

# بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی برنزی تقویت شده با الیاف بازالت مورد استفاده در صفحات اصطکاکی

محمد بابازاده آغ اسماعیلی<sup>۱\*</sup>، مازیار آزادبه<sup>۲</sup>

۱- مربی، گروه مکانیک دانشکده فنی و حرفه‌ای تبریز، دانشگاه فنی و حرفه‌ای کشور، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

\*mbabazadehagh@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۰/۰۷/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۲/۲۰)

## چکیده

در این پژوهش خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی برنزی تقویت شده با الیاف بازالت مورد بررسی قرار گرفت. الیاف بازالت حساس شده جهت تقویت زمینه برنزی به طریق متالورژی پودر مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور درصدهای حجمی مختلفی از الیاف بازالت با دانه‌بندی مشخص به پودر برنز پیش‌آلیاژ شده اضافه گردیده و درون قالب تحت تنش ۴۰۰ مگا پاسکال متراکم شدند. نمونه‌ها در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد در محیط احیایی ( $H_2$ - % 25N<sub>2</sub>) به مدت ۳۰ دقیقه سینتر شدند. نمونه‌های کشش و سایش تهیه شده از ترکیبات فوق تحت آزمون کشش و سایش قرار گرفتند. نتایج حاکی از افزایش استحکام و کاهش ضریب اصطکاک در نمونه‌های حاوی الیاف مذکور نسبت به نمونه‌های بدون این الیاف می‌باشد. همچنین بهترین خواص کششی و سایشی در نمونه‌های حاوی ۹٪ الیاف بازالت قابل مشاهده است. هم‌چنین سطح شکست نمونه کشش توسط میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت.

## واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، مواد اصطکاکی، بازالت، متالورژی پودر، ضریب اصطکاک

## ۱- مقدمه

ماده‌ای با رسانایی و مقاومت گرمایی بالا مورد نیاز است. در سال‌های اخیر مواد اصطکاکی سینتر شده زمینه فلزی به دلیل رسانایی و مقاومت گرمایی بالا، خواص تریبولوژیکی خوب و قابلیت کاربرد در شرایط خاص، مورد توجه واقع شدند [۱-۲]. این مواد که اغلب زمینه آن‌ها را آهن یا مس تشکیل می‌دهد و

مواد پایه آزبستی معمولاً به عنوان مواد اصطکاکی در اجزای به کار رفته در کلاچ و ترمز اتومبیل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مواد به دلیل خطرات زیست محیطی و از دست دادن خواص مکانیکی خود به خصوص در شرایط کاری سخت، کارایی خود را به تدریج از دست می‌دهد. بنابراین برای کاربردهای خاص

جدول (۱): شکل و ابعاد ذرات

ردیف	نام پودر	شکل پودر	محدوده ابعاد (میکرون)
۱	مس	نامنظم	۱-۶۰
۲	روی	نامنظم	۱-۶۰
۳	قلع	نامنظم	۱-۴۳
۴	بازالت	مبله ای	۱-۱۰

بعد از انتخاب ترکیب شیمیایی مشخص، مطابق جدول (۲) پودرهای مورد نیاز را درون مخلوط کن معمولی که دو انتهای آن مخروطی است ریخته و عمل مخلوط کردن انجام شد. با توجه به اختلاف وزن مخصوص پودرهای فلزی، پودرها تمایل به جدایش دارند. برای جلوگیری از وقوع این امر از سرعت دوران پایین یعنی ۳۰ دور در دقیقه استفاده شد.

جدول (۲): ترکیب شیمیایی پودرهای مورد استفاده

ردیف	./Cu	./Sn	./Zn	./Vol Basalt Fiber
۱	۹۰	۶	۴	۰
۲	۹۰	۶	۴	۳
۳	۹۰	۶	۴	۶
۴	۹۰	۶	۴	۹
۵	۹۰	۶	۴	۱۲

پودرهای آماده شده با ترکیب شیمیایی مختلف درون قالب نمونه کشش مطابق با استاندارد ASTM B925-08 با ماتریس متحرک که روی یک پرس ۵۰ تنی نصب شده بود، متراکم شدند. علت استفاده از قالب با ماتریس متحرک اطمینان از تراکم یکنواخت و دوطرفه پودر در درون قالب می باشد. تنش اعمالی به مواد پودری برای تراکم ۴۰۰ مگاپاسکال بود. بعد از آن تعدادی نمونه‌ی دیسک، درون قالب تحت تنش ۴۰۰ مگا پاسکال متراکم گردیدند. نمونه‌ها در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد در محیط احیایی (25N2 - % H2) به مدت ۳۰ دقیقه سینتر شدند. در ابتدا ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ

برخی روان کارها و ذرات ساینده برای اصلاح خواص اصطکاکی به آن‌ها افزوده می شود، در اجزاء ترمز برای کاربردهای خاص مورد استفاده واقع می شوند [۳-۴]. مواد اصطکاکی پایه مس اولین مواد اصطکاکی بودند که در صنعت گسترش یافتند. در ابتدا از آلیاژ مس - قلع به عنوان زمینه فلزی استفاده شده، که بعداً برای اصلاح خواص اصطکاکی به خصوص در شرایط کاربردی تر فلز روی به آن اضافه گردید. افزایش فلز روی باعث بالا رفتن ضریب اصطکاک و قابلیت جذب انرژی در آلیاژ مس - قلع می گردد [۵].

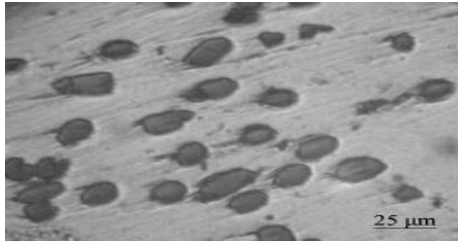
علی‌رغم این تغییر در ترکیب شیمیایی، مواد فوق دارای استحکام فوق العاده‌ای نبوده و به هنگام ترمزگیری به علت پایین بودن استحکام آن‌ها و وارد آمدن ضربه ناگهانی دچار شکست می گردند [۶]. برای بهبود و گسترش این مواد (مواد اصطکاکی) سه مشکل عمده‌ی نحوه انتخاب مواد اولیه، نوع و واکنش‌های موجود بین اجزای کامپوزیت یعنی اینکه زمینه با فاز تقویت کننده تا چه اندازه کوه‌رنت باشد و نهایتاً بهینه نمودن فرمولاسیون کامپوزیت یا ماده اصطکاکی وجود دارد [۷].

انتخاب اجزاء ترکیب، اندازه‌ی دانه‌ها، شکل دانه‌ها، میزان فشار تراکم، دما و زمان سینترینگ در فرایندهای ساخت و نوع مواد مورد استفاده در ساخت مواد اصطکاکی در تحقیقات قبلی مورد بررسی قرار گرفته است [۱، ۳، ۴].

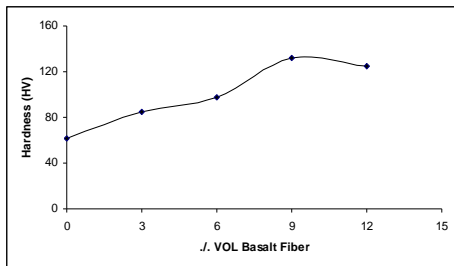
مواد اصطکاکی تقویت شده به توسط الیاف سرامیکی و کربنی در سال‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است که در این میان الیاف کربنی سهم بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند [۸-۱۰]. از آنجائی که الیاف کربنی به لحاظ قیمت گران بوده، لذا در این پژوهش تاثیر الیاف بازالت به عنوان جایگزین برای الیاف کربنی روی خواص مواد اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از مواد اولیه پودرهای مس، روی، قلع اتمیزه آبی و الیاف بازالت استفاده گردیده است. در کلیه آزمایش‌ها، شکل و اندازه متوسط ذرات مطابق جدول (۱) بوده است.



شکل (۱): ساختار میکروسکوپی کامپوزیت برنز و الیاف بازالت



شکل (۲): تغییرات سختی نمونه‌ها برحسب درصد حجمی الیاف بازالت

هم‌چنین آزمون کشش نیز روی کامپوزیت‌ها انجام شد. سرعت کرنش  $2 \text{ mm/sec}$  بوده و نتایج کشش به صورت دیاگرام‌های (۳ و ۴) آمده است. طوریکه در شکل (۳) مشاهده می‌شود، بالاترین میزان استحکام کششی نهایی مربوط به کامپوزیت با ۹٪ حجمی الیاف بازالت می‌باشد. مقدار استحکام کششی نمونه با ۹٪ حجمی الیاف بازالت نسبت به نمونه بدون الیاف بازالت حدود ( $137 \text{ MPa}$ ) می‌باشد. این افزایش قابل ملاحظه در میزان استحکام را به وجود الیاف بازالت و تقویت کامپوزیت‌ها توسط الیاف بازالت می‌توان مرتبط دانست. تقویت استحکام را می‌توان بدین صورت در کامپوزیت‌ها توجیه کرد که در صورت وجود الیاف بازالت بارهای اعمالی از طریق زمینه فلزی به الیاف بازالت که دارای استحکام بالایی است منتقل می‌شود. این امر نیز در این تحقیق قابل مشاهده است.

هم‌چنین وجود کوهرنتی میان فاز تقویت کننده کامپوزیت با زمینه فلزی باعث افزایش استحکام کامپوزیت می‌شود یعنی هر چقدر نیروهای چسبندگی بین فاز تقویت کننده و زمینه قوی

نوری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱) ساختار میکروسکوپی یکی از نمونه‌ها را نشان می‌دهد. هم‌چنین ابتدا بر روی نمونه‌های سایش آزمون سختی سنجی به روش ویکرز انجام شد. مقدار بار اعمالی  $10 \text{ کیلوگرم}$  و عدد سختی میانگین ۶ بار سختی سنجی انجام یافته روی هر نمونه می‌باشد.

هم‌چنین آزمون کشش نیز روی کامپوزیت‌ها انجام شد. سرعت کرنش  $2 \text{ mm/sec}$  بود.

در ادامه آزمایشات، نمونه‌های دیسک سینتر شده تحت آزمایش پین و دیسک مطابق با استاندارد ASTM B460 در شرایط سایش لغزشی قرار گرفتند. جنس دیسک از مواد اصطکاکی با درصدهای مختلف الیاف بازالت و جنس پین از فولاد ابزار سرد کار سخت کاری شده به قطر  $3 \text{ mm}$  با سختی  $60 \text{ راکول C}$  انتخاب شد. میزان بار اعمالی ۴ و ۹ نیوتن و سرعت خطی نیز از  $20 \text{ cm/s}$  تا  $40 \text{ cm/s}$  متغیر بود. سرعت سایش به صورت حجم سائیده شده بر حسب مسافت سایش تعریف شده و در مراحل مختلف سایش تعیین شد.

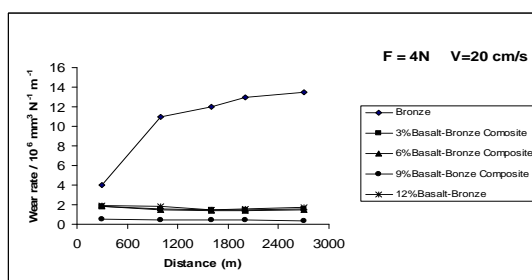
هم‌چنین ضریب اصطکاکی برای نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری و تغییرات آن به صورت تابعی از درصد حجمی الیاف بازالت نشان داده شده است. هم‌چنین جهت بررسی سطوح شکست آزمون کشش میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید.

### ۳- نتایج و بحث

شکل (۱) ساختار میکروسکوپی برنز حاوی الیاف بازالت را نشان می‌دهد. ساختار نمایانگر توزیع همگن الیاف بازالت در زمینه فلزی است. شکل (۲) تغییرات سختی را برای کامپوزیت‌ها بر حسب درصد حجمی الیاف بازالت نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود مقدار سختی از ۶۷ ویکرز تا ۱۳۸ ویکرز متغیر می‌باشد. بیشترین مقدار سختی مربوط به کامپوزیتی است که دارای ۹٪ حجمی الیاف بازالت می‌باشد و این نمونه نسبت به نمونه الیاف بازالت دارای سختی حدود  $108 \text{ HBN}$  برابر می‌باشد.

خواص سایشی کامپوزیت‌ها نیز تحت شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گرفته که نتایج آن در شکل‌های (۵ تا ۷) آمده است. چنانچه در شکل‌های (۵ تا ۷) مشاهده می‌شود کم‌ترین میزان سایش مربوط به نمونه‌ای با ۹٪ حجمی الیاف بازالت است. میزان سایش کامپوزیت‌های حاوی الیاف بازالت نسبت به نمونه بدون الیاف تحت شرایط مشابه سایش کم‌تر می‌باشد. در طی آزمون سایش، برنز قلع بدون الیاف بازالت، در اثر تماس بین پین با نمونه تحت آزمون، برآمدگی‌های سطح نمونه در مقیاس میکروسکوپی در اثر اعمال نیرو تغییر شکل داده و چسبندگی رخ می‌دهد. در اثر چسبندگی این برآمدگی‌ها و خرد شدن آن‌ها و کشیده شدن به فصل مشترک نمونه و پین میزان اصطکاک افزایش می‌یابد.

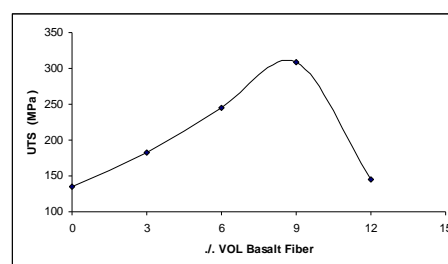
مناطق دچار چسبندگی در اثر تغییر شکل سخت شده و ریز ترک‌هایی در این مناطق ایجاد می‌شود. این ریز ترک‌ها گسترش یافته و نهایتاً باعث جدا شدن قسمت‌هایی از نمونه تحت آزمون می‌گردند. در نمونه‌های برنزی تقویت شده با الیاف بازالت، به علت بالا بودن استحکام معمولاً حرکت نابجایی‌ها و تشکیل ریز ترک‌ها به تعویق می‌افتد. بنابراین تغییر شکل کامپوزیت‌های حاوی الیاف بازالت محدود می‌شود. از طرف دیگر به دلیل تقویت کامپوزیت‌ها توسط الیاف بازالت و خاصیت ضد اصطکاکی بازالت رخداد سایش از نوع چسبان کمتر بوده و میزان سایش کم‌تر است.



شکل (۵): حجم سائیده شده بر حسب مسافت سایش تحت نیروی فشارنده

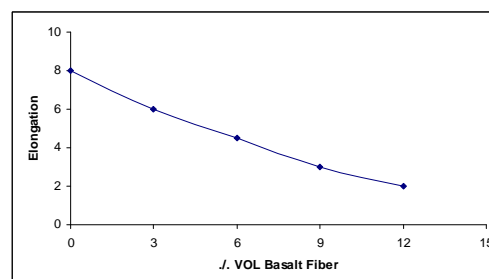
۴N و سرعت لغزش ۲۰cm/s

باشد، استحکام نیز در کامپوزیت بالا خواهد بود. بدین منظور در این پژوهش سطح الیاف بازالت قبل از تهیه کامپوزیت‌ها به توسط مخلوط اسیدها حساس شد تا نیروی چسبندگی بین الیاف بازالت با زمینه فلزی تقویت شود. در طی آزمون کشش اتصال مناسب ما بین فاز الیاف بازالت و زمینه فلزی و کشیده شدن هم‌زمان این دو با هم عامل مهمی در تقویت و افزایش استحکام کششی کامپوزیت‌ها می‌باشد.



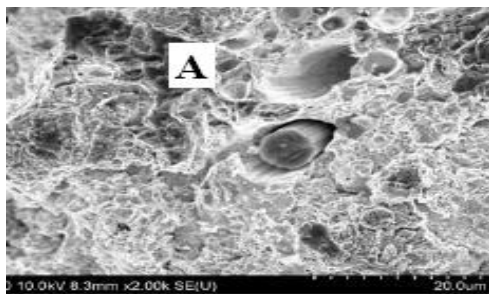
شکل (۳): تغییرات استحکام کششی نمونه‌ها بر حسب درصد حجمی الیاف بازالت

همان‌طوریکه در شکل (۴) مشاهده می‌شود انعطاف پذیری با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت کاهش می‌یابد. این امر بر انتقال تنش از زمینه فلزی به الیاف بازالت دلالت دارد. وقتی که درصد حجمی الیاف بازالت از ۹٪ کم‌تر باشد تاثیر الیاف بازالت روی استحکام و سختی مثبت بوده، این در حالی است که با افزایش درصد الیاف بازالت از ۹٪ به علت توزیع ناهمگن و غیر یکنواخت، خواص کششی و سختی رو به کاهش می‌گذارد.

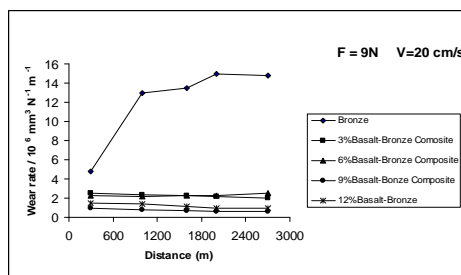


شکل (۴): تغییرات درصد حداکثر ازدیاد طول نسبی نمونه‌ها بر حسب درصد

حجمی الیاف بازالت

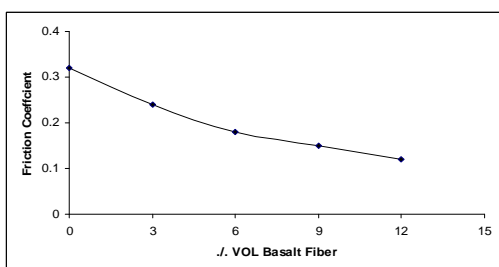


شکل (۸): تصویر میکروسکوپی از سطح شکست نمونه کشش

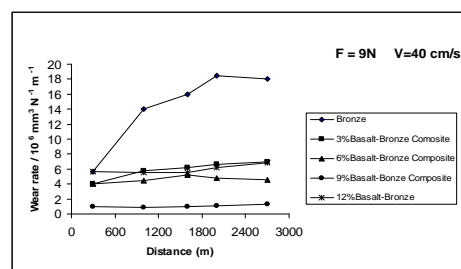


شکل (۶): حجم سائیده شده بر حسب مسافت سایش تحت نیروی فشارنده ۹N و سرعت لغزش ۲۰ cm/s

با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت ضریب اصطکاکی کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد که این به خاصیت ضد اصطکاکی الیاف بازالت مربوط می‌شود.



شکل (۹): تغییرات ضریب اصطکاکی نمونه‌ها بر حسب درصد حجمی الیاف بازالت



شکل (۷): حجم سائیده شده بر حسب مسافت سایش تحت نیروی فشارنده ۹N و سرعت لغزش ۴۰ cm/s

در شکل (۸) مقطع شکست کامپوزیتی با ۹٪ حجمی فاز الیاف بازالت مشاهده می‌شود. در سطح شکست حفره‌های گرد و دایره‌ای شکل قابل مشاهده است. هم‌چنین در این تصویر الیاف بازالتی را مشاهده می‌کنیم که به سمت خارج کشیده شده و این نمایانگر انتقال تنش اعمال از زمینه فلزی به الیاف بازالت می‌باشد. این بدان معنی است که وجود نیروهای چسبندگی قوی ما بین الیاف بازالت و زمینه فلزی باعث افزایش استحکام کششی کامپوزیت‌ها می‌شود و در صورت شکست نمونه، عمل جوانه‌زنی ترک در زمینه فلزی رخ می‌دهد. هم‌چنین در این تصویر منطقه‌ای را که با حرف A نشان داده شده می‌بینیم که در آنجا دیمپل‌های ریز وجود دارد و حاکی از شکست نرم و انعطاف‌پذیر می‌باشد.

شکل (۹) تاثیر عامل نیرو و درصد حجمی الیاف بازالت را روی ضریب اصطکاکی نشان می‌دهد. ضریب اصطکاکی کامپوزیت‌ها در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲۳ متغیر می‌باشد، این در حالی است که برای نمونه بدون الیاف بازالت مقدار ضریب اصطکاکی حدود ۰/۳۵ می‌باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- با افزایش درصد حجمی فاز تقویت کننده یعنی الیاف بازالت، استحکام کششی و سختی افزایش می‌یابد.
- ۲- با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت، انعطاف پذیری و سرعت سایش کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد.
- ۳- بهترین و بهینه‌ترین حالت، کامپوزیت با ۹٪ حجمی الیاف بازالت است.
- ۴- با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت به علت خاصیت ضد اصطکاکی مطلوب بازالت، ضریب اصطکاکی کاهش می‌یابد.
- ۵- با افزایش درصد حجمی الیاف بازالت (بیش از ۹٪ حجمی) به علت توزیع غیر یکنواخت این الیاف، استحکام و سختی کاهش می‌یابد.

## ۵- مراجع

- [5] Talijan, N. M., Trifunovic, D. S. and Trifunovic, D. D. "The Influence of Different Iron Powders on the Friction Properties of Sintered Friction Materials Based on Iron." *Materials Letters*, Vol. 46, PP. 255-260, 2000.
- [6] Huanser, H. H., Roll, K. H. and Johnson, P. K. (). "Friction & antifriction material." *Perspective in Powder Metallurgy*, Vol. 4, Plenum Press, New York, 1970.
- [7] Lu, Y. "A Golden Section Approach to Optimization of Automotive Friction Materials." *Journal of Materials Science*, Vol. 38, PP. 1081-1085, 2003.
- [8] Hutchings, M. *Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials*. Edward Arnold, London, PP. 30-33, 1992.
- [1] Ozsever, S. *Powder Metallurgy*. in *Metals Handbook*, ASM, 9th Ed., Vol. 7, PP. 701-703, 1988.
- [2] Krishnadas, C. G., Dutta, D. and Mohan, G. "Development of Metallo-ceramic Friction Materials for Aircraft Brake." *Proceeding of Int. Conference on Advanced Composite Materials*, Wollongong, Aust., PP.61-67, 1993.
- [3] Ho, S., Ho, K., Wu, K. and Lin, Ch. "Friction Properties of Copper-Based and Iron-Based Friction Materials." *Advances in Powder Metallurgy*, Vol. 5, PP. 229, 1991.
- [4] Derkachera, G. M. and Panaiti, I "Friction Powder Materials (Review)." *Soviet Powder Metallurgy and Ceramics*, Vol. 28, No. 12, PP. 968, 1990.