

## تأثیر اندازه ذرات بر رفتار سایشی لنت ترمز کامپوزیتی بدون آزبست

آزاده کرمی، علیرضا خاوندی و یوسف خرازی

**چکیده:** در این تحقیق تأثیر اندازه کوارتز بر خواص سایشی لنت ترمز کامپوزیتی بدون آزبست مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌هایی با پنج دانه‌بندی مختلف کوارتز با عدد مش ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۰ ساخته شد و مطابق با استاندارد ملی ایران به شماره ۵۸۶ مورد آزمون سایش قرار گرفتند. با بررسی نتایج مشخص شد که نمونه حاوی اندازه ذرات معادل با عدد مش ۸۰ در مرحله اولیه و تکمیلی دارای نمودار یکنواخت و منطبق بر هم می‌باشد و در مرحله حرارتی نیز افت عدد سایش<sup>۱</sup> با افزایش دما ناچیز بوده است و دارای نرخ فرسایش<sup>۲</sup> پایینی می‌باشد. بنابراین اندازه ذرات معادل با عدد مش ۸۰، اندازه ذرات بهینه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** کوارتز، ذرات سایشی، لنت ترمز، نرخ فرسایش، آزبست، اندازه دانه، کامپوزیت

## ۱. مقدمه

لنت ترمز اصلی‌ترین جزء سیستم ترمز می‌باشد و معمولاً از پیچیده‌ترین کامپوزیتها محسوب می‌گردد و می‌تواند حاوی بیش از ۱۰ جزء باشد تا قادر باشد نیروی سایشی ثابت، استحکام قابل قبول و مقاومت سایشی مناسبی را در دامنه وسیعی از شرایط ترمز ایفا کند.

در ضمن مواد سایشی باید طوری انتخاب شوند که در فصل مشترک با دیسک یک فیلم سایشی پایدار ایجاد کنند که این فیلم سایشی باعث یکنواختی و پایداری عدد سایش می‌شود [1].

فیلیپ<sup>۳</sup> و همکاران [2] نشان دادند که فیلم سایشی به راحتی با مقایسه سطح نمونه قبل و بعد از سایش معمولاً به صورت ناهمگن تشکیل شده و شامل چندین فاز مختلف می‌باشد. این محققان گزارش کردند که، پدیده fade یعنی افت ناگهانی عدد سایش در اثر تجزیه حرارتی اجزای آلی [3] در اثر افزایش ضخامت فیلم سایشی ایجاد می‌شود. ضخامت فیلم سایشی تشکیل شده با تغییر

دما، تغییر می‌کند و با افزایش دما، متوسط ضخامت فیلم در قسمت‌های مختلف نمونه افزایش پیدا می‌کند.

ورت<sup>۴</sup> و همکارانش [4] نیز نشان دادند که خصوصیات سایشی کامپوزیت به شدت تحت تأثیر ترکیب فیلم سایشی می‌باشد.

لنت ترمز ایده‌آل باید دارای خواصی همچون استحکام بالا، عدد سایش یکنواخت، نرخ سایش پایین، صدای کم، عدم تغییرات عدد سایش با افزایش دما و فشار و خواص جذب ارتعاش مناسب باشد [3,5,6].

معمولترین نوع مواد سایشی که در لنت ترمز استفاده می‌شود، مواد سایشی آلی می‌باشد که به طور کلی مولفه‌های این دسته از مواد بصورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [7].

**رزین:** اجزا را در کنار هم نگهداری می‌کند [7,8,9]. رزین فنولیک ترموست از نوع نوالاک به دلیل مقاومت حرارتی بالا بیشترین مصرف را در لنت ترمز دارد [10].

**الیاف:** به منظور ارتقاء استحکام مکانیکی اضافه می‌گردد [5]. آزبست، الیاف کربن، الیاف شیشه، الیاف کولار و الیافهای فلزی از معمولترین مواد مورد استفاده در لنت ترمز هستند.

البته به دلایل مشکلات زیست محیطی و سرطان‌زا بودن آزبست استفاده از این نوع الیاف ممنوع شد [9,11].

**ذرات سایشی:** به منظور ایجاد خواص سایشی پایدار، کنترل نرخ فرسایش [12]. و کنترل تشکیل فیلم سایشی [13] افزوده می‌گردد. ذرات سرامیکی مانند آلومینا ( $Al_2O_3$ )، کوارتز ( $SiO_2$ ).

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۲۶ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۹/۱۰ به تصویب نهایی رسیده است.

خانم آزاده کرمی، دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر علیرضا خاوندی، استادیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر یوسف خرازی، استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

<sup>1</sup> Friction coefficient

<sup>2</sup> Wear rate

<sup>3</sup> Fillip

<sup>4</sup> Wirth

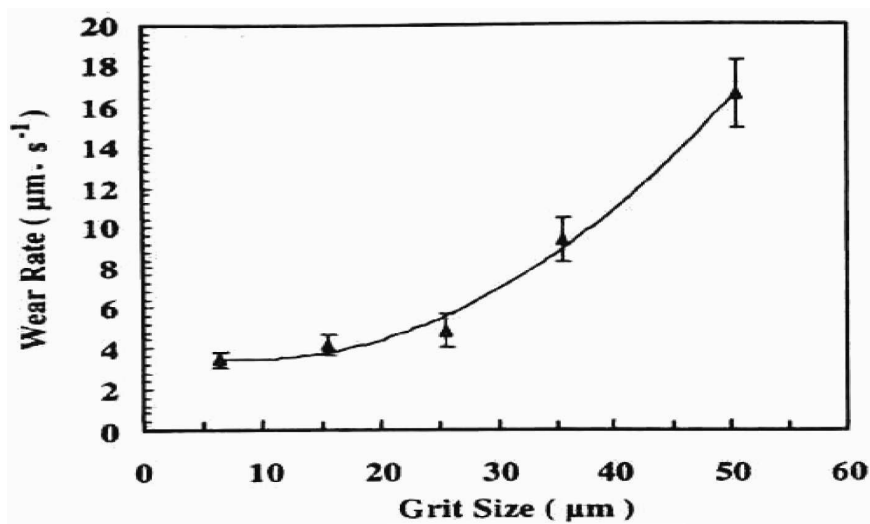
ذرات مس-برنج و آهن می‌باشند [12]. به طور کلی عوامل متعددی بر خواص سایشی لنت ترمز تاثیر دارند که می‌توان به سرعت لغزش دیسک، فشار سیلندر ترمز بر لنت ترمز، درجه حرارت سطوح سایشی، اندازه ذرات سایشی، ساختار شیمیایی لنت ترمز، بار اعمالی و زبری سطح اشاره کرد. فاکتور اندازه ذرات یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین خواص سایشی می‌باشد. گوپتا و همکارانش گزارش کردند که مقاومت سایشی با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یابد [14]. ولی گازو و همکارانش [15] مشاهده کردند که تقریباً نرخ فرسایش اندازه ذرات به صورت نمایی افزایش می‌یابد که در شکل ۱ مشخص می‌باشد.

سیلیکا به دلیل مقاومت حرارتی بالا و تاثیر سودمند آنها روی سایش از مهم‌ترین ذرات سایشی می‌باشند [10,12].

**پرکننده:** به منظور بالانس ترکیب کلی مواد سایشی، کاهش هزینه، افزایش سختی و مقاومت سایشی افزوده می‌گردد. اغلب در این مورد از سولفات باریم و کربنات کلسیم استفاده میشود [13].

**روانساز:** افزودن روانکارهای جامد باعث کاهش عدد سایش و حرارت ایجاد شده در اثر سایش می‌شود [9]. گرافیت به دلیل ارزان بودن معمول‌ترین روانساز مورد استفاده می‌باشد. سولفیدهای فلزی نیز بعنوان روانکار استفاده می‌شوند [12].

**پودرهای فلزی:** معمولاً برای انتقال حرارت و افزایش عدد سایش از پودرهای فلزی استفاده می‌شود [12]. پودرهای فلزی معمولاً



شکل ۱. تأثیر اندازه ذرات سایشی بر نرخ فرسایش ویژه [15]

پودر برنج با دانسیته وزنی  $8/7 \text{ gr/cm}^3$  بعنوان و در فلزی و از ۱۰٪ ذرات کوارتز در ۵ مش ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ بعنوان ذرات سایشی (مطابق با جدول ۱) استفاده شده است.

جدول ۱. ترکیبات نمونه‌هایی ساخته شده در این تحقیق بر

حسب درصد وزنی

کد نمونه	کوارتز
B-40Q	مش ۴۰
B-60Q	مش ۶۰
B-80Q	مش ۸۰
B-100Q	مش ۱۰۰
B-120Q	مش ۱۲۰

همچنین پینتود<sup>۵</sup> و همکارانش [16] براساس مطالعات میکروسکوپی به این نتیجه رسیدند که با بالا رفتن اندازه ذرات سیستم از دو جزئی به سه جزئی تغییر می‌کند و بنابراین نرخ فرسایش بالا می‌رود. بطور کلی مقالات مختلف نتایج متفاوتی از تاثیر اندازه ذرات سایشی را بر خواص سایشی لنت ترمز نشان دادند. به همین علت در این تحقیق تاثیر اندازه ذرات کوارتز بر خواص سایشی لنت ترمز بررسی شده است.

## ۲. روش تحقیق

در این تحقیق از رزین فنولیک نوع نووالاک پودری با دانسیته وزنی  $1/3 \text{ gr/cm}^3$ ، از پشم سنگ با دانسیته وزنی  $2/8 \text{ gr/cm}^3$  بعنوان الیاف، باریت ( $\text{BaSO}_4$ ) با دانسیته وزنی  $4/3 \text{ gr/cm}^3$  بعنوان پرکننده، گرافیت با دانسیته وزنی  $1/5 \text{ gr/cm}^3$  بعنوان روانکار و

<sup>5</sup> pintaude

پس از گذشت سه مرحله فوق، نمونه مجدداً توزین شده و نرخ فرسایش ویژه (S.W) توسط دستگاه سایش مطابق با فرمول زیر محاسبه شد.

$$S.W. = \frac{m_1 - m_2}{2\pi \cdot R \cdot N \cdot F_m}$$

که در این رابطه:

S.W = نرخ فرسایش ویژه (gr/N.m)

R = شعاع سطح دیسک (m)

N = تعداد دوران در طول یک آزمون کامل

F<sub>m</sub> = میانگین نیروی سایش (N)

m<sub>1</sub> = وزن اولیه نمونه (gr)

m<sub>2</sub> = وزن ثانویه نمونه (gr)

مطابق با این استاندارد عدد سایش مجاز در طول آزمون باید بین 0.28 تا 0.6 و حداکثر نرخ فرسایش ویژه باید 10 gr/N.m × 304 باشد.

جهت مطالعه میکروسکوپی سطح سایش تعدادی از نمونه‌های آزمون سایش توسط میکروسکوپ الکترونیکی از نوع کمبریج S360 ساخت انگلستان در ولتاژ 20 kV مورد بررسی قرار گرفتند.

### ۳. نتایج

همانطور که اشاره شد، نمونه‌های ساخته شده با ترکیب یکسان و اندازه ذرات مختلف کوارتز مورد آزمون سایش و فرسایش قرار گرفتند.

لنت با کیفیت مطلوب باید دارای عدد سایشی یکنواخت و ثابت باشد و نمودار مرحله اولیه و تکمیلی آن بر هم منطبق باشند یعنی لنت بعد از مرحله حرارتی خواص خود را حفظ کند و عدد سایش به مقدار موجود در مرحله اولیه بازگردد. [3-5,6].

نمودارهای عدد سایش در مرحله اولیه و تکمیلی بر حسب تعداد ترمز در شکل‌های ۲ تا ۶ نشان داده شده است.

با مقایسه نمودارهای ۲ تا ۶ مشاهده می‌شود که در نمودار شکل ۳ مربوط به مرحله اولیه و تکمیلی نمونه B-80Q دارای انطباق بیشتری بوده و عدد سایش تقریباً یکنواختی را نشان می‌دهد، به همین دلیل در این سری نمونه‌ها، این نمونه در وضع مطلوبی می‌باشد که علت این امر تشکیل فیلم سایشی یکنواخت بر روی سطح این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها است.

فیلم سایشی قبلاً نیز توسط فیلیپ و همکارانش [2] و ورت و همکاران [4] بر روی سطح لنت مشاهده شده بود.

آنها نیز دلیل یکنواختی عدد سایش را تشکیل فیلم سایشی بر روی سطح لنت دانسته‌اند.

تاثیر اندازه ذرات بر رفتار سایشی لنت ترمز کامپوزیتی بدون آزبست

برای ساخت نمونه‌ها، مواد اولیه با درصد‌های مشخص در دسته‌های ۲ کیلوگرمی به دقت توزین شدند و سپس در مخلوط کنی به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط شدند.

پس از آن، مواد توسط پرس با فشار 30 bar پیش فرم داده شدند و سپس در دمای 160 C<sup>o</sup> و با فشار 85bar و در 6 مرحله 55 ثانیه- ای تحت پرس داغ قرار گرفتند. پس از پرس داغ، عملیات بازپخت در دمای 185 C<sup>o</sup> به مدت 10 ساعت بر روی کلیه نمونه‌ها انجام شد.

### ۲-۱. آزمون سایش

بر روی کلیه نمونه‌های ساخته شده، آزمون سایش مطابق با استاندارد 586 استاندارد ملی ایران انجام شد. این آزمون در شرکت ماشین لنت انجام شده است.

دستگاه آزمون سایش از نوع دور ثابت و دارای دیسکی از نوع چدن خاکستری با زمینه پرلیتی بود.

سرعت دوران دیسک در طول آزمون‌ها دقیقه / دور 700 ثابت نگاه داشته شد. از هر لنت نمونه‌ای با ابعاد 5×24×24 میلی‌متر بریده شد و سپس توسط دستگاه بر روس نمونه‌ها اتحنای مورد نظر ایجاد شد. برای انجام آزمون، نمونه در محل نمونه‌گیر قرار داده و ترمزگیری تا زمانی انجام شد که سطح نمونه بطور یکنواخت سائیده و حداقل 90 درصد تماس بین سطح دیسک و سطح نمونه ایجاد شده.

در ضمن در طول مدت آماده سازی نمونه، دمای سطح دیسک کمتر از 50±1 C<sup>o</sup> نگاه داشته شد. پس از آماده سازی نمونه به صورت فوق، آزمون سایش در سه مرحله زیر انجام گردید:

#### ۱- مرحله اولیه

بعد از مرحله آماده سازی، نمونه با دقت 0.01 گرم توزین شد و سپس با سرعت دقیقه / دور 700 ترمزگیری آغاز شد. ترمزگیری در 20 مرحله 10 ثانیه‌ای انجام شد و بین هر دو ترمز، 10 ثانیه توقف داده شد. دمای سطح دیسک نیز با دستگاه خنک کننده کمتر از 150±1 C<sup>o</sup>، نگاه داشته شد.

#### ۲- مرحله حرارتی

در این مرحله دستگاه خنک کننده خاموش شده و ترمزگیری بدون توقف و به مدت 10 دقیقه انجام شد تا دمای سطح دیسک به دمای 350±10 C<sup>o</sup> رسید.

#### ۳- مرحله تکمیلی

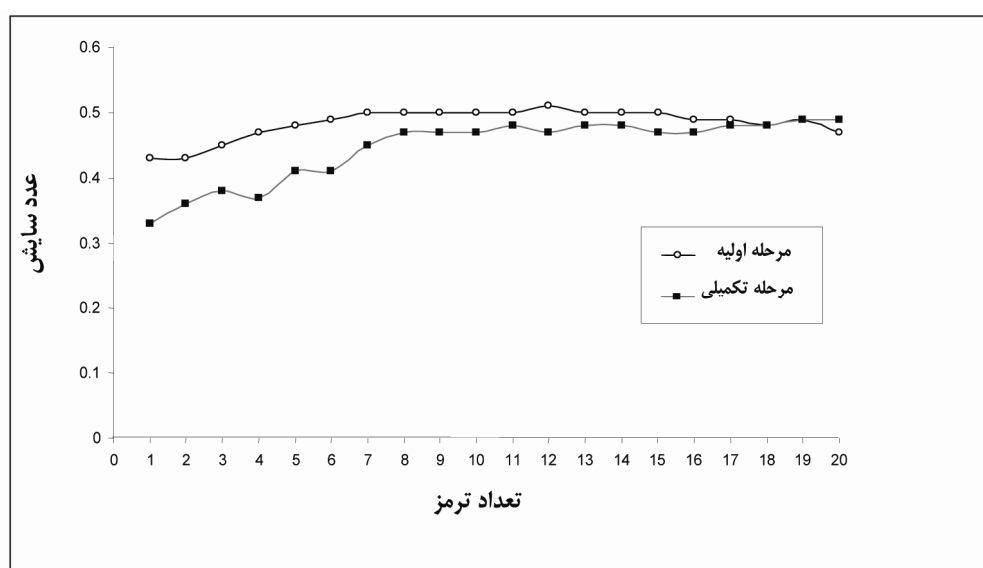
در این مرحله دستگاه خنک کننده مجدداً روشن شده تا دمای دیسک مجدداً 150±10 C<sup>o</sup> برسد و سپس عمل عملیات ترمزگیری مانند مرحله اولیه مجدداً تکرار شد.

در اثر افزایش دما پدیده‌ای به نام fade یعنی افت ناگهانی عدد سایش در اثر تجزیه حرارتی اجزاء آلی لنت اتفاق می‌افتد [3]. همانطور که قبلاً توسط فیلیپ و همکارانش [2] گزارش شده بود، پدیده fade در اثر افزایش ضخامت فیلم سایشی ایجاد می‌شود. در حالت مطلوب در مرحله دمایی، باید کمترین افت عدد سایش با افزایش دما مشاهده شود.

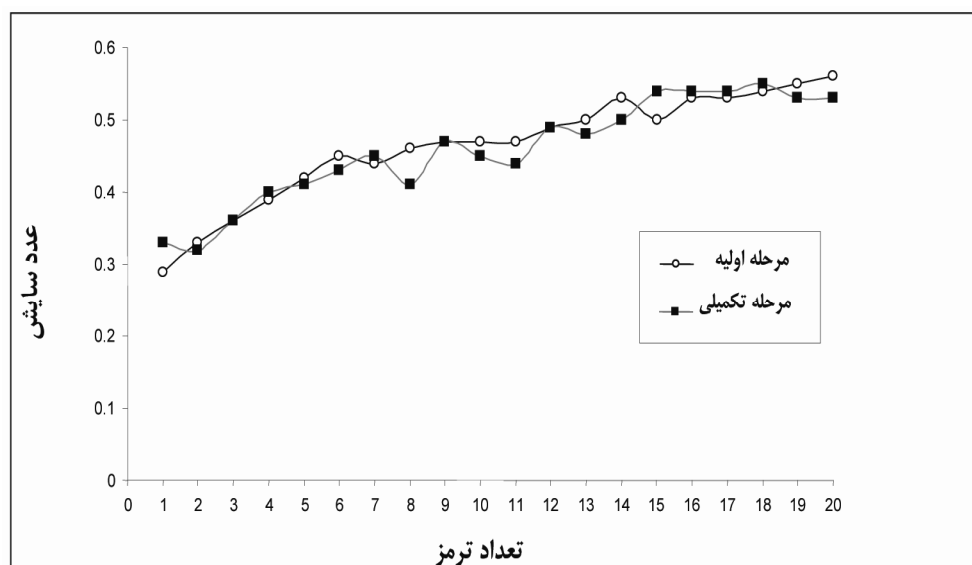
از مقایسه نمودارهای ۲ تا ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد مش کوارتز (ریز شدن اندازه دانه) عدد سایش افزایش می‌یابد زیرا با ریز شدن دانه‌ها نسبت سطح به حجم افزایش یافته و سطح بیشتری در تماس با دیسک قرار می‌گیرد و در نتیجه عدد سایش افزایش می‌یابد.

در مرحله حرارتی عمل ترمزگیری را به طور دائم حداکثر به مدت ۱۰ دقیقه ادامه داده تا دمای دیسک از دمای  $C^0$  ۱۵۰ به  $C^0$  ۳۵۰ برسد.

در طول این مرحله عدد سایش در دماهای مختلف ثبت گردیده است. نمودار عدد سایش بر حسب دما در این مرحله در شکل ۷ رسم شده است.



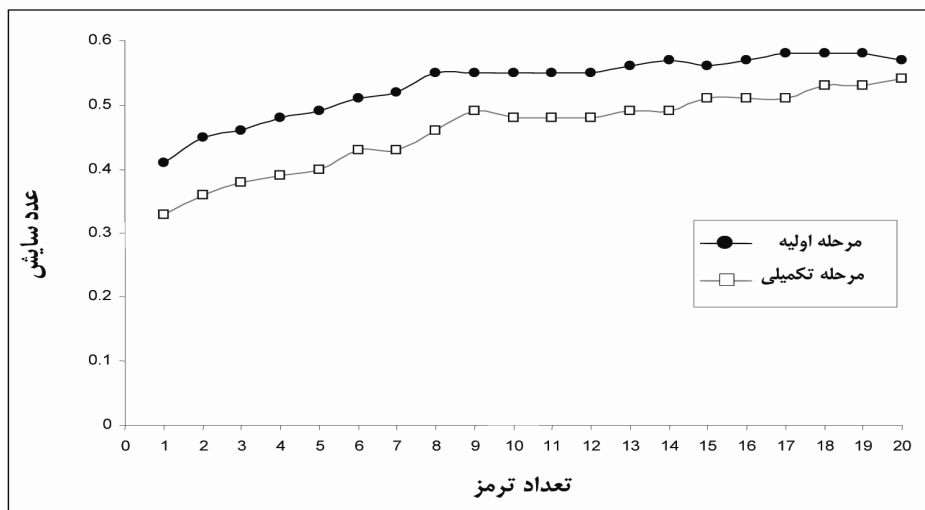
شکل ۲. نمودار عدد سایش بر حسب تعداد ترمز برای نمونه B-40Q.



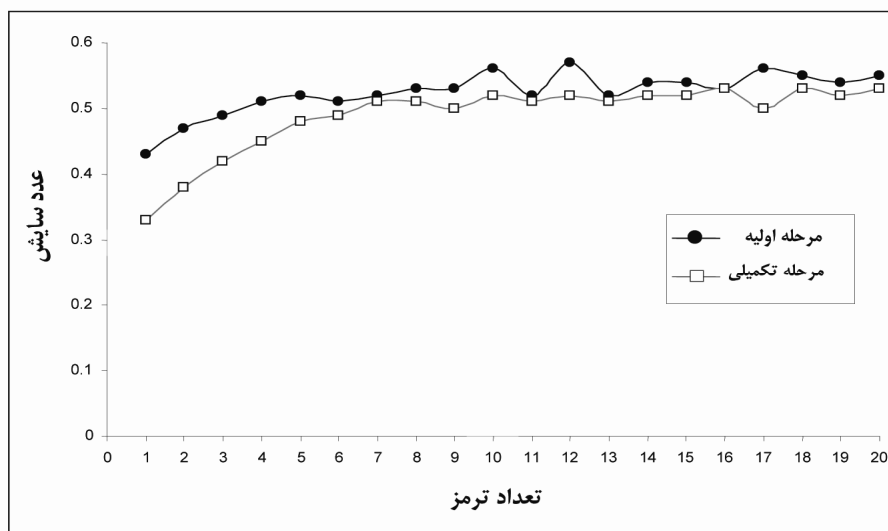
شکل ۳. نمودار عدد سایش بر حسب تعداد ترمز برای نمونه B-60Q.



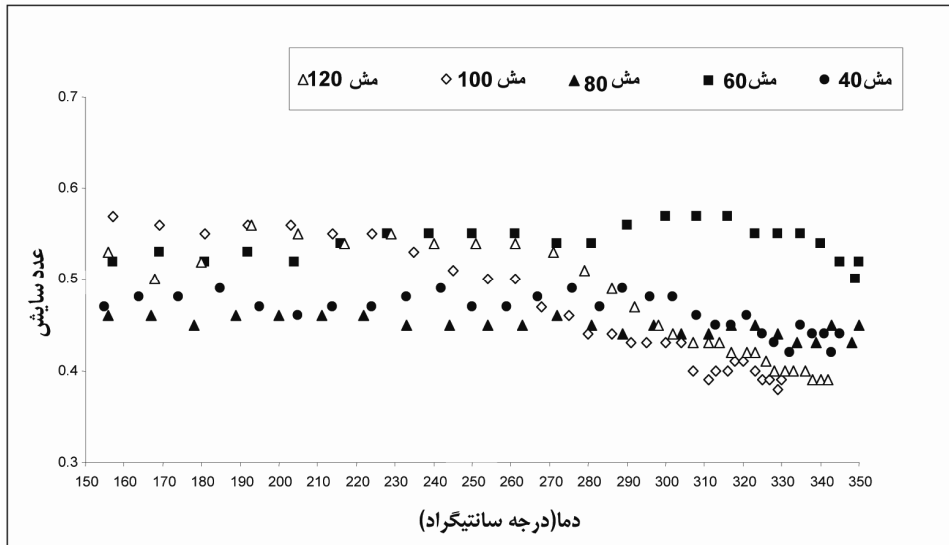
شکل ۴. نمودار عدد سایش بر حسب تعداد ترمز برای نمونه B-80Q.



شکل ۵. نمودار عدد سایش بر حسب تعداد ترمز برای نمونه B-100Q.



شکل ۶. نمودار عدد سایش بر حسب تعداد ترمز برای نمونه B-120Q.



شکل ۷. نمودار عدد سایش بر حسب دما برای نمونه های با اندازه ذرات مختلف کوارتز.

در این نمونه باشد و به همین علت این نمونه از نظر پایداری دمایی، در وضعیت مطلوبی قرار دارد.

#### نرخ فرسایش ویژه

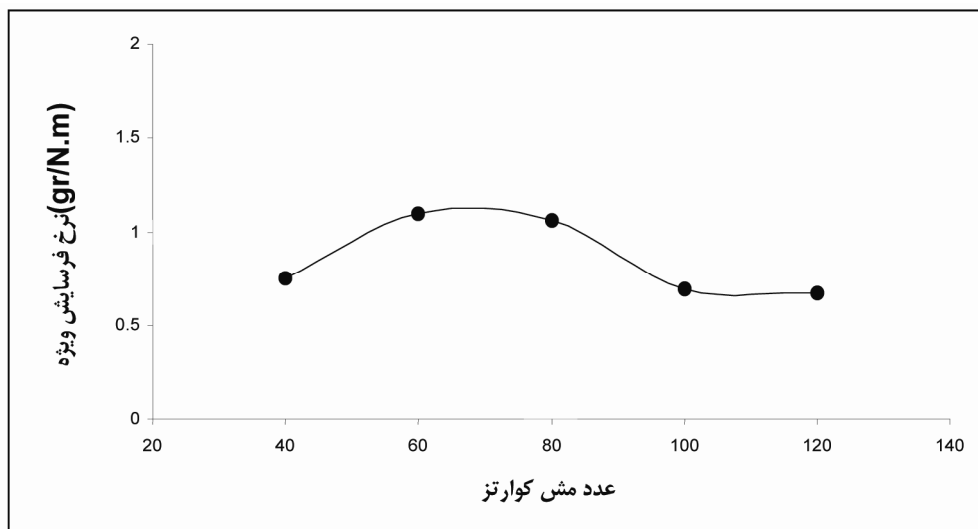
نرخ فرسایش ویژه در طول هر آزمون محاسبه شده و در جدول ۲ ثبت گردیده است. نمونه تغییرات این پارامتر بر حسب عدد مش کوارتز در شکل ۸ رسم شده است.

با توجه به نمودار ۷، مشاهده می شود که در تمام نمونه ها به جز نمونه B-80Q عدد سایش در دمای  $280^{\circ}C$  شروع به افت می کند.

علت افت ناچیز عدد سایش در نمونه B-80Q با افزایش دما می تواند به دلیل افزایش ناچیز ضخامت فیلم سایشی در دماهای بالا

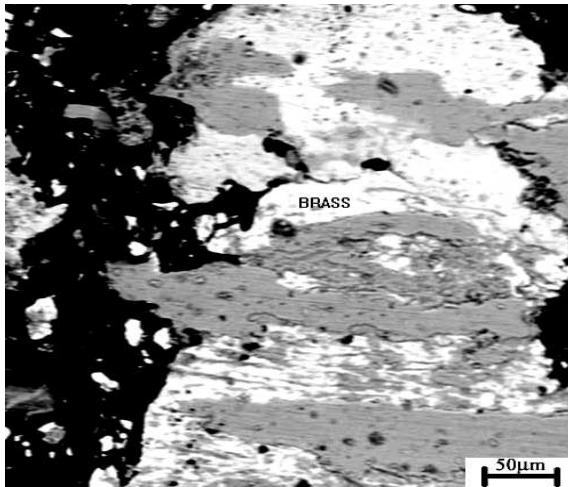
جدول ۲. نتایج نرخ فرسایش ویژه برای نمونه های با اندازه ذرات مختلف کوارتز

کد نمونه	B-120Q	B-100Q	B-80Q	B-60Q	B-40Q
نرخ فرسایش ویژه ( $gr/N.m \times 10^{-7}$ )	۰/۶۷	۰/۶۹	۱/۰۶	۱/۱	۰/۷۵



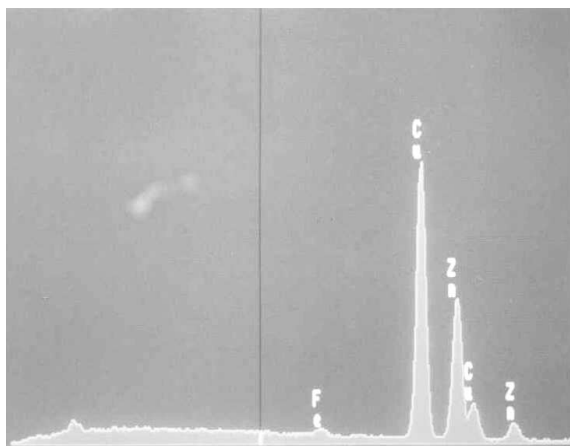
شکل ۸. نمودار تغییرات نرخ فرسایش ویژه بر حسب اندازه ذرات کوارتز

شده بود. بنابراین علت پایداری عدد سایش و کم بودن فرسایش تشکیل این فیلم است.



شکل ۱۰. تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM از نمونه B-80Q

برای تشخیص فیلم سایشی، از آنالیز EDS بر روی یک براده برنجی (شکل ۱۱) و فیلم تشکیل شده بر روی آن استفاده شد. نتایج این آنالیز در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. همانطور که از شکل ۱۲ مشخص است، فیلم سایشی تشکیل شده حاوی عناصری از لنت و دیسک ولی با ترکیب متفاوت می‌باشد. با توجه به اینکه آهن در ترکیب لنت وجود ندارد بنابراین Fe دیده شده در این آنالیز و در فیلم سایشی مربوط به آهن دیسک می‌باشد زیرا دیسک استفاده شده در آزمایشات از نوع چدن خاکستری است.



شکل ۱۱. آنالیز EDS مربوط به براده برنجی در نمونه B-80Q

### ۳. نتیجه‌گیری

۱- اندازه دانه معادل با عدد مش ۸۰، عدد سایش قابل قبول و یکنواختی در مرحله اولیه و تکمیلی را نشان می‌دهد و نمودار این دو مرحله تقریباً بر هم منطبق می‌باشد.

تاثیر اندازه ذرات بر رفتار سایشی لنت ترمز کامپوزیتی بدون آزبست

لنت علاوه بر داشتن عدد سایش قابل قبول باید دارای نرخ فرسایش ویژه پایینی باشد [3,5]. از شکل ۸ مشخص است، تمامی این سری نمونه‌ها دارای نرخ فرسایش مطلوبی می‌باشند.

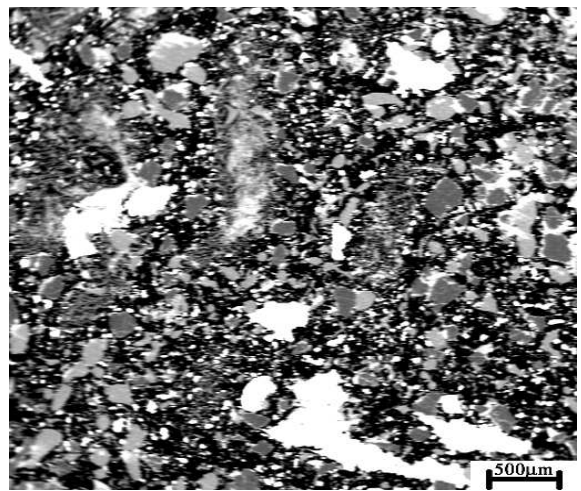
مشاهده می‌شود که با افزایش عدد مش کوارتز نرخ فرسایش ویژه در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد، این امر احتمالاً می‌تواند به دلیل این باشد که با افزایش اندازه ذرات، زبری سطح افزایش یافته و در نتیجه مقدار ماده ساییده شده از سطح نمونه بیشتر شده و نرخ فرسایش ویژه افزایش می‌یابد قبلاً نیز گازو و همکارانش [6] نشان دادند که نرخ فرسایش ویژه با افزایش اندازه ذرات افزایش می‌یابد.

### مطالعات میکروسکوپی

با توجه به نمودارهای ۲ تا ۷ مشاهده می‌شود که نمونه B-80Q هر سه خاصیت اصلی مورد نیاز برای یک لنت ترمز مطلوب را بطور همزمان دارا می‌باشد. یعنی این نمونه از مرحله اولیه و تکمیلی نسبتاً یکنواخت و منطبق بر هم برخوردار است.

همچنین میزان تغییرات عدد سایش آن با افزایش دما در مرحله حرارتی کم است و علاوه بر این نرخ فرسایش کم و قابل قبولی دارد. بنابراین برای انجام مطالعات میکروسکوپی این نمونه انتخاب شد و مورد مطالعه میکروسکوپ الکترونی SEM قرار گرفت. در شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM مربوط به توزیع ذرات این نمونه آورده شده است.

همانطور که از تصویر مشخص است، عملیات مخلوط سازی مواد به خوبی انجام شده و ذرات از توزیع نسبتاً یکنواختی برخوردارند.



شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM از نمونه B-80Q مربوط به توزیع ذرات

در مطالعات میکروسکوپی با بزرگنمایی بالاتر از سطح این نمونه مشخص شد که فیلم سایشی در سطح نمونه ایجاد شده است (شکل ۱۰) تشکیل این فیلم قبلاً نیز توسط سایر محققین نظیر فیلیپ و همکارانش [2] و ورت و همکاران [4] بر روی سطح لنت گزارش

automotive friction braking", wear, Vol. 179, 1996, PP. 346-353.

[5] Sinha S. K., & Biswas S. K., "Friction and wear behavior of continuous fiber as cast Kevlar- phenolic resin composite", Journal of materials science, Vol. 27, 1992, PP.3085-3091.

[6] Eriksson M., Bergman F., & Jacobson S., "on the nature of tribological contact in automotive brakes", Wear, Vol.252, 2002, PP. 26-36.

[7] Anderson E. A., "Friction and wear of automotive brakes", ASM handbook, Vol. 18, 1992, PP. 569-577.

[8] Harper G. A., "Brakes and friction materials": the history and development of the technologies, 1998, MEP, UK.

[9] Lancaster J.K., "polymer-based bearing materials": the role of filler and fiber reinforcement, tribology,1972, PP. 249-255.

[10] Eriksson M., "friction and contact phenomena of disc brakes related to squeal", act universitatis upsalinensis, 2000.

[11] Engberg C., "The regulation and manufacture of brake pads": The feasibility of reformulation to reduce the copper load to the San Francisco bay, 1995, PP.1-18.

[12] Satapathy B.K., & Jayashree Bijwe, "Analysis of simultaneous influence of operating variables on abrasive wear of phenolic composites". Wear Vol. 253, 2002, PP. 787-794.

[13] Blau P.J., "Compositions functions and testing of friction brake materials and their additive". Metals and ceramics division, 2001.

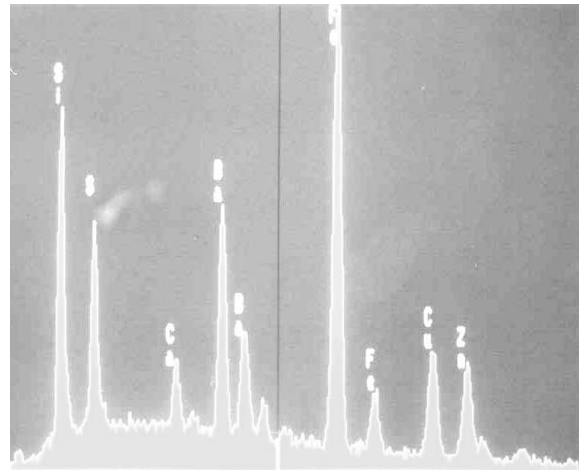
[14] Gupta M., & Frazier W. E., Acta, Metall. Mater, Vol. 38, no. 11, 1990, PP. 2041-2049.

[15] Guzzo P. L., Raslan A. A., & De Mello, J. D. B., Ultrasonic abrasion of quartz crystals. Wear, Vol. 255, 2003, PP. 67-77.

[16] Pintaude G., Tanaka D. K., & Sinatora A., "The effect of abrasive particle size on the sliding friction coefficient of steel using a spiral pin-on-disk apparatus", Wear, Vol. 255, 2003, PP. 55-59.

۲- با کاهش اندازه ذرات کوارتز (افزایش عدد مش) نرخ فرسایش ویژه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

۳- بررسی میکروسکوپی نشان می‌دهد که در سطح نمونه حاوی ذرات کوارتز با عدد مش ۸۰ فیلم سایشی ایجاد شده و به همین علت نرخ فرسایش کاهش یافته و عدد سایش یکنواخت شده است.



شکل ۱۲. آنالیز EDS مربوطه فیلم سایشی تشکیل شده

بر روی براده برنجی در نمونه

#### مراجع

[1] Jang H., & Kim S. J., "The effect of antimony trisulfide ( $Sb_2S_3$ ) and zirconium silicate ( $ZrSiO_4$ ) in the automotive brake friction material on friction characteristics". Wear. Vol. 239, 2000. PP.229-236.

[2] Phillip P., Weiss Z., & Rafaja D., "on friction layer formation in polymer matrix composites materials for brake application". Wear. Vol.252, 2002. PP.189-198.

[3] Handa Y., & Kato T., "Effect of Cu Powder,  $BaSO_4$  and cashew dust on the wear and friction characteristic of automotive brake pads". Tribology Transaction. Vol. 39,1996. PP.346-353.

[4] Wirth A., Egleston D., & Whitaker, "A fundamental tribochemical study of the third body layer formed during