



مطالعه تجربی رفتار سایشی نانوکامپوزیت‌های پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا/زنولیت

رسول محسن زاده*

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

کلمات کلیدی:

پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا

نانو زنولیت

نانوکامپوزیت

سایش، اصطکاک

خلاصه: در این پژوهش، تأثیر تأثیر نانو ذرات زنولیت بر خواص سایشی پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا که کاربرد فراوانی در کاشتنی‌های ارتوپدی دارند، مورد مطالعه قرار گرفته است. بهبود خواص سایشی این پلیمر، از جمله چالش‌های صنعت پزشکی می‌باشد و تأثیر تأثیر مستقیم بر عمر کاشتنی‌های ارتوپدی دارد. نمونه‌های استوانه‌ای نانوکامپوزیتی بر پایه آمیخته پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا حاوی نانوذرات زنولیت (۲، ۴ و ۶ درصد وزنی) به روش اکسترودر و قالب‌گیری تزریقی تولید شد. شکل شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. با استفاده از آزمون پین روی دیسک، مقدار سایش، دما و ضریب اصطکاک تحت نیروی فشاری ۵۰ N و سرعت ثابت ۵ m/s و اندازه‌گیری شد. مقدار سایش، دما و ضریب اصطکاک در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی از نانو زنولیت، پس از ۴۵۰۰ متر، به ترتیب حدود ۵۶، ۳۲ و ۲۶ درصد کمتر از نمونه پلی اتیلنی خالص مشاهده شد. در مقابل، بکارگیری ۶ درصد وزنی از نانو ذرات زنولیت، منجر به کلوخه شدن ذرات و افزایش مقدار سایش، دما و ضریب اصطکاک، نسبت به نمونه‌های نانوکامپوزیتی شد. علاوه بر این، مورفولوژی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، پس از آزمون، سطح صافتر و با آثار سایش خراشی کم عمق تر عمق تر نسبت به سطح ساییده شده نمونه پلی اتیلنی خالص نشان داد.

۱- مقدمه

جمله چالش‌های این پلیمر مهندسی می‌باشد. ذرات و بقایای ایجاد شده در اثر سایش، اثرات مخربی داشته و باعث استئولیز و در نهایت شل‌شدگی و کاهش عمر کاشتنی می‌شوند. بنابراین، افزایش خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آن از جمله موضوع تحقیقاتی پرتعداد است. تحقیقات زیادی در مورد اثر تقویت‌کننده‌هایی همچون الیاف کربن [۳]، نانو لوله کربنی [۴]، زیرکونیم [۵]، اکسید روی [۶] و آلومینا [۷]، بر خواص مکانیکی و سایشی پلی اتیلن صورت گرفته است. تقویت‌کننده‌ها، به دلیل استحکام بالاتر نسبت به زمینه پلیمری، منجر به افزایش سختی سطحی و در نهایت بهبود مقاومت سایشی می‌شود.

در برخی دیگر از پژوهش‌ها اثر ذرات معدنی بر خواص سایشی پلی اتیلن بررسی شده است. ذرات معدنی به دلیل ویژگی‌هایی همچون

پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا^۱ در ردیف پلیمرهای مهندسی قرار داشته و خواصی همچون مقاومت به ضربه بالا [۱]، خودروانکاری و همچنین مقاومت بالا در مقابل حلال‌های شیمیایی کاربرد این پلیمر را در مصارف پیشرفته مهندسی افزایش داده است [۲]. از جمله کاربرد این پلیمر در حوزه کاشتنی‌های ارتوپدی می‌باشد. افزایش تقاضا برای کاشتنی مفصل مصنوعی، باعث شده است تا این پلیمر از موضوعات تحقیقاتی پژوهشگران برای جایگزین مفاصل آسیب دیده از طریق آرتروز شدید یا دیگر جراحات باشد. علاوه بر خواص مهندسی مناسب، افزایش خواص تریبولوژی که تأثیر مستقیم بر عمر کاشتنی دارد، از

1 . Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: r_mohsenzadeh@tvu.ac.ir



پلیمری می‌شود [۱۶ و ۱۷]. برخی پژوهشگران، اثر نانو ژئولیت بر خواص مکانیکی زمینه پلیمری، بررسی کرده‌اند [۲۰-۱۸]. افزودن تا ۵ درصد نانو ژئولیت، منجر به بهبود استحکام کششی و مدول یانگ گردید [۲۰]. ژپینگ و همکاران [۱۰] اثر نانو ذرات ژئولیت بر خواص مکانیکی و هسته زایی پلی پروپیلن را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن تا ۳ درصد نانو ذرات ژئولیت، استحکام کششی و خمشی و همچنین نرخ هسته‌زایی را افزایش می‌دهد. علاوه‌این، افزون نانو ذرات ژئولیت به پلی اتیلن سنگین، منجر به بهبود چقرمگی شکست شده است [۱۹]. با این وجود، تحقیقی در مورد اثر افزودن نانو ذرات ژئولیت بر خواص سایشی پلی اتیلن برای بکارگیری در کاشتنی مفاصل مصنوعی انجام نگرفته است.

در پژوهش حاضر به علت برخورداری پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا از خواص مکانیکی و شیمیایی مناسب و همچنین کاربرد فراوان در ارتوپدی، به‌عنوان زمینه پلیمری انتخاب شد [۱۷]. از نانو ذرات ژئولیت به دلیل غیر سمی و زیست سازگار بودن، افزایش مقاومت سایشی و خاصیت جوانه‌زنی استفاده شد. آمیخته‌های مختلف به روش ذوبی آماده شد. تأثیر نانو ذرات ژئولیت بر مقاومت سایشی پلی اتیلن سنگین، بطور تجربی مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

پلی اتیلن فوق سنگین با نام تجاری فیور ۱۵۱۲۹ ساخت شرکت کلانس آمریکا با جرم مولکولی متوسط 47 g/mol میلیون و چگالی 0.93 g/cm^3 ، به‌عنوان ماده‌ی اولیه پلیمری و نانو ذرات ژئولیت با نام تجاری زد۴۱-۰۰۵-آر^۲ و اندازه متوسط ۵۰ نانومتر، محصول شرکت سوروتا چو^۳ ژاپن، برای افزودن به زمینه‌ی پلیمری انتخاب گردید.

۲-۲- قالب‌گیری نمونه

مواد اولیه پلی اتیلن و نانو ذرات ژئولیت پس از رطوبت‌گیری، ابتدا به صورت مکانیکی و پس از آن به روش ذوبی و با استفاده از اکسترودر دو پیچی، شرکت کوپرین آلمان با قطر پیچ ۲۵ mm و نسبت طول به قطر ۴۰ mm، مخلوط شده و رشته‌های خروجی از اکسترودر توسط

خواص مکانیکی بالا، هزینه کم و عامل هسته‌زایی در پلیمر زمینه، به عنوان تقویت کننده در زمینه‌های پلیمری مورد توجه قرار گرفته‌اند. ژئولیت از جمله مواد معدنی می‌باشد که در کاربرهای پزشکی جهت دارورسانی به سیستم بدن، کشاورزی جهت آب رسانی، آب و فاضلاب جهت تصفیه آب و همچنین در حوزه‌های میان‌رشته‌ای جهت بهبود خواص مکانیکی همزمان با کاربرد دیگر به کار می‌رود. ساختار ریز متخلخل منحصر به فرد ژئولیت باعث می‌شود که در کاربردهای جاذب مانند کاتالیزورها و مواد تبادل یونی کاربرد فراوانی داشته باشد. علاوه‌براین، افزودن ژئولیت به زمینه پلیمری، منجر به بهبود خواص مکانیکی و بلورینگی شده است. اکسوی و همکاران، اثر افزودن ژئولیت را بر روی خواص مکانیکی فیلم پلی یورتان مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که وجود تقویت کننده ژئولیت، باعث بهبود خواص کششی و خمشی می‌شود [۸]. علاوه‌براین، بهبود خواص مکانیکی قابل توجهی با افزودن ژئولیت بر زمینه پلیمری اپوکسی توسط لی و همکاران [۹] گزارش شده است. علاوه‌بر خواص مکانیکی، ژئولیت می‌تواند به‌عنوان عامل هسته‌زا عمل کرده و منجر به افزایش بلورینگی و سختی سطحی و در نهایت بهبود مقاومت سایشی شود [۱۰]. چانگ و همکاران [۱۱] با افزودن تا ۲۰ درصد میکرو ذرات ژئولیت بر زمینه پلی اتیلن فوق سنگین، مقاومت سایشی را حداکثر ۲۵ درصد بهبود دادند. چو و همکاران [۱۲] مقاومت سایشی پوشش ژئولیت را در مقایسه با پوشش‌های کروم و کادمیوم بررسی کردند، نتایج نشان داد که پوشش‌های ژئولیت از نظر مقاومت در برابر سایش و خوردگی عملکرد بهتری نسبت به پوشش‌های کروم و کادمیوم دارند.

در سال‌های اخیر، نانو کامپوزیت‌های پلیمری، به دلیل برخورداری از خواص بهبود یافته‌ی خود نسبت به پلیمرهای خالص، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته‌اند [۱۳]. نانوذرات معدنی در مقایسه با ذرات معدنی میکرونی دارای سطح ویژه بسیار زیادتر است و بکارگیری آن در زمینه‌های پلیمری باعث بهبود سفتی، خواص ضربه‌ای و مقاومت به سایش می‌شود [۱۴]. به ویژه هنگامی که ذرات به طور یکنواخت در بستر پلیمری پراکنده شوند، بهبودیافتگی خواص به حداکثر خود خواهد رسید [۱۵]. افزودن نانو ذرات پرکننده در پلیمرهای نیمه بلوری سبب افزایش جوانه‌های بلوری در هنگام انجماد شده، و از این رو علاوه بر کوچکتر شدن اندازه‌ی دانه‌های بلوری، موجب افزایش بلورینگی و بهبود یکنواختی در زمینه‌ی

1 . GUR* 5129
2 . Z4A-005-R
3 . Tsuruta-cho

جدول ۱. فرمول بندی آمیخته‌های مختلف

Table 1. Material designation and composition

نام اختصاری آمیخته	پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا (درصد وزنی)	نانو زئولیت (درصد وزنی)
UHMWPE	۱۰۰	۰
UHMWPE /۲z	۱۰۰	۲
UHMWPE /۴z	۱۰۰	۴
UHMWPE /۶z	۱۰۰	۶

مقدار کاهش جرم نمونه‌ها و در نهایت مقدار سایش هر نمونه مشخص گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شکل شناسی

به منظور بررسی وجود و نحوه پراکندگی نانو ذرات زئولیت در زمینه پلیمر، تصاویر میکروسکوپی از مقاطع شکست نمونه‌های آزمون سایش تهیه شد. شکل ۱ مقایسه‌ای بین آمیخته‌های پلی اتیلن فوق سنگین خالص (الف)، آمیخته حاوی ۲ درصد وزنی (ب)، آمیخته حاوی ۴ درصد وزنی (ج) و نیز آمیخته‌ی حاوی ۶ درصد وزنی نانو ذرات زئولیت (د)، را نشان می‌دهد. با به کارگیری نانو ذرات زئولیت تا ۴ درصد وزنی، نانو ذرات بطور نسبتاً یکنواخت در پلیمر زمینه شده است. در نمونه حاوی ۶ درصد وزنی نانو ذرات زئولیت، پراکندگی ذرات کاهش یافته و آثار کلوخه شدن مشاهده می‌شود. با افزایش نانو ذرات در زمینه پلیمری، فاصله بین نانو ذرات کمتر شده و تمایل به کلوخه شدن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، کوچکی نانو ذرات و بزرگی سطح ویژه و در نتیجه بالا بودن تراز انرژی آزاد سطح، احتمال به هم چسبیدن ذرات و کلوخه شدن در درصدهای بیشتر را افزایش می‌دهد [۲۱-۲۳].

۳-۲- سایش

مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده از آزمون سایش، برای نمونه‌های پلی اتیلن خالص و نانو کامپوزیت‌های آن تحت بار ۵۰ N و سرعت ثابت ۰/۵ m/s در جدول ۲ و شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل، افزودن نانو ذرات زئولیت، منجر به کاهش ضریب اصطکاک شده است. کمترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه حاوی

دستگاه آسیاب به گرانول تبدیل شدند. علائم اختصاری و نسبت وزنی حضور مواد مختلف در آمیژه‌های تهیه شده در جدول ۱ مشخص شده است. نمونه‌های آزمون سایش به روش قالب‌گیری تزریقی با دمای تزریق °C ۱۶۰ و دمای قالب °C ۶۰ تولید شدند. به علاوه قبل از قالب‌گیری نمونه‌ها، آمیخته‌ها به مدت ۴ ساعت و در دمای °C ۸۰ رطوبت‌گیری شدند.

۳-۲- میکروسکوپ الکترونی روبشی

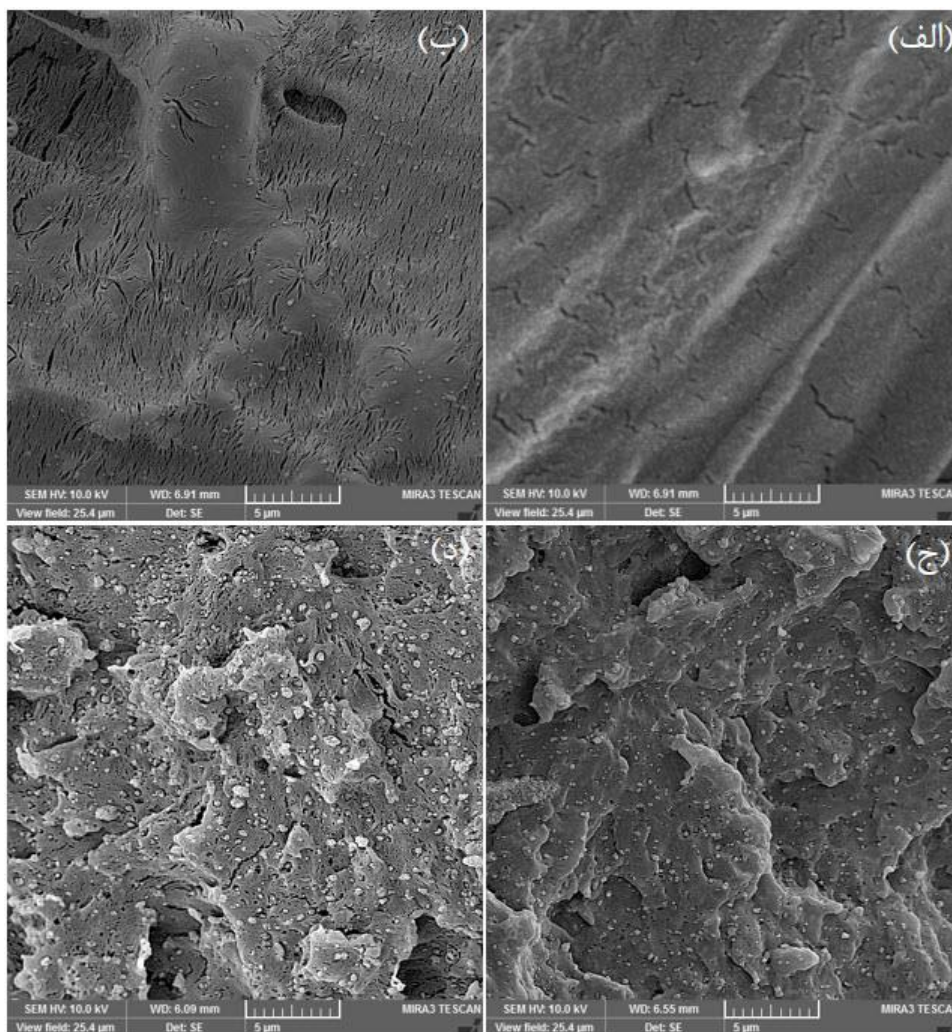
میکروسکوپ الکترونی روبشی با نام تجاری وگا/تسچان^۱ ساخت کشور چک با ولتاژ کاری ۱۰ kV برای بررسی ریز ساختار در نانو کامپوزیت‌ها و نحوه پراکندگی نانو ذرات در زمینه و همچنین شکل‌شناسی سایش در نمونه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. قبل از آزمون‌های میکروسکوپی، سطح نمونه‌ها توسط لایه‌ای از طلا پوشش‌دهی شد.

۴-۲- آزمون سایش

خواص تریبولوژی نمونه‌های پلی اتیلنی و نانو کامپوزیتی، با استفاده از دستگاه پین روی دیسک مطابق با استاندارد جی-۹۹^۲ مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد آزمایش به شکل استوانه‌هایی به قطر ۸ mm و طول ۳۰ mm قالب‌گیری شدند. دیسک سایش از فولاد شماره ۳۱۴ به قطر ۱۶۰ mm، ضخامت ۱۰ mm و صافی سطح ۰/۶ μm انتخاب گردید. آزمون سایش تحت نیروی فشاری ۵۰ N در سرعت ثابت ۰/۵ m/s و مسافت لغزش ۴۵۰۰ m در دمای محیط انجام گرفت. قبل و بعد از آزمون، جرم نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ mg اندازه‌گیری شده و با مقایسه آنها

1 . VEGA/TESCAN

2 . ASTM G99



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه‌های الف) UHMWPE، ب) UHMWPE/2z، ج) UHMWPE/4z، د) UHMWPE/6z
 Fig. 1. Scanning electron microscopy micrograph for (a) UHMWPE, (b) UHMWPE/2z, (c) UHMWPE/4z and (d) UHMWPE/6z samples

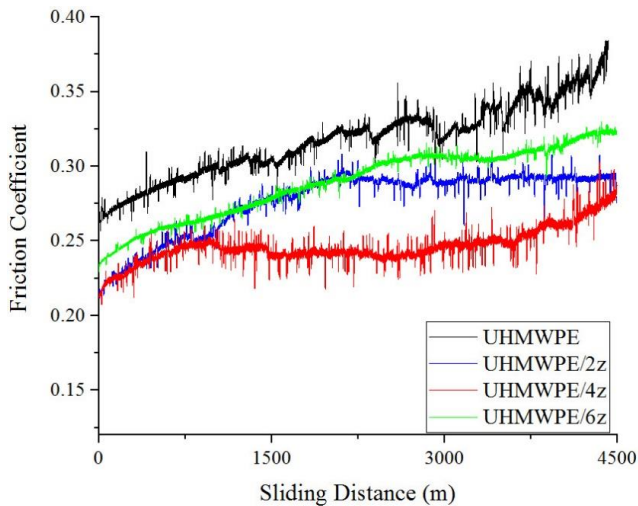
جدول ۲. مقادیر ضریب اصطکاک در مسافت طی شده‌های متفاوت برای نمونه خالص و نمونه‌های نانوکامپوزیت

Table 2. Coefficient of friction for pure and nanocomposites samples against various test duration

مسافت = ۴۵۰۰ m	مسافت = ۳۰۰۰ m	مسافت = ۱۵۰۰ m	
۰/۳۸۲	۰/۳۱۹	۰/۳۰۴	UHMWPE
۰/۲۷۲	۰/۲۸۹	۰/۲۷۶	UHMWPE/2z
۰/۲۸۸	۰/۲۵۱	۰/۲۴۰	UHMWPE/4z
۰/۳۲۶	۰/۳۰۱	۰/۲۷۸	UHMWPE/6z

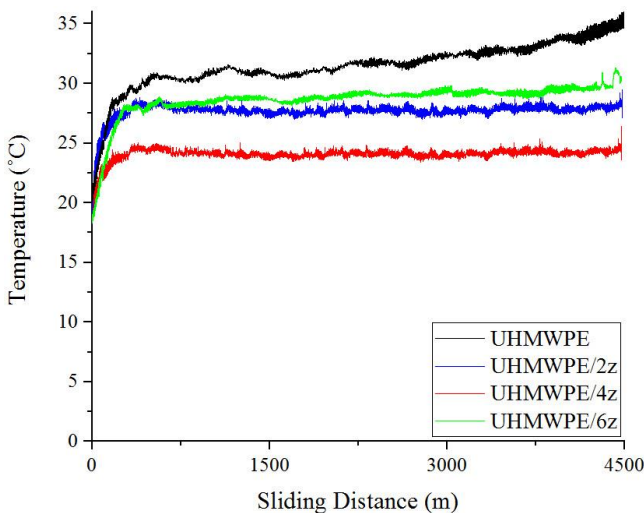
سایشی چرخنده‌های بر پایه پلی‌آمید-پلی‌پروپیلن با افزودن نانوذرات کلسیم کربنات (با هندسه شبه کروی) گزارش شده است. نانوذرات زئولیت در پلیمر زمینه علاوه بر خاصیت خودروانکاری، خاصیت هسته زنی داشته [۱۰] و می‌تواند منجر به افزایش درجه بلورینگی شود. افزایش بلورینگی، با افزایش دمای شیشه‌ای همراه می‌باشد. دمای

۴ درصد وزنی نانوذرات زئولیت می‌باشد. نانوذرات زئولیت با هندسه شبه کروی از تماس مستقیم پلیمر در منطقه سایش کاسته و در منطقه تماس دو سطح مانند روانکار جامد عمل کرده که این منجر به کاهش سطح تماس و در نتیجه کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. رفتار مشابهی توسط محسن زاده و شلش نژاد [۱۴] در بررسی رفتار



شکل ۲. مقایسه ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای نمونه خالص و نمونه‌های نانوکامپوزیتی

Fig. 2. Comparison of the coefficient of friction in terms of test duration for pure and nanocomposite samples



شکل ۳. مقایسه‌ی تغییرات دمای سطحی نمونه‌ها در آزمون سایش

Fig. 3. Comparison of surface temperature variation of samples in wear test

عنوان پارامتر اندازه‌گیری سایش انتخاب شده است. با توجه به شکل ۴، نمونه‌های نانوکامپوزیتی، مقاومت بیشتری در مقابل سایش نسبت به نمونه‌ی پلی اتیلنی خالص نشان داده‌اند. افزودن ۴ درصد وزنی از نانوذرات زئولیت به پلی اتیلن، منجر به کاهش حدود ۵۹ درصدی مقدار سایش نسبت به نمونه پلی اتیلنی خالص شده است. این رفتار را می‌توان به علت برهم کنش قوی نانوذرات تقویت‌کننده و پلیمر زمینه دانست [۲۹ و ۳۰]. با توجه به پراکنده شدن نانوذرات در پلیمر زمینه و بالا بودن سطح ویژه نانوذرات زئولیت، برهم کنش این نانوذرات

شیشه‌ای نیز مرز همبستگی دما و ضریب اصطکاک می‌باشد [۲۴]. بنابراین، افزایش دمای شیشه‌ای، ضریب اصطکاک را به خصوص در دماهای بالای دمای شیشه‌ای کاهش می‌دهد. علاوه‌براین، نانوذرات معدنی [۲۵]، همچون نانوذرات زئولیت، به علت آنکه ضریب اصطکاک پایین‌تری نسبت به پلیمر دارند، منجر به کاهش ضریب اصطکاک پلیمر زمینه می‌شوند.

شکل ۳، تغییرات دمایی در حین آزمون سایش تحت نیروی ۵۰ N و سرعت ۵ m/s نشان می‌دهد. علاوه‌براین، مقدارهای متناظر با نمودار دما - مسافت، در سه مسافت طی شده متفاوت (۱۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۴۵۰۰ متر) در جدول ۳ نشان داده شده است. تمام نمونه‌ها، اعم از نمونه خالص و نمونه‌های نانوکامپوزیتی، در ابتدا به دلیل افزایش گرمای حاصل از چگالی انرژی وابسته به کار اصطکاک نسبت به اتلاف گرمای هدایتی سطح تماس، شیب دمایی تند نشان می‌دهند و پس از آن به دلیل ایجاد تعادل در اثر انتقال حرارت، درجه حرارت تقریباً ثابت می‌ماند. با این حال، رفتار دمایی در نمونه خالص، به خصوص در انتهای مسیر، به دلیل سایش زیاد و در نتیجه افزایش زبری سطح و ضریب اصطکاک بیشتر نسبت به نمونه‌های نانوکامپوزیتی، رو به افزایش حرارت نشان می‌دهد. بکارگیری نانوذرات زئولیت تا ۴ درصد وزنی به پلی اتیلن، باعث کاهش دما و افزودن بیش از ۴ درصد وزنی نانوذرات زئولیت منجر به افزایش دما نسبت به نمونه‌های نانوکامپوزیتی شده است. کاهش دما با افزودن نانوذرات را می‌توان چنین توضیح داد که نانوذرات معدنی دارای هدایت گرمایی بالاتری در مقایسه با پلی اتیلن خالص می‌باشند. از سوی دیگر نانوذرات به دلیل داشتن سطح ویژه بالا [۲۶]، برهم کنش سطحی زیادی با پلیمر زمینه داشته که این می‌تواند منجر به افزایش هدایت گرمایی شده و از انباشتگی حرارت در سطح نمونه پلیمری ممانعت کند [۲۷ و ۲۸]. از سوی دیگر، بیشترین دما مربوط به نمونه حاوی ۶ درصد وزنی نانوذرات زئولیت می‌باشد و علت آن می‌تواند کلوخه‌ای شدن نانوذرات زئولیت باشد. تشکیل نواحی کلوخه‌ای از نانوذرات می‌تواند منجر به توزیع غیر یکنواخت دما و باعث انباشتگی حرارت در سطح نمونه‌ها شود.

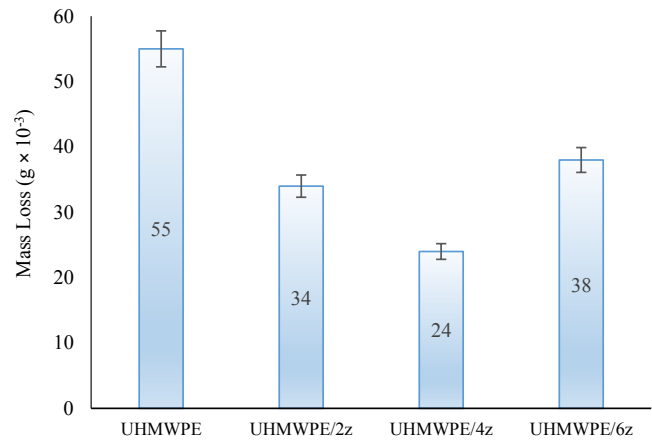
تأثیر نانوذرات زئولیت در مقدار کاهش جرم نمونه‌های نانوکامپوزیت در مقایسه با نمونه‌ی پلی اتیلنی خالص، پس از اتمام آزمون، در شکل ۴ نشان داده شده است. مقدار کاهش جرم نمونه به

جدول ۳. مقادیر درجه حرارت ($^{\circ}\text{C}$) در مسافت طی شده‌های متفاوت برای نمونه خالص و نمونه‌های نانوکامپوزیت

Table 3. Contact temperature for pure and nanocomposites samples against various test duration

مسافت = ۴۵۰۰ m	مسافت = ۳۰۰۰ m	مسافت = ۱۵۰۰ m	
۳۵/۳۴	۳۲/۱۶	۳۰/۹۸	UHMWPE
۲۸/۳۰	۲۷/۶۴	۲۷/۳۲	UHMWPE /۲z
۲۴/۱۲	۲۴/۰۴	۲۳/۸۸	UHMWPE /۴z
۳۰/۱۱	۲۹/۶۶	۲۸/۶۷	UHMWPE /۶z

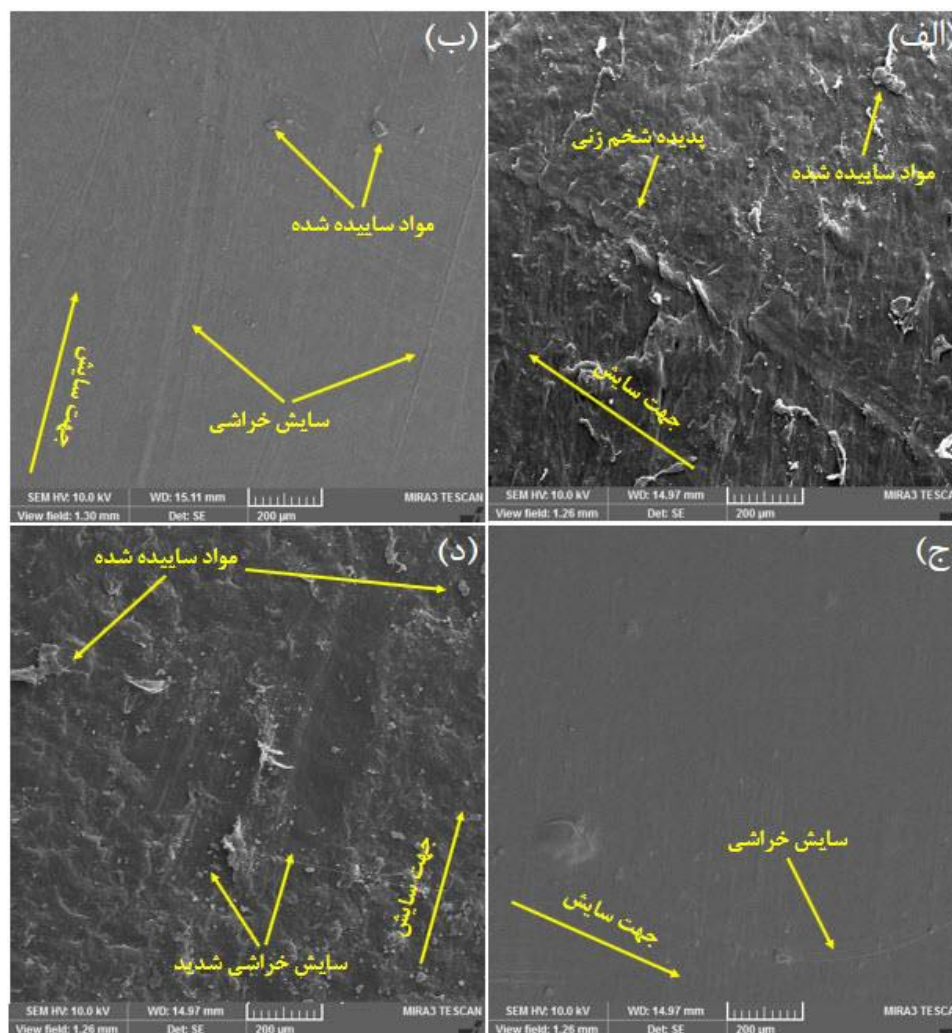
تصویربرداری انجام گرفته به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی از سطح سایش و تحلیل آنها، اطلاعات مفیدی را در مورد سازکار سایش ارائه می‌دهد. شکل ۵، تصاویر میکروسکوپی از بافت سطحی نمونه خالص و نمونه‌های نانوکامپوزیتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵، آثار سایش خراشی بصورت شیارهایی، هم‌جهت با جهت سایش برای همه نمونه‌ها دیده می‌شود. در سطح نمونه‌ی پلی اتیلنی خالص (شکل ۵، الف)، سایش شدید با عمق زیاد که توسط دیسک ساینده ایجاد شده و همچنین سایش چسبان همراه با مواد جدا شده در حین آزمون سایش، مشاهده می‌شود. علت این امر، نرم بودن سطح سایش نمونه‌ی بدون نانو ذرات می‌باشد. در اثر اصطکاک مالشی دمای سطح نمونه‌ها افزایش یافته و به علت مقاومت پایین پلیمر زمینه در مقابل حرارت، پیوند بین زنجیره‌های پلیمری بیشتر شکسته می‌شود. بدین ترتیب زنجیره‌های پلیمری از زمینه کنده شده و مقدار سایش افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مواد جدا شده در حین فرایند سایش، در جهت سایش حرکت کرده و با ملحق شدن بهم‌دیگر در حین سایش، حجم بزرگتری از براده تشکیل می‌دهند. این مواد ساییده شده با حجم بزرگتر، خود بعنوان عامل سوم در سطح سایش عمل کرده و منجر به تشدید سایش و در نتیجه پدیده شخم زنی و خشنی سطح می‌شود. با افزودن تا ۴ درصد وزنی نانو ذرات ژئولیت به زمینه پلیمری خالص، سطح صافتری مشاهده می‌شود (شکل ۵، ج و د). در مقایسه با شکل ۵ الف، سطح ساییده شده نمونه‌های نانوکامپوزیتی حاوی ۲ و ۴ درصد نانو ذرات ژئولیت، بدون نشانه‌هایی از شخم زنی و سایش خراشی شدید، صاف‌تر است که نشانگر تغییر در الگوهای حرکتی نانو ذرات از لغزش به غلتش می‌باشد. دلیل این مهم را می‌توان به افزایش حرکت زنجیره‌های مولکولی پلیمر زمینه در منطقه تماس و در دمای بالا نسبت داد. در این حالت، چسبندگی پلیمر-نانو ذره کاهش یافته و نانو ذرات آزادی حرکت پیدا کرده و حرکت خود را از لغزش به غلتش تغییر می‌دهند. این اثر غلتشی مثبت که باعث کاهش سطح تماس



شکل ۴. کاهش جرم نمونه‌ها در آزمایش سایش

Fig. 4. Mass reduction of samples in wear test

و پلیمر زمینه بیشتر گشته، که این امر نیز منجر به تقویت خواص سایشی پلیمر زمینه شده است. افزون بر این نانو ذرات ژئولیت، به دلیل برخورداری از شکل هندسی شبه کروی، می‌تواند نقش روانکار را ایفا کند. به عبارت دیگر این نانو ذرات نقش غلتکی را دارند که هنگام بریده شدن رشته‌ای از پلیمر در مرز واسط بین زمینه‌ی پلیمری و دیسک ساینده، بین دو سطح سایش قرار می‌گیرند و از لغزش مستقیم آنها بر هم جلوگیری می‌کنند [۳۱]. علاوه بر این، نانو ذرات ژئولیت در پلیمر زمینه موجب افزایش جوانه‌زنی شده و می‌توانند منجر به افزایش درجه‌ی بلورینگی و در نتیجه افزایش سختی سطحی و مقاومت سایشی شوند [۱۰]. کاهش ضریب اصطکاک در اثر کاهش سطح تماس پلیمر-فلز و همچنین کاهش دما در سطح درگیری بین و دیسک در اثر افزایش انتقال حرارت در حضور نانو ذرات ژئولیت، از دیگر عامل‌های کاهش مقدار سایش می‌باشد. با افزایش مقدار نانو ذرات ژئولیت، به تراکم ذرات افزوده می‌شود و از این رو احتمال تشکیل کلوخه‌هایی در زمینه‌ی پلیمری به وجود می‌آید [۳۲ و ۳۳]. آنگاه این ذرات کلوخه‌ای به عنوان عامل ساینده عمل می‌کنند و منجر به تشدید سایش می‌شوند [۳۴].



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح ساییده شده‌ی نمونه‌های مختلف، (الف) UHMWPE، (ب) UHMWPE /2z، (ج) UHMWPE /4z و (د) UHMWPE /6z

بالا/زئولیت محتوی ۲ تا ۶ درصد وزنی از نانو ذرات زئولیت به روش قالبگیری تزریقی تولید و تحت آزمون پین روی دیسک تحت نیروی فشاری ۵۰ N و سرعت ثابت ۰/۵ m/s قرار گرفتند. نتایج نشان داد، بکارگیری ۴ درصد وزنی از نانو ذرات زئولیت منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ی ساییش گردید. بکارگیری ۶ درصد وزنی از نانو ذرات زئولیت، منجر به کلوخه شدن ذرات و افزایش مقدار ساییش، حرارت و ضریب اصطکاک، نسبت به نمونه‌های نانوکامپوزیتی شد. مقدار ساییش، دما و ضریب اصطکاک در نمونه حاوی ۲ درصد وزنی از نانو زئولیت، پس ۴۵۰۰ متر، به ترتیب حدود ۵۶، ۳۲ و ۲۶ درصد کمتر از نمونه پلی اتیلنی خالص مشاهده شد. علاوه بر این، مورفولوژی نمونه‌های نانوکامپوزیتی، سطح صافتر نسبت به سطح ساییده شده

می‌شود، در مطالعات قبلی در زمینه‌های پلیمری دیگر نیز مشاهده شده است [۳۷-۳۵]. کاهش ضریب اصطکاک، دما و در نتیجه مقدار ساییش، تأیید کننده چنین پدیده‌ای می‌باشد. در مقابل، با توجه به شکل ۵ د، نانو ذرات زئولیت در مقادیر بالا، به دلیل کشش سطحی بالا و عدم چسبندگی و پخش‌شدگی نامناسب در پلیمر زمینه، به هم می‌چسبند و کلوخه‌هایی تشکیل می‌دهند. این کلوخه‌های سخت، در سطح تماس ما بین سطح پین و دیسک قرار می‌گیرند و خود با ایجاد شرایط ساییش سه جسمی، منجر به شدت یافتن ساییش می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

نمونه‌های نانوکامپوزیتی پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار

نمونه پلی اتیلنی خالص نشان داد.

مراجع

- resistant coating, *Microporous and Mesoporous Materials*, 351-346 (2012) 151.
- [13] R. Mohsenzadeh, H. Majidi, M. Soltanzadeh, K. Shelesh-Nezhad, Wear and failure of polyoxymethylene/calcium carbonate nanocomposite gears, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 820-811 (2019) (6)234.
- [14] R. mohsenzadeh, K. Shelesh-Nezhad, Experimental studies on the durability of PA-6PP-CaCO₃ nanocomposite gears, *Journal of Science and Technology of Composites*, 156-147 (2016) (2)3.
- [15] S. Sahebian, S. Zebarjad, S. Sajjadi, The effect of temperature and nano-sized calcium carbonate on tensile properties of medium density polyethylene; Asare dama va nanozarat karbonat kalsium bar khavase kesheshi polietilene ba chegali-e motavaset, *Polymer Science and Technology*, 140-133 (2008) (2)21.
- [16] S. Bhattacharya, M. Kamal, R. Gupta, *Polymeric nanocomposites: theory and practice*, 2008.
- [17] X. Kong, S. Chakravarthula, Y. Qiao, Evolution of collective damage in a polyamide 6-silicate nanocomposite, *International Journal of Solids and Structures*, (20)43 5980-5969 (2006).
- [18] M.M. Haque, M. Hasan, TiO₂ and zeolite nanopowder enhanced mechanical properties of hybrid polymer composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 395-382 (2021) (3)34.
- [19] R. Soenoko, A. Suprpto, Y.S. Irawan, Impact fracture toughness evaluation by essential work of fracture method in high density polyethylene filled with zeolite, *FME Transactions*, 186-180 (2016) (2)44.
- [20] E. Ghobadi, M. Hemmati, G. Khanabaei, M. Shojaei, M. Asghari, Effect of nanozeolite 13X on thermal and mechanical properties of Polyurethane nanocomposite thin films, *International Journal of Nano Dimension*, (2)6 181-177 (2015).
- [21] B.L. Lee, L.E. Nielsen, Temperature dependence of the dynamic mechanical properties of filled polymers, *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, (1977) (4)15 692-683.
- [1] S.M. Kurtz, *The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement*, Elsevier, 2004.
- [2] H. Stein, *Engineered Materials Handbook, Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)*, 1999.
- [3] X. Dangsheng, Friction and wear properties of UHMWPE composites reinforced with carbon fiber, *Materials letters*, 179-175 (2005) (3-2)59.
- [4] Y.-S. Zoo, J.-W. An, D.-P. Lim, D.-S. Lim, Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE, *Tribology Letters*, 309-305 (2004) (4)16.
- [5] K. Plumlee, C.J. Schwartz, Improved wear resistance of orthopaedic UHMWPE by reinforcement with zirconium particles, *Wear*, 717-710 (2009) (8-5)267.
- [6] B.-P. Chang, H.M. Akil, R.B.M. Nasir, Comparative study of micro-and nano-ZnO reinforced UHMWPE composites under dry sliding wear, *Wear*, (2013) (2-1)297 1127-1120.
- [7] D. Xiong, J. Lin, D. Fan, Wear properties of nano-Al₂O₃/UHMWPE composites irradiated by gamma ray against a CoCrMo alloy, *Biomedical Materials*, 175 (2006) (3)1.
- [8] E.A. Aksoy, B. Akata, N. Bac, N. Hasirci, Preparation and characterization of zeolite beta-polyurethane composite membranes, *Journal of applied polymer science*, (5)104 3387-3378 (2007).
- [9] J.Y. Lee, M.J. Shim, S.W. Kim, Effect of natural zeolite on the mechanical properties of epoxy matrix, *Polymer Engineering & Science*, 1997-1993 (1999) (10)39.
- [10] Z. Lv, K. Wang, Z. Qiao, W. Wang, The influence of modified zeolites as nucleating agents on crystallization behavior and mechanical properties of polypropylene, *Materials & design*, 3809-3804 (2010) (8)31.
- [11] B.P. Chang, H.M. Akil, R.M. Nasir, Mechanical and tribological properties of Zeolite-reinforced UHMWPE composite for implant application, *Procedia Engineering*, 94-88 (2013) 68.
- [12] G. Chow, R.S. Bedi, Y. Yan, J. Wang, Zeolite as a wear-

- Composite Materials, 1047-1030 (2020) (8)33.
- [30] S.-C. Shi, X.-N. Tsai, S.-S. Pek, Tribological behavior and energy dissipation of hybrid nanoparticle-reinforced HPMC composites during sliding wear, *Surface and Coatings Technology*, 125617 (2020) (15)389.
- [31] M. Zhang, X. Wang, X. Fu, Y. Xia, Performance and anti-wear mechanism of CaCO₃ nanoparticles as a green additive in poly-alpha-olefin, *Tribology International*, 1039-1029 (2009) (7)42.
- [32] M.A. Ashraf, W. Peng, Y. Zare, K.Y. Rhee, Effects of size and aggregation/agglomeration of nanoparticles on the interfacial/interphase properties and tensile strength of polymer nanocomposites, *Nanoscale research letters*, 214 (2018) (1)13.
- [33] Y. Zare, Study of nanoparticles aggregation/agglomeration in polymer particulate nanocomposites by mechanical properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 164-158 (2016) 84.
- [34] N. Sapiai, A. Jumahat, M. Jawaid, C. Santulli, Abrasive Wear Behavior of CNT-Filled Unidirectional Kenaf-Epoxy Composites, *Processes*, 128 (2021) (1)9.
- [35] L. Chang, Z. Zhang, L. Ye, K. Friedrich, Tribological properties of high temperature resistant polymer composites with fine particles, *Tribology international*, 1178-1170 (2007) (7)40.
- [36] L. Chang, Z. Zhang, H. Zhang, A. Schlarb, On the sliding wear of nanoparticle filled polyamide 66 composites, *Composites Science and Technology*, -3188 (2006) (16)66 3198.
- [37] L. Chang, Z. Zhang, Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO₂, *Wear*, -869 (2006) (8-7)260 878.
- [22] C.-M. Chan, J. Wu, J.-X. Li, Y.-K. Cheung, Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites, *polymer*, (10)43 2992-2981 (2002).
- [23] A. Kiss, E. Fekete, B. Pukánszky, Aggregation of CaCO₃ particles in PP composites: Effect of surface coating, *Composites science and technology*, -1574 (2007) (8-7)67 1583.
- [24] A. Egorenkov, Effect of crystallization on the frictional properties of polymers, *Polymer Mechanics*, (1978) (6)14 803-800.
- [25] A. Cotet, M. Bastiurea, G. Andrei, A. Cantaragiu, A. Hadar, Dry Sliding Friction Analysis and Wear Behavior of Carbon Nanotubes/Vinylester Nanocomposites, Using Pin-on-Disc Test, *REVISTA DE CHIMIE*, (2019) (10)70 3596-3592.
- [26] T. Xu, N. Liao, Y. Xu, M. Nath, Y. Li, Y. Chen, S. Sang, In situ detoxification and mechanical properties of Al₂O₃-3Cr₂O₃-3CaO castables with zeolite, *Journal of the European Ceramic Society*, 985-978 (2021) (1)41.
- [27] X. Wang, X. Niu, X. Wang, X. Qiu, L. Wang, Effects of filler distribution and interface thermal resistance on the thermal conductivity of composites filling with complex shaped fillers, *International Journal of Thermal Sciences*, 106678 (2021) 160.
- [28] W.A. Lee Sanchez, C.-Y. Huang, J.-X. Chen, Y.-C. Soong, Y.-N. Chan, K.-C. Chiou, T.-M. Lee, C.-C. Cheng, C.-W. Chiu, Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy Composites Filled with Al₂O₃/Boron Nitride Hybrids for Underfill Encapsulation Materials, *Polymers*, (2021) (1)13 147.
- [29] U. Uyor, A. Popoola, O. Popoola, V. Aigbodion, Effects of titania on tribological and thermal properties of polymer/graphene nanocomposites, *Journal of Thermoplastic*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Mohsenzadeh, *Experimental Studies on the Tribology behavior of UHMWPE/zeolite Nanocomposite*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(10) (2022) 5159-5168.

DOI: [10.22060/mej.2021.19525.7044](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19525.7044)



