

## Mechanism of Improvement in Tribological Properties of Polyamide 6 by Addition of Irradiated Polytetrafluoroethylene Powder

Iraj Faramarzi<sup>1</sup>, Mehdi Razzaghi-Kashani<sup>1\*</sup>, and Milad Mehranpour<sup>2</sup>

1. Polymer Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box: 14115-114, Tehran, Iran
2. Polymer Engineering Group, Faculty of Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O. Box: 14515-775, Tehran, Iran

Received: 21 June 2014, accepted: 9 November 2014

### ABSTRACT

In recent years, for economical, ecological and technical reasons, the tendency to use self-lubricant materials in tribological applications has been increased. Among self-lubricant materials, the engineering plastics and their composites, especially polyamides due to their suitable physical and mechanical properties, have gained a special attention in tribological applications. Since engineering polymers in their pure form are not capable to satisfy the tribological requirements, the application of different fillers seems to be necessary. In this research, in order to improve the tribological behavior of polyamide 6, an irradiated polytetrafluoroethylene (IR-PTFE) powder as a solid lubricant with the percentages of 5, 10 and 15% was used. The composites were prepared by the melt mixing method and then formed by the injection process. In order to investigate the dispersion of IR-PTFE as the second phase in the polymer matrix, electron microscopy was used. The results showed a proper distribution of IR-PTFE powder particles and a low adhesion of the powder to the polymeric matrix. The mechanical properties in uniaxial tension for determination of a suitable percentage of the filler were used. Also, the samples were subjected to water absorption and tribological long-term experiments. The formation of the transfer films in the pure polymer and the composite containing 5wt% of IR-PTFE powder as the second-phase polymer was observed with an optical microscope. The results showed that the composite containing 5wt% the irradiated polytetrafluoroethylene powder had the least effect on decreasing the mechanical properties. Also, the addition of IR-PTFE powder increased the transfer films and decreased the coefficient of friction, contact surface temperature and wear rate of polyamide 6. In addition, the application of proper quantity of the irradiated polytetrafluoroethylene powder decreased the water absorption of the composites.

#### Keywords:

irradiated polytetrafluoroethylene powder, polyamide 6, tribology, transfer film, polymeric composite

(\* )To whom correspondence should be addressed.

E-mail: mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

# سازوکار بهبود خواص تریبولوژیکی پلی آمید ۶ با افزودن پودر پلی تترافلوئورواتیلن پرتودهی شده

ایرج فرامرزی<sup>۱</sup>، مهدی رزاقی کاشانی<sup>۲\*</sup>، میلاد مهران پور<sup>۲</sup>

۱- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۱۴-۱۴۱۱۵  
 ۲- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۷۷۵-۱۴۵۱۵

دریافت: ۹۳/۳/۳۱، پذیرش: ۹۳/۸/۱۸

## چکیده

در سال‌های اخیر، به دلایل اقتصادی، اکولوژی و فنی تمایل به استفاده از مواد خودروان‌کننده در کاربردهای تریبولوژیکی افزایش یافته است. از میان مواد خودروان‌کننده، پلاستیک‌های مهندسی، به‌ویژه پلی آمیدها به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب، جایگاه ویژه‌ای در این کاربردها یافته‌اند. از آنجا که پلیمرهای مهندسی خالص قابلیت تأمین الزامات تریبولوژیکی سخت را ندارند، استفاده از پرکننده‌های مختلف بدین منظور لازم است. در پژوهش حاضر، رفتار تریبولوژیکی کامپوزیت پلی آمید ۶ دارای پودر پلی تترافلوئورواتیلن پرتودهی شده به‌عنوان روان‌کننده جامد با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵٪ وزنی بررسی شد تا سازوکار بهبود رفتار اصطکاکی - فرسایشی پلی آمید ۶ با افزایش این افزودنی بررسی شود. کامپوزیت‌ها به روش اختلاط مذاب تهیه و سپس با فرایند تزریق شکل‌دهی شدند. برای بررسی پراکنش پودر پلی تترافلوئورواتیلن به‌عنوان فاز دوم در ماتریس پلیمری از تصاویر میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. نتایج حاکی از توزیع مناسب ذرات پودر پلی تترافلوئورواتیلن و چسبندگی کم آن با ماتریس پلیمری بود. از خواص مکانیکی در کشش تک‌محوری برای تعیین درصد مناسب پرکننده استفاده شد. نمونه‌های حاصل تحت آزمون‌های بلندمدت جذب آب و تریبولوژیکی قرار گرفتند. مقدار تشکیل فیلم انتقالی در پلیمر خالص و کامپوزیت دارای ۵٪ وزنی پودر پلی تترافلوئورواتیلن (پلیمر فاز دوم) با میکروسکوپ نوری مشاهده شد. نتایج نشان داد، از میان کامپوزیت‌های تهیه شده، نمونه دارای ۵٪ وزنی پودر پلی تترافلوئورواتیلن پرتودهی شده کمترین اثر را در کاهش خواص مکانیکی دارد. از سویی، افزودن این مقدار پودر پلی تترافلوئورواتیلن سبب افزایش فیلم انتقالی، کاهش ضریب اصطکاک، دمای سطح تماس و سرعت فرسایش پلی آمید ۶ می‌شود. همچنین، افزایش مقدار مناسب پودر پلی تترافلوئورواتیلن پرتودهی شده باعث کاهش جذب آب کامپوزیت‌ها می‌شود.

## واژه‌های کلیدی

پودر پلی تترافلوئورواتیلن  
 پرتودهی شده،  
 پلی آمید ۶،  
 تریبولوژی،  
 فیلم انتقالی،  
 کامپوزیت پلیمری

\* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:  
 mehdi.razzaghi@modares.ac.ir

## مقدمه

پلیمرهایی که تشکیل فیلم نمی‌دهند یا فیلم ناپایدار است، مشارکت کنند. اما، از آنجا که پلی تترافلوئورواتیلن به طور ذاتی چسبندگی کمی دارد و ماده‌ای خنثی است، اصلاح سطح آن برای بهبود سازگاری و پراکندگی در ماتریس پلیمری شرط اساسی است. تابش پرتو الکترونی روی پلی تترافلوئورواتیلن روش مؤثری برای اصلاح این پودر است. پرتودهی پلی تترافلوئورواتیلن با انرژی زیاد پرتو الکترونی باعث شکست زنجیرها و کاهش وزن مولکولی آن می‌شود. همچنین پرتودهی با انرژی بیش از ۵۰۰ kJ باعث اصلاح شیمیایی سطح، سازگاری بیشتر با ماتریس پلیمری و تمایل کمتر ذرات پلی تترافلوئورواتیلن به تشکیل خوشه می‌شود [۱۲، ۱۳].

نتایج نشان داد، ترکیب روان‌کننده جامد PTFE و الیاف کربن ضریب اصطکاک و سرعت فرسایش پلی‌ایمید (PI) در حالت‌های مختلف خشک و تر را کاهش می‌دهد. گفتنی است، ضریب اصطکاک و سرعت فرسایش در حالت تر بیشتر از حالت خشک کاهش می‌یابد [۱۴]. همچنین، ترکیب روان‌کننده جامد PTFE و الیاف کربن خواص تریبولوژیکی اپوکسی را افزایش می‌دهد [۱۵]. Li [۱۶] اثر روان‌کننده جامد PTFE را روی کامپوزیت نایلون تقویت شده با الیاف شیشه و پرکننده CUO بررسی کرد. وی نشان داد، این ترکیب نقش مؤثری در کاهش فرسایش به دلیل تشکیل فیلم انتقالی دارد. همچنین، در مطالعه‌ای که برای بهینه‌کردن خواص تریبولوژیکی کامپوزیت پلی‌آمید ۶ - الیاف شیشه انجام شد، از روان‌کننده‌های تفلون و پلی اتیلن با وزن مولکولی زیاد به طور جداگانه و ترکیبی از هر دو استفاده و نشان داده شد، تفلون خواص تریبولوژیکی کامپوزیت را بهبود داده است. اما، پلی اتیلن با وزن مولکولی زیاد اثر منفی روی خواص تریبولوژیکی کامپوزیت داشت. ترکیب درصد‌های بهینه این دو روان‌کننده نیز اثر هم‌افزایی روی خواص تریبولوژیکی داشت [۱۷]. همچنین نشان داده شد، روان‌کننده جامد PTFE مقاومت فرسایشی کامپوزیت پلی‌آمید ۱۲ تقویت شده با الیاف کربن را افزایش و ضریب اصطکاک کامپوزیت را کاهش می‌دهد [۱۸]. در پژوهشی دیگر، اثر PTFE بر خواص مکانیکی و جذب آب پلی‌آمیدها مطالعه شد. نتایج نشان داد، با اضافه کردن تفلون به ماتریس پلیمری پلی‌آمید ۶ و پلی‌آمید ۶۶ جذب آب هر یک از کامپوزیت‌های مزبور کاهش یافت [۴].

در اکثر مطالعه‌های پیش گفته، پدیده تغییر ضرایب اصطکاک و فرسایش بررسی شد، بدون اینکه بر سازوکار اثر این افزودنی‌ها بر خواص مزبور تأکید زیادی شود. در پژوهش حاضر، اثر پودر PTFE پرتودهی شده بر خواص فیزیکی، مکانیکی و تریبولوژیکی پلی‌آمید ۶ بررسی شد تا افزون بر تعیین مقدار بهینه پودر برای بهبود رفتار اصطکاک و فرسایشی آن، عملکرد این افزودنی در سازوکار رفتار تریبولوژیکی بررسی شود.

پلیمرها به دلیل سهولت فرایند و ساخت و نیز پتانسیل زیاد در عملکردهای مکانیکی و تریبولوژیکی، نقش مهمی در مهندسی ایفا می‌کنند. امروزه، پلیمرها و کامپوزیت‌های آنها به عنوان مواد مهندسی در کاربردهای تریبولوژیکی به طور گسترده استفاده می‌شوند [۱]. از میان پلیمرها، پلاستیک‌ها و به ویژه پلاستیک‌های مهندسی، به دلیل وجود ترکیبی از خواص متنوع مانند سبکی، سختی، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر خوردگی، رنگ‌پذیری، شفافیت، سهولت شکل‌پذیری و خودروان‌کنندگی در مقایسه با سایر مواد مهندسی برای کاربردهای تریبولوژیکی اهمیت بسیاری دارند [۲]. پلی‌آمیدها، به ویژه پلی‌آمید ۶، دسته‌ای از پلاستیک‌های مهندسی هستند که دارای مزیت‌هایی مانند استحکام زیاد، مقاومت خوردگی عالی، مقاومت فرسایشی مناسب و خواص خودروان‌کنندگی مطلوب‌اند و به طور گسترده به عنوان قطعه‌های مهندسی استفاده می‌شوند. اما در بسیاری از کاربردهای سخت، بهبود خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آنها ضروری است [۳]. از معایب اصلی پلی‌آمیدها، تمایل به جذب آب و تورم است. جذب آب، افزون بر اینکه روی پایداری ابعادی اثر می‌گذارد، خواص مکانیکی را تغییر می‌دهد. در نتیجه، کاربرد آنها را در محیط‌های مرطوب مشکل می‌سازد [۴].

نتایج مطالعه‌های زیاد در زمینه رفتار تریبولوژیکی پلی‌آمیدها در تماس با سطوح فلزی نشان می‌دهد، سازوکار رفتار کلی پلی‌آمیدها در تماس لغزشی با سطوح فلزی، شامل تشکیل و انتقال لایه نازکی از پلیمر بر سطح مقابل بوده که به فیلم انتقالی معروف است. نقش این فیلم، پوشاندن برآمدگی‌های سطح مقابل است و اگر به حالت پایدار و با ضخامت کافی تشکیل شود، سبب لغزش پلیمر بر پلیمر می‌شود و فرسایش ناشی از شخم‌زنی برآمدگی‌ها و تغییر شکل‌های پلاستیک بسیار کاهش می‌یابد [۵، ۶]. اما، فیلم انتقالی تشکیل شده پلی‌آمیدها در کاربردهای سخت (زیر فشار و سرعت زیاد) پایدار نیست و تخریب می‌شود. در نتیجه، تأمین و تقویت فیلم انتقالی و کاهش ضریب اصطکاک از مهم‌ترین تصحیح‌های اثرگذار بر اصلاح رفتار تریبولوژیکی پلی‌آمیدها به شمار می‌آید [۷].

از راه‌های معمول تقویت مکانیکی پلیمر و فیلم انتقالی، استفاده از پرکننده‌های تقویتی مناسب مانند اکسیدهای فلزی و الیاف کوتاه است [۸، ۹]. از سوی دیگر، افزودن روان‌کننده‌های جامد مانند گرافیت، مولیبدن دی‌سولفید و پودر پلی تترافلوئورواتیلن (PTFE) به دلیل داشتن ضریب اصطکاک کم، پایداری دما زیاد و مقاومت شیمیایی زیاد برای کاهش ضریب اصطکاک فراوان استفاده می‌شوند [۸-۱۱]. از میان روان‌کننده‌های جامد، پودر PTFE می‌تواند در تأمین فیلم انتقالی در

## تجربی

## مواد

از پلی‌آمید ۶ (Badamid B70 S) با چگالی  $1/13 \text{ g/cm}^3$  محصول شرکت BADA PLAST آلمان به‌عنوان ماتریس پلیمری و روان‌کننده جامد پودر PTFE پرتودهی شده Sinoflon LUB5 با چگالی  $2/19 \text{ g/cm}^3$  محصول شرکت JINAN چین استفاده شد.

## روش‌ها و دستگاه‌ها

## ساخت کامپوزیت دارای PTFE پرتودهی شده

پیش از شروع فرایند اختلاط، تمام مواد به مدت ۲۴ h در شرایط خلأ و دمای  $80^\circ\text{C}$  رطوبت‌گیری شدند. برای تهیه این کامپوزیت با توجه به مقاله‌های مطالعه شده، مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۵٪ وزنی از PTFE انتخاب شد. در کدگذاری نمونه‌ها از حرف P برای پلی‌آمید ۶ خالص و از حرف T برای کامپوزیت‌های دارای پودر PTFE پرتودهی شده استفاده شده است. عدد پس از این حروف، درصد وزنی پودر PTFE را در کامپوزیت نشان می‌دهد. اختلاط کامپوزیت‌ها به روش یک مرحله‌ای (اکستروژن) انجام شد. فخار و همکاران [۱۹] نشان دادند، در تهیه کامپوزیت پلی‌استال - پودر PTFE به علت تفاوت در شکل پلی‌استال (گرانول) و PTFE (پودر) در قیف خوراک‌دهنده اکسترودر، جدایی دو ماده رخ داده و بنابراین کامپوزیت یکنواختی حاصل نشده است. از این رو طبق روش استفاده شده در صنعت، سطح گرانول‌های پلی‌آمید ۶ به مقدار کم (۱٪) با روغن DOP آغشته شد.

سپس، این گرانول‌ها به روش مکانیکی با پودر PTFE در درصد‌های اشاره شده مخلوط شدند و مخلوط درون قیف خوراک‌دهنده اکسترودر ریخته شد. دمای نواحی گرمایی اکسترودر به ترتیب از ناحیه خوراک‌دهی تا نازل برابر ۲۰۰، ۲۱۰، ۲۲۰ و  $235^\circ\text{C}$ ، سرعت چرخش پیچ برابر ۱۲۰ rpm و خوراک‌دهی با سرعت  $80 \text{ g/h}$  در نظر گرفته شد. مواد حاصل از اختلاط به گرانول تبدیل شده و پس از رطوبت‌گیری مجدد، با قالب‌گیری تزریقی به شکل نمونه‌های مورد نیاز شکل‌دهی شدند. در فرایند تزریق، دمای سیلندر به ترتیب از قیف به نازل برابر با ۲۳۰، ۲۴۰ و  $255^\circ\text{C}$  قرار داده شد. تزریق مواد با فشار ۷۰ MPa و سرعت پیچ ۴۵ rpm در ۳ s انجام و فشار ثانویه ۶۵ MPa به مدت ۴ s در نظر گرفته شد. دمای قالب با استفاده از گردش آب داغ روی  $80^\circ\text{C}$  تنظیم شد. نمونه‌ها پیش از خروج از قالب به مدت ۱۰ s خنک‌کاری شدند.

## آزمون‌ها

آزمون کشش تک‌محوری برای شناسایی رفتار مکانیکی نمونه‌ها طبق

استاندارد ASTM D638 به‌کار گرفته شد. این آزمون با دستگاه کشش Instron ساخت انگلستان انجام شد و از هر نمونه شش عدد به‌طور تصادفی انتخاب و با سرعت  $20 \text{ mm/min}$  بررسی شدند. برای اندازه‌گیری مدول کشسانی در کرنش‌های کم از کرنش‌سنج متعلق به دستگاه کشش استفاده شد. برای بررسی اثر PTFE پرتودهی شده بر جذب آب پلی‌آمید ۶، از هر نمونه چهار عدد به‌طور تصادفی انتخاب شدند. ابتدا، نمونه‌ها به مدت ۴۸ h درون گرم‌خانه خلأ در دمای  $80^\circ\text{C}$  رطوبت‌گیری و سپس با ترازوی چهاررقمی وزن شدند ( $m_1$ ). در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۴۸ h در دمای  $30^\circ\text{C}$  درون آب مقطر غوطه‌ور و وزن آنها ثبت شد ( $m_2$ ). مجدداً نمونه‌ها به مدت ۴۸ h در گرم‌خانه خلأ در دمای  $80^\circ\text{C}$  رطوبت‌گیری و وزن آنها یادداشت شد ( $m_3$ ). سپس، از معادله (۱) جذب آب هر یک از نمونه‌ها محاسبه شد:

$$\text{sorption} = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \quad (1)$$

برای بررسی توزیع ذرات و چسبندگی PTFE پرتودهی شده در ماتریس پلی‌آمید ۶، از سطوح شکست نمونه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵٪ وزنی پودر تفلون پرتودهی شده تصاویری با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مدل XL30 ساخت شرکت Philips هلند تهیه شد. برای بررسی عملکرد تریبولوژیکی پلی‌آمید ۶ و کامپوزیت‌های دارای پودر PTFE پرتودهی شده از دستگاه تریومتر ساخته شده در گروه پلیمر دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد [۲۰]. شکل ۱- الف، طرحی از این دستگاه را نشان می‌دهد. نمونه پلیمری آزمون شده شامل یک پایه مثلثی‌شکل و یک حلقه روی آن است. پایه مثلثی‌شکل عدم حرکت نمونه را در محل نصب آن تضمین می‌کند و حلقه در تماس با سطح ساینده قرار گرفته و روی آن می‌چرخد. شکل ۱- ب، ابعاد نمونه مربوط را نشان می‌دهد. در آزمون اشاره شده نمونه‌ها زیر بار عمودی ۷۰ kg، مسافت ۱ km و سرعت لغزش  $400 \text{ rpm}$  ( $PV = 3/5346 \text{ MPa.m/s}$ ) روی صفحه‌ای نازک صیقلی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ با زبری سطح برابر  $0/11 \mu\text{m}$  به‌عنوان سطح ساینده قرار گرفتند. تمام نمونه‌ها و سطح ساینده پیش از هر آزمون با اتانول تمیز شده و به مدت ۱۰ min در خلأ قرار گرفتند.

از سوی دیگر، از مسائل بسیار مهم در رفتار تریبولوژیکی پلاستیک‌ها تغییرات ضریب اصطکاک و سازوکارهای حاکم با دمای سطح تماس است. بدین منظور، سامانه اندازه‌گیری دما (ترموکوپل) در تماس با سطح زیری صفحه فلزی ساینده قرار داده شد و با ارتباط رایانه‌ای، داده‌های آن به‌طور هم‌زمان با سایر متغیرها ثبت شد. گفتنی است، ترموکوپل دمای واقعی سطح را نشان نمی‌دهد، اما معیاری برای مشاهده تغییرات دمایی طی لغزش نمونه‌هاست. بنابراین، دمای

واقعی سطح از آنچه به وسیله ترموکوپل ثبت می شود، بیشتر است [۲۰]. همان طور که در شکل ۱-ج نشان داده شده است، صفحه نازک فولادی روی پایه فلزی استوانه‌ای شکل قرار می گیرد که در آن امکان ورود و خروج آب سرد ( $20^{\circ}\text{C}$ - $18^{\circ}\text{C}$ ) به عنوان سامانه خنک کننده تعبیه شده است.

استفاده از این سامانه خنک کننده، از افزایش زیاد دما حین آزمون و ذوب یا تخریب زودرس نمونه جلوگیری می کند و امکان بررسی سازوکارهای اصطکاک و فرسایش را در مدت زمان کافی در ناحیه گذرا مهیا می کند. نمونه‌ها شامل نمونه خالص و کامپوزیت‌ها، به طور تصادفی انتخاب و سه مرتبه آزمون شدند. در نهایت، میانگین ضریب اصطکاک هر نمونه محاسبه شد. برای اندازه‌گیری سرعت فرسایش نمونه‌ها، وزن آنها پیش و پس از انجام آزمون تریبولوژیکی با ترازو با دقت چهار رقم اعشار، اندازه‌گیری و متوسط سرعت فرسایش محاسبه شد.

## نتایج و بحث

### شکل‌شناسی کامپوزیت‌ها

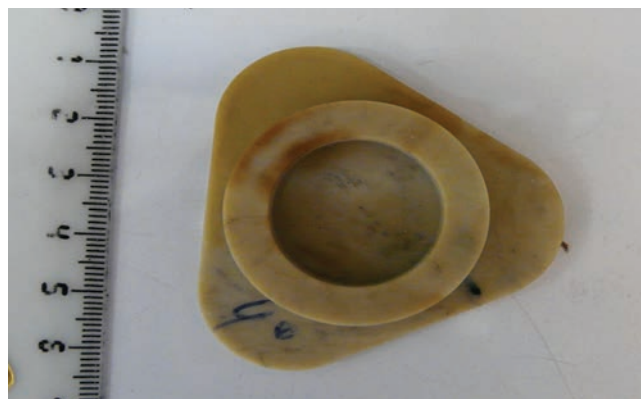
طبق شکل ۲ توزیع پودر PTFE پرتودهی شده در کامپوزیت مناسب بوده و نشان‌دهنده روش اختلاط مناسب برای ساخت کامپوزیت است. شکل ۲-ب، با بزرگ‌نمایی بیشتر نشان می‌دهد، فصل مشترک بین ذرات PTFE و ماتریس پلی آمید ۶ زیاد قوی نیست و ذرات هنگام شکست نمونه از سطح شکست بیرون کشیده می‌شوند. این پدیده اگر چه بر خواص مکانیکی اثر منفی دارد، اما می‌تواند در جدایش ذرات از سطح تماس و ایجاد فیلم انتقالی و اثر روان‌کنندگی آن نقش مؤثری داشته باشد.

### خواص مکانیکی نمونه‌ها با آزمون کشش تک‌محوری

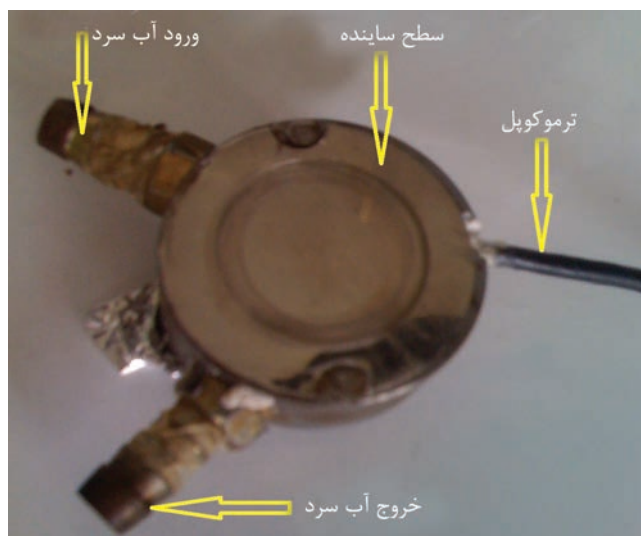
شکل‌های ۳ و ۴ نتایج تنش تسلیم و مدول کشسانی برحسب مقدار تفلون در کامپوزیت‌های حاوی پودر PTFE پرتودهی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، با افزایش پودر PTFE تنش تسلیم و مدول کامپوزیت کاهش می‌یابد. کاهش این خواص مکانیکی به دلیل کم بودن تنش تسلیم و مدول PTFE است. از آنجا که استفاده بیش از حد فاز روان‌کننده سبب کاهش زیاد تنش تسلیم و مدول می‌شود، در نتیجه افزایش سرعت فرسایش را در پی دارد. بنابراین، استفاده از این نوع پرکننده به مقدار بیشتر از درصد معینی برای عملکرد تریبولوژیکی مناسب نیست. بر همین اساس، مقدار ۵٪ وزنی پودر PTFE به عنوان درصد مناسب انتخاب شد.



(الف)

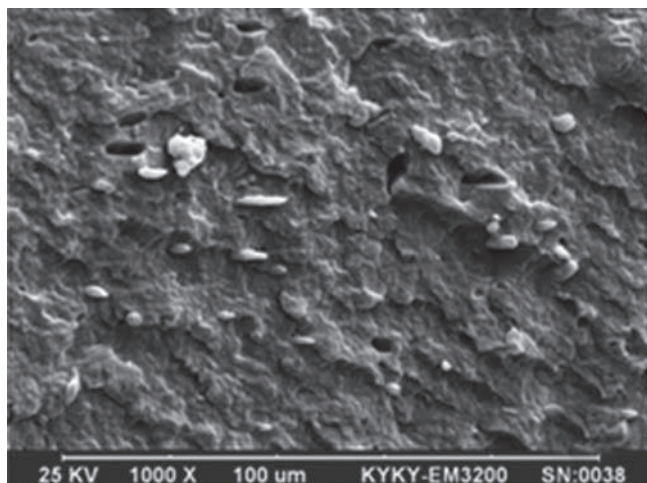


(ب)

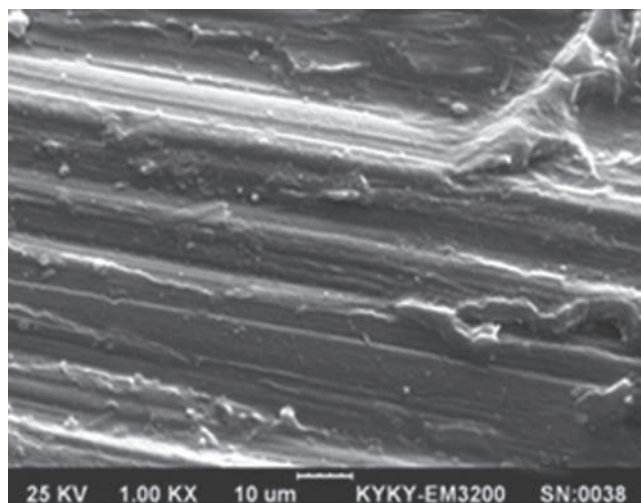


(ج)

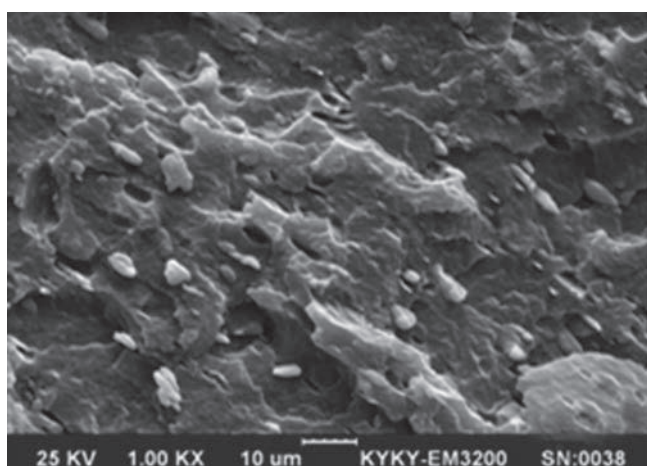
شکل ۱- (الف) دستگاه ضریب اصطکاک و فرسایش پلیمرها، (ب) نمونه پلیمری و (ج) سامانه خنک‌کننده و اندازه‌گیری دما.



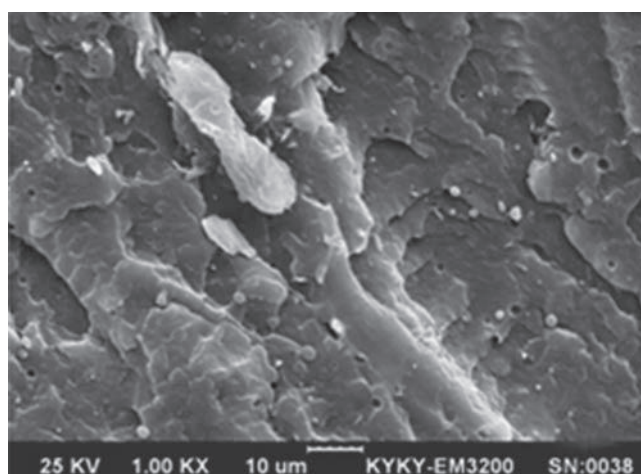
(ب)



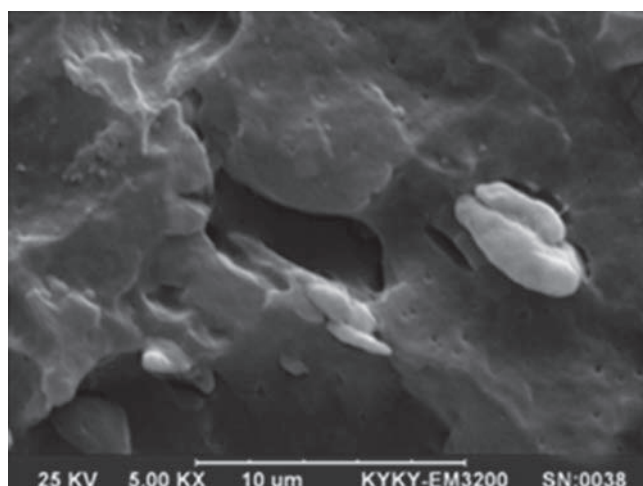
(الف)



(د)

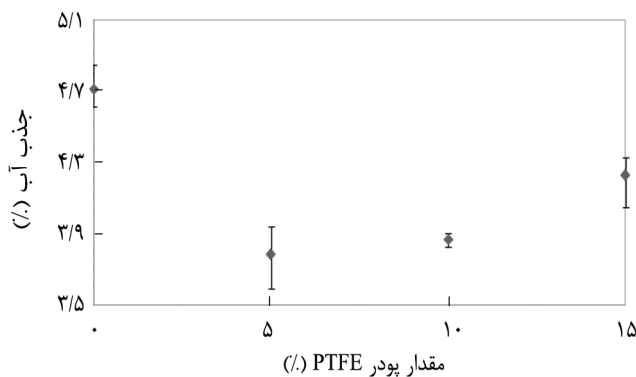


(ج)



(ه)

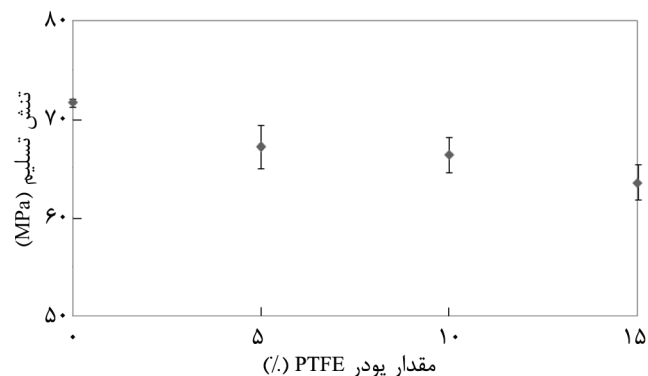
شکل ۲- تصاویر SEM از سطوح شکست: (الف) پلی آمید ۶ خالص و کامپوزیت های پلی آمید ۶- پودر PTFE پرتودهی شده با درصد وزنی PTFE (ب) ۵٪، (ج) ۱۰٪ و (د) ۱۵٪ همگی با بزرگنمایی ۱۰۰۰ و (ه) ۵٪ با بزرگنمایی ۵۰۰۰.



شکل ۵- اثر مقدار پودر PTFE پرتودهی شده بر جذب آب کامپوزیت‌ها.

شده باعث کاهش ضریب اصطکاک، سرعت فرسایش و دمای سطح ساییده می‌شود. با افزایش مقدار پودر PTFE پرتودهی شده به ۱۰ و ۱۵٪ وزنی، این سه خاصیت کمی افزایش یافته یا بدون تغییر باقی می‌ماند. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، ضریب اصطکاک کامپوزیت دارای پودر PTFE پرتودهی شده نسبت به پلیمر خالص تفاوت معناداری یافته است. زیرا، PTFE به تنهایی ضریب اصطکاک کمی دارد و طی آزمون بلندمدت ذراتی از آن به سطح پلیمر نفوذ کرده و فیلم انتقالی را تقویت می‌کند. افزایش پودر PTFE به بیش از ۵٪ وزنی باعث کاهش زیاد تنش تسلیم و مدول نمونه شده و به دلیل افزایش سطح تماس واقعی نمونه با سطح مقابل و تغییر شکل زیاد آن زیر بار ثابت ضریب اصطکاک، سرعت فرسایش و دمای سطح ممکن است، قدری افزایش نیز نشان دهد. در این حالت نشان داده شد، اضافه کردن روان‌کننده‌های جامد به مقدار بیش از یک درصد بهینه باعث کاهش خواص مکانیکی توده پلیمر و در نتیجه کاهش خواص تریبولوژیکی می‌شود [۲۱-۲۳]. این سازوکار به نوعی بهینه بودن ۵٪ وزنی پودر PTFE پرتودهی شده در پلی آمید ۶ را برای کاربردهای تریبولوژیکی نشان می‌دهد.

افزون بر مقایسه کمی رفتار مکانیکی و تریبولوژیکی کامپوزیت‌ها، دستگاه تریبومتر استفاده شده امکان بررسی سازوکار اصطکاک و فرسایشی نمونه را در مرحله گذار فراهم می‌کند. سازوکار مرحله گذار و تشکیل یا تثبیت فیلم انتقالی در این مرحله، نقش معین‌کننده‌ای در رفتار تریبولوژیکی نمونه در مرحله پایا، مقادیر متوسط ضریب اصطکاک و مقادیر فرسایشی طی زمان آزمون دارد. در این راستا، شکل ۶ سازوکار رفتار اصطکاک پلی آمید ۶ خالص را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، در رفتار اصطکاک پلی آمید ۶ خالص سه ناحیه ناپایدار مشاهده می‌شود. هر ناحیه ناپایدار به دلیل تشکیل فیلم انتقالی و شکست آن پیش از رسیدن به حالت پایدار است. این رفتار ناپایدار آنقدر ادامه می‌یابد تا ضریب اصطکاک به حدی برسد که



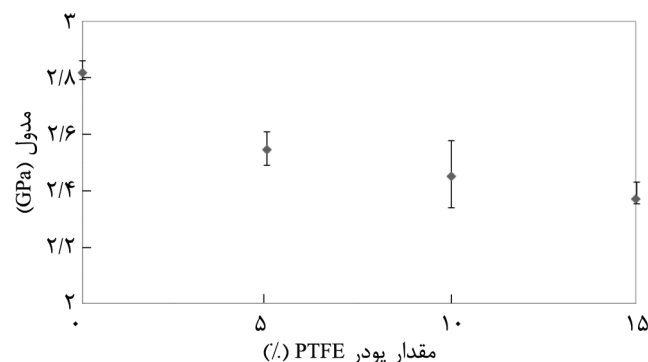
شکل ۳- اثر مقدار پودر PTFE پرتودهی شده بر تنش تسلیم کامپوزیت‌ها.

### جذب آب نمونه‌ها

شکل ۵ مقدار جذب آب را در کامپوزیت‌های دارای PTFE پرتودهی شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، با افزودن پرکننده PTFE، جذب آب کاهش و با ازدیاد مقدار آن جذب آب افزایش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود، پرکننده به‌عنوان سدی در برابر نفوذ حلال عمل می‌کند. با ازدیاد مقدار پرکننده PTFE پرتودهی شده، به دلیل افزایش گروه‌های قطبی موجود بر سطح این پودر، جذب آب قدری افزایش یافته است، اما به مقدار اندازه‌گیری شده برای پلی آمید ۶ خالص نمی‌رسد.

### ضریب اصطکاک، دمای سطح ساییده و فرسایش در آزمون‌های تریبولوژیکی بلندمدت

ارزیابی رفتار تریبولوژیکی نمونه‌ها با دستگاه تریبومتر برای بررسی اثر پودر PTFE پرتودهی شده بر خواص تریبولوژیکی پلی آمید ۶ و سازوکار این پرکننده روی رفتار اصطکاک و فرسایشی پلی آمید ۶ انجام شد. جدول ۱ اثر پودر PTFE را بر متوسط ضریب اصطکاک، سرعت فرسایش و دمای سطح ساییده پلی آمید ۶ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این جدول مشخص است، افزودن ۵٪ وزنی پودر PTFE پرتودهی



شکل ۴- اثر مقدار پودر PTFE پرتودهی شده بر مدول کامپوزیت‌ها.

جدول ۱- اثر پودر PTFE پرتودهی شده بر ضریب اصطکاک آزمون بلندمدت، سرعت فرسایش و دمای سطح ساییده (اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار از متوسط اعداد اندازه‌گیری شده هستند).

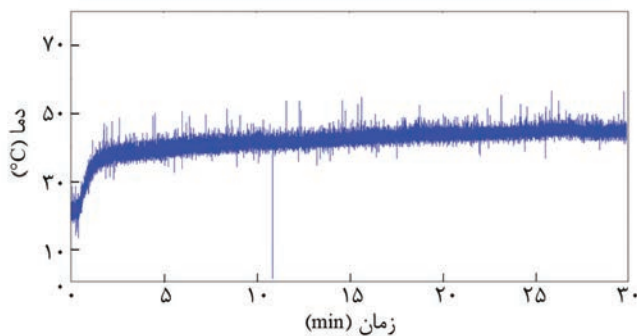
نمونه	ضریب اصطکاک	سرعت فرسایش $10^5 \times (\text{mm}^3/\text{N.m})$	دمای سطح ساییده ( $^{\circ}\text{C}$ )
P	۰/۴۹۵ (۰/۰۱۲)	۱/۳۵ (۰/۱۴۷)	۵۲/۵ (۱/۱۳)
PT5	۰/۲۱۶ (۰/۰۱۸)	۱/۰۲ (۰/۰۵۰)	۴۰ (۰/۶۸)
PT10	۰/۲۷۶ (۰/۰۰۶)	۱/۱۶ (۰/۱۵۳)	۴۱/۵ (۱/۱۱)
PT15	۰/۳۱۰ (۰/۰۰۴)	۱/۲۴ (۰/۰۷۳)	۴۴ (۰/۹۸)

در مقدار بهینه، نقش پودر PTFE در ایجاد فیلم انتقالی نسبتاً پایدار و کاهش ضریب اصطکاک، دمای سطح تماس و سرعت فرسایش بیش از نقش مخرب آن در کاهش تنش تسلیم و مدول ماتریس پلیمری است. البته افزایش تدریجی ضریب اصطکاک و دمای نمونه طی آزمون مشاهده می‌شود، اما افزایش کند این دو عامل باعث می‌شود تا مقادیر متوسط ضریب اصطکاک و دمای سطح تماس طی آزمون به ترتیب به  $0/23^{\circ}\text{C}$  و  $40^{\circ}\text{C}$  کاهش یابد. این کاهش ضریب اصطکاک و دما، بهبود رفتار فرسایشی نمونه را به دنبال دارد.

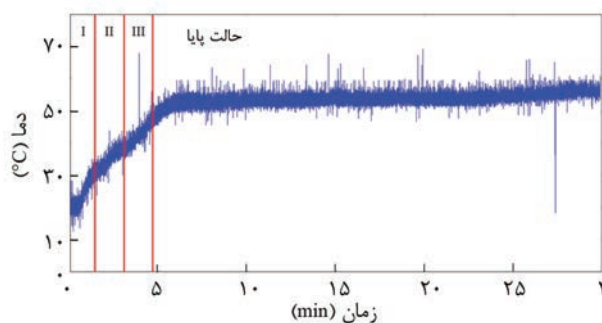
در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح ساییده پلی‌آمید ۶

افزایش دمای سطح تماس باعث ایجاد فیلم انتقالی پایداری تا انتهای آزمون شود. در این حالت، ضریب اصطکاک ناحیه پایدار حدود  $0/5$  و دمای تماس حدود  $52^{\circ}\text{C}$  است.

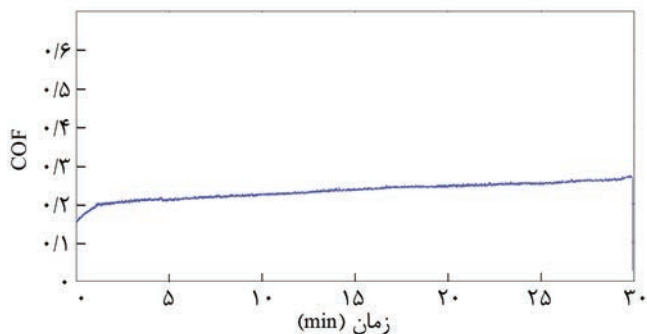
شکل ۷ نمودار ضریب اصطکاک و دمای سطح ساییده نمونه دارای  $5\%$  وزنی پودر PTFE پرتودهی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشخص است، نمونه پس از فقط یک ناحیه ناپایدار (مسافت کوتاهی) به‌طور مستقیم به حالت پایدار رسیده است. کاهش تعداد نواحی ناپایدار به تثبیت سریع فیلم انتقالی، که به وسیله پودر PTFE تأمین و تقویت می‌شود، مرتبط است.



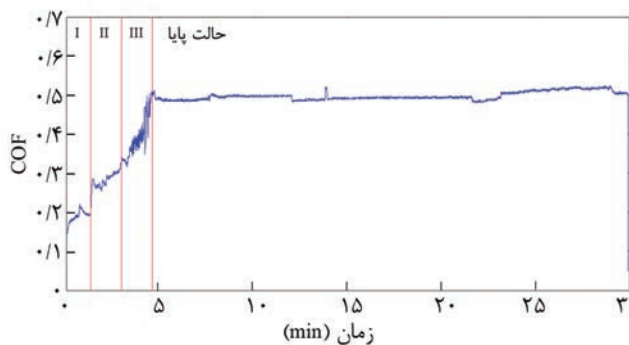
(الف)



(الف)



(ب)

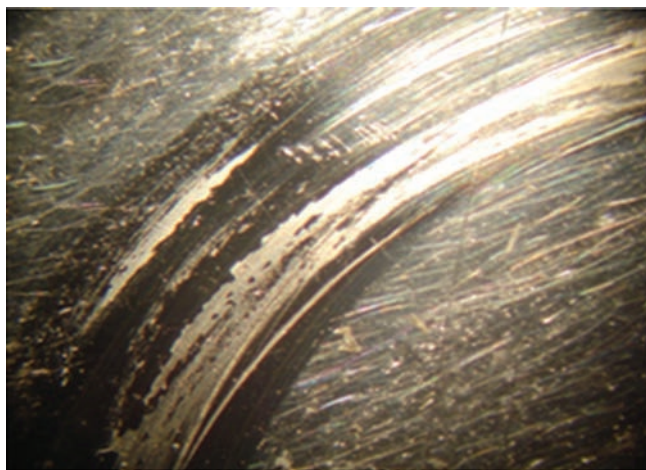


(ب)

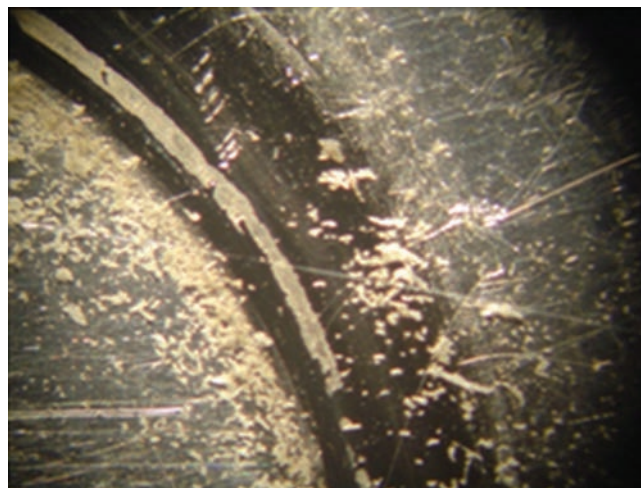
شکل ۷- رفتار اصطکاکی نمونه دارای  $5\%$  وزنی پودر PTFE پرتودهی شده: (الف) دمای سطح ساییده طی لغزش و (ب) تغییرات ضریب اصطکاک.

شکل ۶- رفتار اصطکاکی پلی‌آمید ۶: (الف) دمای سطح ساییده طی لغزش و (ب) تغییرات ضریب اصطکاک (COF).





(ب)



(الف)

شکل ۸- تصاویر TEM از سطح ساییده: (الف) نمونه پلی آمید ۶ خالص و (ب) کامپوزیت پلی آمید ۶ دارای ۵٪ وزنی پودر PTFE پرتودهی شده.

شده در این پژوهش کاهش داد. البته افزایش ۵٪ وزنی از این پودر موجب کاهش جذب آب پلی آمید ۶ شد که این موضوع می تواند در جلوگیری از کاهش خواص مکانیکی آن مؤثر باشد. آزمون های تریبولوژیکی بلندمدت نشان دادند، افزایش پودر PTFE باعث کاهش خواص مکانیکی می شود و در یک درصد بهینه از این پودر، ضریب اصطکاک، دمای سطح تماس و سرعت فرسایش نمونه نسبت به نمونه خالص کاهش می یابد. درصد بهینه حدود ۵٪ وزنی معین شد. در این حالت، بهبود خواص تریبولوژیکی به نقش کمکی پودر PTFE در تأمین، تشکیل و تثبیت فیلم انتقالی در مقایسه با نمونه خالص نسبت داده شد. تشکیل و تثبیت فیلم انتقالی در نمونه دارای درصد بهینه پودر PTFE پرتودهی شده از ناحیه گذار منحنی های ضریب اصطکاک و دما تشخیص داده شد.

خالص و کامپوزیت دارای ۵٪ وزنی پودر PTFE پرتودهی شده نشان داده شده است. شکل ۸- الف مقدار فیلم انتقالی تشکیل شده پلی آمید ۶ خالص و شکل ۸- ب مقدار فیلم انتقالی تشکیل شده کامپوزیت دارای ۵٪ وزنی پودر PTFE پرتودهی شده را نشان می دهند. همان طور که در شکل ۸- ب مشخص است، مقدار فیلم تشکیل شده به وسیله کامپوزیت دارای پودر PTFE بیشتر از نمونه پلی آمید ۶ خالص است.

## نتیجه گیری

افزودن پودر PTFE پرتودهی شده، خواص مکانیکی پلی آمید ۶ یعنی مدول کشسانی و تنش تسلیم را در تمام مقادیر به کار گرفته

## مراجع

1. Friedrich K., Lu Z., and Hager A.M., Recent Advances in Polymer Composites' Tribology, *Wear*, **190**, 139-144, 1995.
2. Bhushan B. and Gupta B.K., *Handbook of Tribology, Materials, Coatings and Surface Treatments*, McGraw Hill, Tokyo, Chapt. 3, 1991.
3. Glaeser W.A., *Materials for Tribology*, Elsevier, Amsterdam, Chapt. 7, 1992.
4. Rong Z., Wen-bo L., Hua-ming X., and Gu-zhong W., Water-Absorptivity and Mechanical Behaviors of PTFE/PA6 and PTFE/PA66 Blends, *Trans. Nonferr. Metal Soc. China*, **16**, 498-503, 2006.
5. Bahadur S., The Development of Transfer Layers and their Role in Polymer Tribology, *Wear*, **245**, 92-99, 2000.
6. Rhee S.H. and Ludema K.C., Mechanisms of Formation of Polymeric Transfer Films, *Wear*, **46**, 231-240, 1978.
7. Samyn P., Schoukens G., Van Driessche I., Van Craenenbroeck J., and Verpoort F., Softening and Melting Mechanisms of Polyamides Interfering with Sliding Stability under Adhesive Conditions, *Polymer*, **47**, 5050-5065, 2006.
8. Stachowiak G.W. and Batchelor A.W., *Engineering Tribology*,

- Butterworth-Heinemann, Western Australia, Chapt. 16, 2000.
9. Bahadur S. and Schwartz C.J. *Tribology of Polymeric Nanocomposites*, Friedrich K., and Schlarb A.K. (Eds.), Elsevier, Amsterdam, Chapt. 2, 2-7, 2008.
  10. Lansdown A.R., *Lubrication and Lubricant Selection*, Professional Engineering, London, Chapt. 8, 2004.
  11. Su F.H., Zhang Z.Z. and Liu W., Friction and Wear Behavior of Hybrid Glass/PTFE Fabric Compositereinforced with Surface Modified Nanometer ZnO, *Wear*, **265**, 311-318, 2008.
  12. Dadbin S., Kashcooli Y., and Frounchi M., Mechanical and Surface Properties of E-Beam Irradiated Polytetrafluoroethylene-Silicon Rubber Composites, *Polym. Polym. Compos.*, **18**, 329-336, 2009.
  13. Sohail Khan M., Franke R., Gohs U., Lehmann D., and Heinrich G., Friction and Wear Behaviour of Electron Beam Modified PTFE Filled EPDM Compounds, *Wear*, **266**, 175-183, 2009.
  14. Shiao S.J. and Wang T.Z., Dry Self-Lubricating Composites, *Composites: Part B.*, **27**, 459-65, 1996.
  15. Zhang Z., Breidt C., Chang L., Hauptert F., and Friedrich K., Enhancement of the Wear Resistance of Epoxy: Short Carbon Fiber, Graphite, PTFE and Nano-TiO<sub>2</sub>, *Composites: Part A.*, **35**, 1385-92, 2004.
  16. Li J., The Effect of PTFE on the Mechanical and Friction and Wear Properties of GF/PA6 Composites, *Adv. Mater. Res.*, **284-286**, 2370-2373, 2011.
  17. Li D., You Y., Deng X., Li W., and Xie Y., Tribological Properties of Solid Lubricants Filled Glass Fiber Reinforced Polyamide 6 Composites, *Mater. Design*, **46**, 809-815, 2012.
  18. Bijwea J., Naidub V., Bhatnagar N., and Fahima M., Optimum Concentration of Reinforcement and Solid Lubricant in Polyamide 12 Composites for Best Tribo-Performance in Two Wear Modes, *Tribology Lett.*, **21**, 59-66, 2006.
  19. Fakhari A., Razzaghi-Kashani M., and Mehranpour M., Improvements in Tribological Properties of Polyoxymethylene by Aramid Short Fiber and Polytetrafluoroethylene, *Iran. Polym. J.*, **22**, 53-59, 2013.
  20. Razzaghi-Kashani M., Behazin E., and Fakhari A., Construction and Evaluation of a New Tribometer for Polymers, *Polym. Test.*, **30**, 271-276, 2011.
  21. Stachowiak G.W., *Wear-Materials Mechanics and Practice*, John Wiley and Sons, Ontario, 2005.
  22. Briscoe B.J. and Sinha S.K., *Wear-Materials, Mechanism and Practice*, Stachowiak G. (Ed.), John Wiley and Sons, London, 223-267, 2005.
  23. Chauhan S.R. and Thakur S., Effects of Particle Size, Particle Loading and Sliding Distance on the Friction and Wear Properties of Cenosphere Particulate Filled Dvinylester Composites, *Mater. Design*, **51**, 398-408, 2013.