به درون نمونه کمتر می‌شود و نمونه دچار سایش کمتری می‌شود. می‌توان اذعان داشت که سایش یک پدیده سطحی بوده و تقویت کننده در سطح تحت تاثیر نیروی موضعی قرار می‌گیرد. لذا پارامترهایی همچون اندازه، کسر حجمی و نحوه توزیع تقویت کننده‌ها در سطح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به شکل ۷ و نمودار شکل ۸ می‌توان به این موضوع پی برد، چرا که با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده و افزایش سختی نمونه‌ها، میزان سایش در بارهای اعمالی یکسان کمتر شده است و مقاومت به سایش آن بهبود یافته است. همچنین با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که در بار اعمالی ۳ نیوتن، میزان کاهش وزن کل نمونه‌های کامپوزیتی، تفاوت چندانی با هم ندارند اما با افزایش نیرو در بار اعمالی ۲۰ نیوتن، فاز تقویت کننده نقش خود را در بهبود رفتار سایشی نمونه‌ها به خوبی نمایان می‌کند به گونه‌ای که نمونه Al-5%SiC میزان کاهش وزن کل بسیار کمتری در مقایسه با نمونه‌های Al-3%SiC و Al-1%SiC دارد. شکل ۹ رفتار سایشی نمونه‌ها را در نمودارهای نرخ سایش بر حسب مسافت در بارهای ۳، ۸ و ۲۰ نیوتن نشان می‌دهد. در بارهای اعمالی یکسان نقش افزایش کسر حجمی تقویت کننده‌ها در بهبود رفتار سایشی نمونه‌ها به خوبی نمایان است. نمونه‌های کامپوزیتی نرخ سایش کمتری نسبت به آلومینیم تقویت نشده دارند که با افزایش کسر حجمی تقویت کننده نرخ سایش کمتر شده است. هنگام سایش تحت بار ۳ نیوتن (شکل ۹-الف) تفاوت قابل ملاحظه‌ای در عملکرد تقویت کننده‌های ۱، ۳ و ۵ درصد دیده نمی‌شود، اما در سایش تحت بار ۸ و ۲۰ نیوتن (شکل ۹-ب و ج) تاثیر تقویت کننده‌ها به وضوح قابل رویت است. در بار ۸ نیوتن نیز تقویت کننده‌ها تقریباً

افزایش یافته است که نقش فرآیند تفجوشی را در بهبود خواص مکانیکی نمونه‌ها در حین فرآیند تولید نمایان می‌کند.

### ۳-۳- سایش

شکل ۸ نمودار تغییرات کاهش وزن کل بر حسب نیرو را نشان می‌دهد.



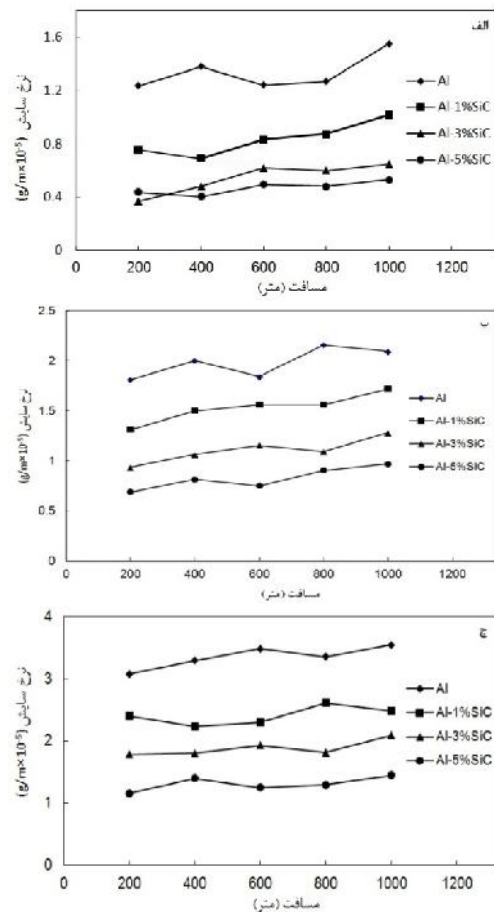
شکل ۸: نمودار کاهش وزن کل نمونه‌های ساییده شده بر حسب نیرو.

همان گونه که مشخص است آلومینیم تقویت نشده در تمامی بارهای اعمالی از کاهش وزن کل بالایی در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی برخوردار می‌باشد. به گونه‌ای که این تغییرات در بار ۲۰ N از شدت بیشتری برخوردار است. در اینجا نقش نانوذرات SiC به عنوان فاز تقویت کننده در بهبود مقاومت به سایش و کم کردن میزان کاهش وزن نمونه‌ها قابل مشاهده است. با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده از ۱ به ۵ درصد، مشاهده می‌شود که میزان کاهش وزن کل در تمامی بارهای اعمالی کمتر شده و نمایان‌گر این موضوع است که ذرات تقویت کننده باعث بهبود رفتار سایشی شده‌اند به گونه‌ای که افزایش کسر حجمی تقویت کننده تاثیر بهتری بر افزایش مقاومت به سایش می‌گذارد. لازم به ذکر است که در هنگام سایش لایه محافظ MML (Mechanically Mixed Layer) متشکل از براده‌های سایش و مواد منتقل شده از سطوح سایش، روی سطح شکل می‌گیرد. هر چقدر میانگین فاصله ذرات تقویت کننده به یکدیگر نزدیک‌تر باشد، توانایی کامپوزیت در حفظ این لایه بیشتر بوده و در نتیجه، مقاومت به سایش کامپوزیت بهبود می‌یابد. نزدیک بودن ذرات تقویت کننده به یکدیگر همچنین سبب می‌شود تا جریان پلاستیک فلز زمینه کنترل شود. بنابراین

شدت افزایش می‌یابد. در مورد کامپوزیت با تقویت کننده ۱٪، فاصله متوسط تقویت کننده‌ها از یکدیگر بیشتر از کامپوزیت با ۳٪ تقویت کننده و این دو بیشتر از کامپوزیت با ۵٪ تقویت کننده است که نشان می‌دهد هر چقدر فاصله میانگین تقویت کننده‌ها کمتر باشد، توانایی کامپوزیت در افزایش مقاومت به ساییش بهبود می‌یابد. همچنین بررسی‌های انجام شده بر رفتار ساییشی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی نشان می‌دهد که حضور ذرات تقویت کننده موجب افزایش سختی نمونه‌ها می‌شود و نرخ ساییش با معکوس سختی ماده متناسب است، لذا با توجه به افزایش سختی کامپوزیت با افزایش درصد تقویت کننده، نرخ ساییش کاهش می‌یابد [۲۲،۲۳]. شکل ۷ تایید کننده این موضوع است که افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC باعث افزایش سختی نمونه‌ها شده است و به دنبال آن نرخ ساییش نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. رفتار ساییشی کامپوزیت‌ها به استحکام فصل مشترک زمینه و تقویت کننده بستگی دارد. در صورتی که اتصال فصل مشترک زمینه-تقویت کننده ضعیف باشد، ذرات تقویت کننده در حین تست ساییش کنده شده و نه تنها باعث کاهش نرخ ساییش نمی‌شود بلکه باعث ساییش شدید می‌شود [۱۵]. پس می‌توان گفت یکی از عوامل موثری که باعث بهبود رفتار ساییشی نمونه‌ها با افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC شده است توزیع مناسب ذرات تقویت کننده و استحکام قوی فصل مشترک زمینه-تقویت کننده است.

همان‌طور که در نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود مقاومت ساییشی تمامی نمونه‌های با کسر حجمی تقویت کننده یکسان، با افزایش بار اعمالی، کاهش و نرخ ساییش آنها زیاد می‌شود. علت چنین رفتاری بدین صورت قابل شرح است که در اثر بار عمودی، ناهمواری‌های سطوحی که در تماس با یکدیگر قرار دارند در یکدیگر فرو رفته و ایجاد قفل مکانیکی می‌کنند. در اثر تشکیل قفل‌های مکانیکی در سطح، حرکت سطوح بر روی یکدیگر مستلزم ساییش ناهمواری‌های موجود در سطح و در نتیجه ساییش سطوح است. لازم به ذکر است در چنین شرایطی، ساییش بیشتر نصیب سطحی می‌شود که دارای سختی کمتری است. با افزایش بار عمودی، درهم تنیدگی سطوحی که در تماس با یکدیگر هستند افزایش یافته و در نتیجه حرکت نسبی بین

مشابه عمل می‌کنند، ولی تاثیر تقویت کننده‌های ۳ و ۵ درصد کمی بیشتر از ۱٪ است. در ساییش تحت بار ۲۰ نیوتن نرخ ساییش تمامی نمونه‌ها در حالت پایدار نسبت به بارهای ۳ و ۸ نیوتن افزایش داشته است، اما مجدداً تقویت کننده‌ها سبب کاهش میزان ساییش نسبت به آلومینیم تقویت نشده شده‌اند به گونه‌ای که اثر فاز تقویت کننده ۵ درصد نمود بیشتری دارد و باعث افزایش مقاومت به ساییش نمونه در بارهای اعمالی زیاد شده است.



شکل ۹: تغییرات نرخ ساییش بر حسب مسافت در نیروهای (الف) ۳ نیوتن، (ب) ۸ نیوتن و (ج) ۲۰ نیوتن.

در توضیح این امر باید توجه داشت که ساییش یک پدیده سطحی بوده و تقویت کننده‌ها در سطح تحت تاثیر موضعی نیرو قرار می‌گیرند، لذا درصد و چگونگی توزیع فاز تقویت کننده در سطح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با افزایش مقدار فاز تقویت کننده، فاصله متوسط بین ذرات کم شده و تعداد ذرات سخت تحت تماس و ساییش، در واحد طول به

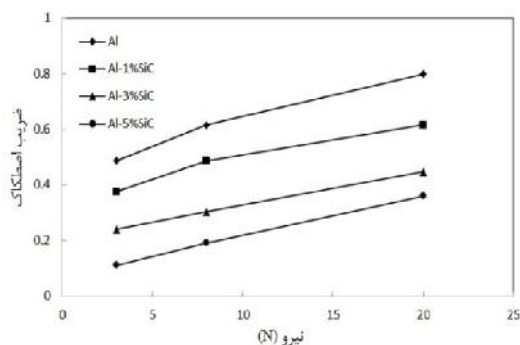
جلوگیری کرده و سطح سایش یکنواخت تری را دارا بوده و باعث کاهش میزان ضریب اصطکاک می‌شود.

### ۳-۴- بررسی سطوح سایش

شکل ۱۱ تصاویر میکروسکوپی از سطح سایش نمونه‌ها را در بار اعمالی ۳ نیوتن نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سطح سایش نمونه‌ها دچار تغییر شکل‌های پلاستیک کمی شده و به نظر می‌رسد در این بار اعمالی (۳ نیوتن) دچار سایش اندکی شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مکانیزم اصلی سایش نمونه‌ها، سایش خراشان است. وجود خطوط موازی و تغییر شکل‌های پلاستیک کم مشاهده شده در تصاویر از مشخصه‌های اصلی سایش خراشان می‌باشد. همچنین با توجه به نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود که نمونه‌ها از میزان نرخ سایش کمی برخوردار بوده که این موضوع وجود سایش خراشان را تایید می‌کند. با نگاهی دقیق‌تر به تصاویر شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد که نمونه آلومینیم تقویت نشده از میزان تغییر شکل‌های پلاستیک بیشتری نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی برخوردار است. با افزودن نانوذرات SiC و ساخت کامپوزیت مشاهده می‌شود که از میزان این تغییر شکل‌ها کاسته شده است که این موضوع برای نمونه‌های Al-3%SiC و Al-5%SiC بیشتر نمایان است که نشان از اثر مثبت نانوذرات SiC در بهبود رفتار سایشی نمونه‌ها دارد. باید به این نکته توجه داشت که اگر چه نمونه‌های آلومینیم تقویت نشده و Al-1%SiC تغییر شکل‌های پلاستیک و آشفته‌گی‌های سطحی بیشتری نسبت به نمونه Al-5%SiC دارند، اما مکانیزم غالب آنها سایش خراشان است. شکل ۱۲ تصاویر میکروسکوپی از سطوح سایش نمونه‌ها را در بار اعمالی ۲۰ نیوتن نشان می‌دهد. با مقایسه این تصاویر با تصاویر شکل ۱۱ مشخص می‌شود که افزایش نیرو از ۳ به ۲۰ نیوتن سبب شده است که تمامی نمونه‌ها از میزان سایش بیشتری برخوردار شوند و تغییر شکل‌های پلاستیک و آسیب‌های سطحی نمونه‌ها افزایش پیدا کند. همچنین نمونه‌های تحت سایش ۲۰ نیوتن ترک‌های عرضی بسیار زیادی را در مقایسه با سایش ۳ نیوتن دارند که این موضوع سبب حفره‌دار شدن و کنده شدن سطح نمونه‌ها به ویژه برای آلومینیم تقویت نشده، شده است که این پدیده‌ها از مشخصه‌های اصلی سایش چسبان است.

دو سطح سبب سایش بیشتر سطوح و اتلاف بیش از پیش ماده می‌شود.

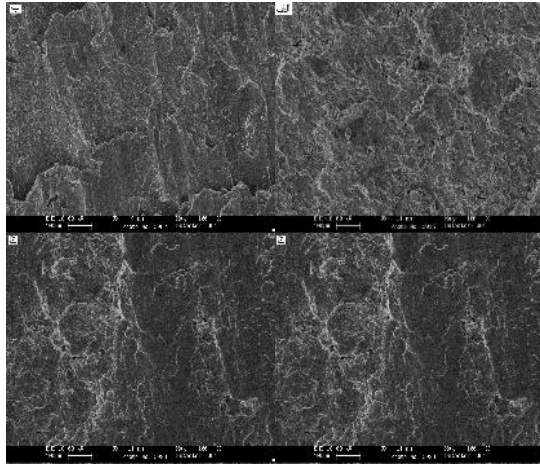
شکل ۱۰ تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌ها را در بارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، آلومینیم تقویت نشده در تمامی بارهای اعمالی ضریب اصطکاک بالاتری نسبت به نمونه‌های تقویت شده دارد. می‌توان ادعان داشت که در آلومینیم به سبب نبود ذرات تقویت کننده، پین سایش‌گر، توانایی بیشتری در نفوذ به سطح نمونه دارد که جوانب پین نیز با نمونه درگیر شده و موجب افزایش ناهمواری‌ها و در نتیجه افزایش ضریب اصطکاک می‌شود. با افزایش نیرو از ۳ به ۸ نیوتن، ضریب اصطکاک متوسط نمونه آلومینیم تقویت نشده دچار روند افزایشی می‌شود که با افزایش نیرو از ۸ به ۲۰ نیوتن این روند افزایشی نمود بیشتری پیدا کرده و ضریب اصطکاک متوسط آلومینیم تقویت نشده به ۰/۸۱ می‌رسد.



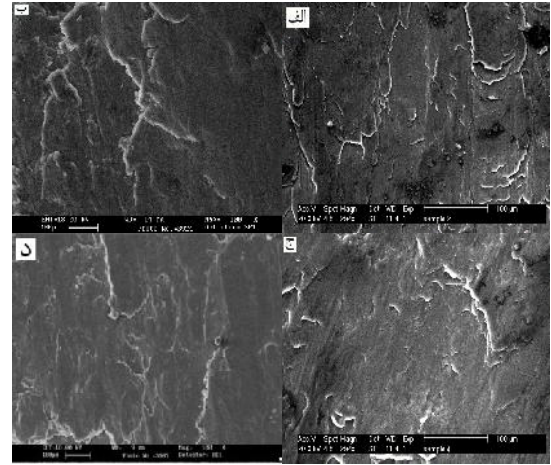
شکل ۱۰: تغییرات ضریب اصطکاک متوسط بر حسب نیرو.

افزودن نانوذرات SiC و ساخت کامپوزیت، سبب کاهش ضریب اصطکاک در تمامی نیروهای اعمالی در مقایسه با آلومینیم تقویت نشده گردیده است که نقش کسر حجمی ذرات تقویت کننده به خوبی نمایان است، به گونه‌ای که در تمامی بارهای اعمالی، ضریب اصطکاک متوسط نمونه‌های Al-5%SiC کمتر از نمونه‌های Al-3%SiC و این دو کمتر از نمونه‌های Al-1%SiC است. علت کاهش ضریب اصطکاک متوسط نمونه‌ها با افزایش کسر حجمی ذرات تقویت کننده را این گونه می‌توان تشریح کرد که با افزایش میزان کسر حجمی نانوذرات SiC، سختی نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و در مقابل نفوذ پین سایش‌گر مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند و از افزایش میزان ناهمواری‌ها





شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپی از سطح سایش نمونه‌های الف) Al، ب) Al-1%SiC، ج) Al-3%SiC و د) Al-5%SiC در بار ۲۰ نیوتن.



شکل ۱۱: تصاویر میکروسکوپی از سطح سایش نمونه‌های الف) Al، ب) Al-1%SiC، ج) Al-3%SiC و د) Al-5%SiC در بار ۳ نیوتن.

نیوتن مشاهده می‌گردد که اگر چه در بار اعمالی ۳ نیوتن، نمونه از میزان سایش پایین‌تری برخوردار است و تغییر شکل‌های پلاستیک و آشفستگی‌های سطحی آن نیز کمتر است اما هنوز مشخصه‌های اصلی سایش خراشان برای نمونه Al-5%SiC در بار اعمالی ۲۰ نیوتن مشاهده می‌شود و می‌توان گفت مکانیزم غالب، سایش خراشان است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

بررسی‌های میکروسکوپی و همچنین آنالیزهای EDS نشان می‌دهد که نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده به روش متالورژی پودر از توزیع مناسب ذرات تقویت کننده و عدم وجود فازهای ناخواسته برخوردارند. افزایش کسر حجمی نانوذرات SiC تا ۵٪، باعث افزایش سختی نمونه‌های کامپوزیتی گردید. در بارهای اعمالی یکسان، آلومینیم تقویت نشده در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی از نرخ سایش بیشتری برخوردار بود و افزایش کسر حجمی فاز تقویت کننده باعث کاهش نرخ سایش نمونه‌های کامپوزیتی گردید. افزایش بار اعمالی باعث افزایش نرخ سایش تمامی نمونه‌ها شد که آلومینیم تقویت نشده و نمونه Al-5%SiC به ترتیب بیشترین و کمترین افزایش را داشتند. افزایش بار اعمالی سبب تغییر مکانیزم سایش تمامی نمونه‌ها به جز Al-5%SiC از خراشان به چسبان شد.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که روند افزایش سایش با افزایش بار اعمالی را توسط مکانیزم تشکیل مناطق تغییر شکل پلاستیک یافته در لایه‌های زیر سطح سایش توضیح داد. به گونه‌ای که در بارهای کم، این مناطق محدود و کوچک بوده و در آنها سایش از نوع ملایم می‌باشد. ولی با افزایش بار این مناطق گسترش یافته و در تعامل با یکدیگر سبب سایش شدید و تغییر مکانیزم سایش می‌شود [۱۲، ۱۹]. باید توجه داشت که افزایش نیرو در حین سایش باعث افزایش نفوذ پین سایش‌گر در نمونه می‌شود و اگر نمونه از استحکام کافی برخوردار نباشد، قسمت‌هایی از سطح نمونه به پین چسبیده و از سطح جدا می‌شود و باعث افزایش میزان سایش می‌گردد. Jimenez و همکارانش بر پایه مطالعات خود اعلام کرده‌اند که تحت بارهای کم، براده‌های سایش عمدتاً از ذرات ریز سرامیکی و تکه‌های درشت‌تر فلزی‌اند و از این رو مکانیزم حاکم را خراشان معرفی کرده‌اند [۲۰]. حفراتی که در سطح نمونه‌های آلومینیم تقویت نشده مشاهده می‌شود، در نتیجه جدا شدن بخشی از سطح نمونه در اثر چسبیدن به سطح پین سایش‌گر و مکانیزم سایشی آن چسبان است. اضافه کردن SiC به آلومینیم به میزان ۱ و ۳٪ اگر چه از آشفستگی‌های سطحی و تغییر شکل‌های پلاستیکی شدید کاسته است اما همان‌طور که مشاهده می‌شود این موضوع نتوانسته است جلوی سایش شدید نمونه‌ها را بگیرد و مکانیزم اصلی سایش برای نمونه‌های Al-1%SiC و همچنین از مقایسه تصاویر سطح نمونه Al-5%SiC در بار اعمالی ۳ و ۲۰

[11] R.N. Ra, S. Das, *Materials and Design*, **31**, 2010, 1200.  
 [12] A.A. El-Daly, M. Abdelhameed, M. Hashish, A.M. Eid, *Journal of Alloys and Compounds*, **542**, 2012, 51.  
 [13] C.A. Leon-Patino, E.A. Aguilar-Reyes, E. Bedolla-Becerril, A. Bedolla-Jacuinde, *Wear*, **301**, 2013, 688.  
 [14] J. Gandra, P. Vigarinhob, D. Pereira, R.M. Miranda, A. Velhinho, P. Vilaca, *Materials & Design*, **52**, 2013, 373.  
 [15] O.P. Modi, B.K. Prasad, A.H. Vegneswaran, M.L. Vaidya, *Material Science and Engineering*, **151A**, 1992, 235.  
 [16] G.W. Stachowiak, A.W. Bachelor, *Engineering Tribology. 2nd Ed. USA: Butterworth Heinemann*, 2001.  
 [17] R. Bauri, M.K. Surappab, *Wear*, **265**, 2008, 1756.  
 [18] A.M. Al-Qutub, I.M. Allam, T.W. Qureshi, *Materials Processing Technology*, **172**, 2006, 327.  
 [19] N. El-Tayeb, *Wear*, **174**, 1994, 63.  
 [20] A.E. Jimenez, M.D. Bermeza, J. Cintasb, E.J. Herrereb, *Wear*, **266**, 2009, 255.  
 [21] B. Cantor, F. Dunne, I. Stone, *Metal and Ceramic Matrix Composites*, IOP, 2004.  
 [22] W. Zhongshanl, W. Shenqing, *Research & Development*, **30**, 2009, 33.  
 [23] M. Hutching, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, UK: Edward Arnold, 1992.

## مراجع

[1] S.S. Razavi-Tousi, R. Yazdani-Rad, S.A. Manafi, *Materials Science and Engineering A*, **528**, 2011, 1105.  
 [2] Y. Sahin, *Tribology International*, **43**, 2010, 939.  
 [3] S. Gopalakannan, T. Senthilvelan, *Measurement*, **46**, 2013, 2705.  
 [4] A. Atrian, G.H. Majzoobi, M.H. Enayati, H. Bakhtiari, *Advanced Powder Technology*, **26**, 2015, 73.  
 [5] M.V. Gorshenkov, S.D. Kaloshkin, V.V. Tcherdyntsev, V.D. Danilov, V.N. Gulbin, *Journal of Alloys and Compounds*, **536**, 2012, 126.  
 [6] X. Zi-Yang, C. Guo-Qin, W. Gao-Hui, Y. Wen-Shu, L. Yan-Mei, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **21**, 2011, 285.  
 [7] Z. Xiao-Min, Y. Jia-Kang, W. Xin-Yu, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, 2012, 1686.  
 [8] K.D. Woo, D.L. Zhang, *Current Applied Physics*, **4**, 2004, 175.  
 [9] C. Aykut, V. Temel, *Powder Technology*, **268**, 2014, 72.  
 [10] M.S. Arab, N. El Mahallawy, F. Shehata, M.A. Agwa, *Materials & Design*, **64**, 2014, 280.