



## بررسی تاثیر افزودن ذرات زیرکونیا بر مقاومت به سایش و سختی پلی تترا فلورو اتیلن

محمد ملازاده<sup>1</sup>، رضا ارغوانیان<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، گروه مهندسی ساخت و تولید، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

2- استادیار، مهندسی مواد، گروه مهندسی ساخت و تولید، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 51579-44533، arghavianian@iaut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

دریافت: 98/02/12

پذیرش: 98/12/14

### کلیدواژگان:

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری

پلی تترا فلورو اتیلن زیرکونیا

مقاومت به سایش

### چکیده

پلی تترا فلورو اتیلن (تفلون) به دلیل خواص منحصر به فرد کاربرد بسیار زیادی بعنوان زمینه در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری دارد. در این تحقیق به تاثیر افزودن ذرات زیرکونیا بر نرخ سایش و ضریب اصطکاک تفلون خالص پرداخته شده است. برای این منظور نمونه‌های کامپوزیتی با افزودن 5 الی 30 wt.% زیرکونیا به زمینه تفلون دارای 10 wt.% گرافیت ساخته شد. ساخت نمونه‌ها به روش پرس سرد و پخت با استفاده از استاندارد ASTM D4894 و 4745 صورت پذیرفت. برای بررسی مقاومت به سایش نمونه‌ها آزمایش پین روی دیسک چرخان مطابق استاندارد ASTM G99 انجام شد. در نهایت سختی نمونه‌ها با استفاده از استاندارد ASTM D2240 (Shore D) بدست آمد. برای بررسی توزیع ذرات فاز ثانوی و همچنین بررسی محل سائیده شده پس از تست سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. کمترین نرخ سایش و ضریب اصطکاک به همراه بیشترین سختی در نمونه دارای 20wt.% زیرکونیا حاصل گردید. این نمونه تقریباً 3 برابر نرخ سایش کمتر و 12% سختی بیشتر نسبت به تفلون خالص نشان داد. این بهبود خواص در نتیجه ارتقاء توان حمل بار در نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل وجود ذرات زیرکونیا در زمینه پلیمری حاصل شده است.

## Study of the zirconia particles incorporation effects on the wear resistance and hardness of polytetrafluoroethylene

Mohammad Mollazadeh, Reza Arghavianian\*

Department of Manufacturing Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

\* P.O.B. 51579-44533, Tabriz, Iran, arghavianian@iaut.ac.ir

### Keywords

Polymer-matrix composites

Polytetrafluoroethylene

Zirconia

Wear resistance

### Abstract

Polytetrafluoroethylene (Teflon) is one of the most widely used materials as the matrix in polymer-matrix composites due to its unique properties. In this study, the effect of zirconia particles addition on the wear rate and friction coefficient of pure Teflon has been investigated. For this, composite samples were manufactured by adding of 5 to 30wt.% zirconia into the PTFE matrix containing 10wt% graphite. Production of the samples were done by cold press and sintering method according ASTM D4894 and 4745 standards. To evaluate the wear resistance of the samples, pin on disk test was performed according to ASTM G99 standard. Finally, the hardness of the samples was measured using ASTM D2240 (Shore D) standard. The scanning electron microscope was applied to investigate the distribution of second phase particles and worn surfaces of the samples. The lowest wear rate and friction coefficient and the highest hardness were obtained for the sample containing 20wt.% zirconia. This sample had approximately 3 times lower wear rate and 12% higher hardness with respect to pure PTFE. This improvement is due to the higher load carrying capability of composite samples as a result of zirconia particles incorporation in the polymer matrix.

### 1-مقدمه

سخت ارتقاء داده می‌شود. افزودن دو یا چند ماده پرکننده دارای قابلیت مشخص در زمینه تفلون می‌تواند یک کامپوزیت با خواص سطحی مناسبتر ایجاد کند [1،2].

پلی تترا فلورو اتیلن<sup>1</sup> (PTFE) به دلیل خواص منحصر به فرد و ضریب اصطکاک پائین استفاده گسترده‌ای در سیستم‌های آبیندی و به عنوان روانکار خشک صنعتی، افزودنی به گریسهای آبیندی، کاهنده ضریب اصطکاک در صفحات خورشیدی و واشرهای مخصوص آبیندی دارد. عمده‌ترین ایراد تفلون خالص نرخ سایش بالا و جریان سرد (خزش) آن می‌باشد، که با افزودن فاز دوم

1-1- تحقیقات پیشین در زمینه افزودن ذرات فاز ثانوی به زمینه PTFE تاکنون تحقیقات مهمی در زمینه تاثیر انواع افزودنی‌های معدنی، آلی، ترکیبی از هر دو و پارامترهای ساخت بر روی خواص مکانیکی و رفتار سطحی کامپوزیت

<sup>1</sup> Polytetrafluoroethylene

### Please cite this article using:

Mollazadeh, M. Arghavianian, R., "Study of the zirconia particles incorporation effects on the wear resistance and hardness of polytetrafluoroethylene", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No. 4, pp. 649-656, 2020.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

زیرکونیا تا دمای تقریبی 950 °C می باشد) و اندازه ذرات زیر 60µm خریداری شده از شرکت توسعه تفلون، و گرافیت (Gr) با اندازه ذرات زیر 300µm استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-VEGA\\TECAN-LMU<sup>TM</sup>) از این ذرات در شکل 1 ارائه شده است. برای ساخت نمونه‌ها، مقادیر مورد نیاز از پودرهای مصرفی جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی به شکل دیسک با قطر 30mm و ضخامت 10mm و بر اساس درصدهای وزنی آورده شده در جدول 1، توسط ترازوی دیجیتالی با دقت 0.0001g اندازه‌گیری و آماده شد. پس از عبور ذرات تفلون از الک با مش 70، جهت همگن سازی کامل، ابتدا پودرها به مدت 3 دقیقه به طور مکانیکی، سپس بمدت 30 دقیقه به صورت لرزشی و متعاقباً 3 دقیقه به طور مکانیکی در ظروف شیشه‌ای تمیز و خشک مخلوط شدند. کد و ترکیب نمونه‌ها در جدول 1 ارائه شده است. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی با دانسیته یکنواخت از قالب با دو سنبه متحرک (پرس دو جهته)، و فرآیند فشرده‌سازی به روش پرس سرد دو مرحله‌ای مطابق استاندارد ASTM D4894 استفاده شد. عملیات فشرده سازی برای نمونه‌های کامپوزیتی حاوی کمتر از 15wt.% ذرات سخت (زیرکونیا) بر اساس استاندارد ASTM D4894 با فشار پرس اولیه 500psi و مدت زمان توقف یک دقیقه در این فشار، و با فشار ثانویه 5000psi و زمان اعمال سه دقیقه انجام شد. برای نمونه‌های کامپوزیتی دارای بیش از 15wt.% زیرکونیا، عملیات فشرده سازی طبق استاندارد ASTM D 4745 با فشار و زمان توقف اولیه نظیر شرایط قبلی و در مرحله دوم با فشار ثانویه 10050psi به مدت سه دقیقه انجام شد. تمامی فرآیند فشرده سازی در دمای محیط و رطوبت محیط انجام گردید. پخت نمونه‌ها در کوره JUMO DTRON مدل 70304 با شرایط مندرج در استاندارد ASTM D4894، با زمان توقف دو ساعت در دمای 290°C و نیم ساعت در دمای نهائی پخت برابر با 380±5°C انجام شد. برای آماده سازی سطحی نمونه‌ها جهت مطالعات میکروسکوپی (SEM) از سنباده زنی و پولیش کاری استفاده شد. سنباده‌زنی با استفاده از سنباده‌های 800، 1000 و 2000 به همراه جریان آب انجام گردید. سپس پولیش کاری با پارچه مخصوص پولیش و اکسید آلومینیم مخلوط با آب در چندین مرحله صورت پذیرفت. پس از سنباده‌زنی و پولیش کاری، ابعاد متوسط نمونه‌ها توسط میکرومتر اندازه‌گیری و حجم نمونه‌ها محاسبه شد. چگالی تجربی با استفاده از جرم و حجم نمونه بدست آمد. چگالی تئوری نمونه‌ها نیز با استفاده از رابطه 1 محاسبه شد.

$$\frac{1}{\rho_{th}} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \frac{x_3}{\rho_3} \quad (1)$$

که در این رابطه  $\rho_{th}$  چگالی تئوری کامپوزیت،  $\rho_1$  و  $x_1$  به ترتیب چگالی و درصد وزنی PTFE،  $\rho_2$  و  $x_2$  به ترتیب چگالی و درصد وزنی گرافیت و  $\rho_3$  و  $x_3$  به ترتیب چگالی و درصد وزنی زیرکونیا می‌باشد. درصد تخلخل نمونه‌ها از رابطه 2 محاسبه شد.

$$v_{pro} = \left( \frac{\rho_{th} - \rho_{ex}}{\rho_{th}} \right) \times 100 \quad (2)$$

که در این رابطه  $v_{pro}$  درصد حجمی تخلخل‌ها،  $\rho_{th}$  چگالی تئوری و  $\rho_{ex}$  چگالی تجربی کامپوزیت می‌باشند.

زمینه تفلون انجام شده است. از جمله می‌توان به بررسی تاثیر افزودنی‌های کربن، فیبرشیشه، گرافیت، مولیبدن دی سولفید (MoS<sub>2</sub>) [5,4,3]، نانو فیبر کربن (CNF) [5]، ویسکر تیتانات پتاسیم [6]، نانو ذرات آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [7]، ZnO [8]، برنز [9] و پلی اتر کتون<sup>1</sup> (PEEK) [10] با درصدهای مختلف وزنی اشاره کرد. همچنین تاثیر مقدار افزودنیها بر میزان کریستالیزاسیون کامپوزیت [11] و تاثیر انواع افزودنیهای اورگانیک و غیر اورگانیک بر نرخ سایش و ضریب اصطکاک [12] نیز بررسی شده است. علاوه بر این، در تحقیقاتی جداگانه تاثیر پارامترهای ساخت از قبیل شرایط پرس و نقش هوای حبس شده در ساختار کامپوزیت [13]، تاثیر افزودنی کربن و گرافیت بر نرخ سایش، با در نظر گرفتن تغییرات دما [14] و تاثیر مقدار کربن و همچنین تغییرات بار و سرعت در تست سایش بر روی حجم کاهش یافته در نتیجه سایش [16,15] مورد مطالعه قرار گرفته است. از سوی دیگر تاثیر دمای پخت بر مقدار کریستالیزاسیون کامپوزیت برپایه PTFE [17] نیز مطالعه شده است. نتایج تحقیقات مذکور نشان می‌دهد، کربن و بویژه گرافیت با خاصیت روانکاری، جذب انرژی و انتقال حرارتی خوب باعث کاهش نرخ سایش و ضریب اصطکاک و افزایش خواص چکش خواری می‌شود، بطوری که نرخ سایش کامپوزیت حاوی 7wt.% گرافیت و 18wt.% کربن به مراتب کمتر از تفلون خالص است. افزودن فیبر شیشه، MoS<sub>2</sub>، nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>، CNF، ویسکر تیتانات پتاسیم و ZnO منجر به افزایش مقاومت به سایش تفلون در شده و افزودن فیبرها شکست زیر سطحی را به نصف کاهش می‌دهند. افزودن برنز قابلیت چکش خواری و مقاومت به سایش تفلون را افزایش می‌دهد. افزودن PEEK به میزان 10wt.% نرخ سایش PTFE را به نصف کاهش می‌دهد. بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر فرآیند ساخت تفلون از قبیل فشار پرس، دمای پخت و نرخ خنک کاری بر ریز ساختار، مقدار کریستالیزاسیون، خواص مکانیکی و رفتار سطحی تفلون نشان داد که بهترین نتیجه در پرس چند مرحله‌ای حاصل می‌شود که این امر در نتیجه کاهش حبس هوا در داخل کامپوزیت می‌باشد. همچنین بررسی تاثیر افزودن کربن، برنز و فیبر شیشه بر روی درجه کریستالیزاسیون تفلون نشان داد که با افزایش درصد فاز ثانوی در زمینه تفلون، درصد کریستالیزاسیون زمینه پلیمری کاهش می‌یابد. همچنین نتایج تحقیقات مذکور نشان داده است که بیشترین درصد کریستالیزاسیون و دانسیته برای PTFE در نتیجه پخت در دمای 380°C حاصل می‌شود.

## 2-1- هدف از تحقیق حاضر

زیرکونیا (ZrO<sub>2</sub>) یکی از سرامیک‌های مهم صنعتی با خواص مکانیکی مناسب و پایداری شیمیایی و الکتروشیمیایی بالا می‌باشد و افزودن ذرات زیرکونیا به زمینه‌های مختلف باعث بهبود خواص کامپوزیت‌های حاصله شده است [18-23]. با این وجود تاکنون تحقیق در مورد اثر افزودن این ذرات به زمینه PTFE انجام نشده و یا تحقیقات بسیار کمی در این موضوع انجام شده است. لذا در این تحقیق به بررسی تاثیر افزودن ذرات زیرکونیا بر رفتار سطحی (مقاومت به سایش، ضریب اصطکاک و سختی) کامپوزیت زمینه PTFE دارای 10wt.% گرافیت (Gr) پرداخته شده است.

## 2- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ذرات PTFE نوع گلوله‌ای با اندازه ذرات زیر 180µm (TP5NC)، ذرات زیرکونیا با ساختار کریستالی مونوکلینیک (که ساختار پایدار

<sup>1</sup> Polyetheretherketone

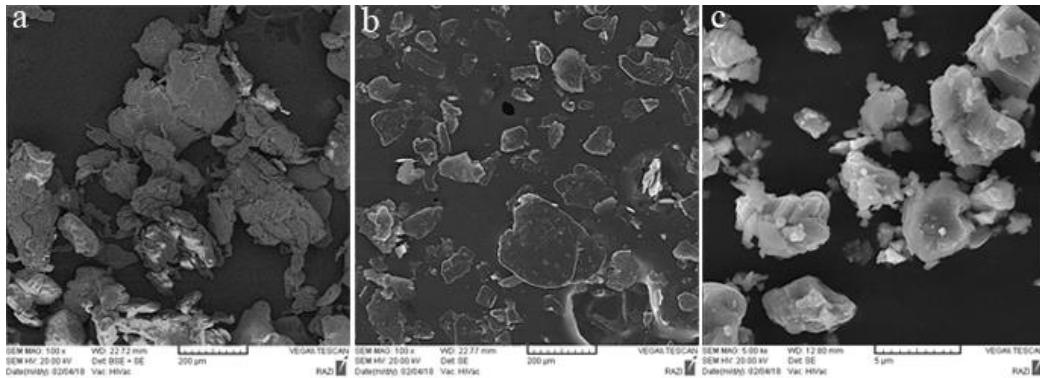


Fig. 1 SEM micrographs of applied powders for composite samples manufacturing: a) PTFE, b) Graphite and c) ZrO<sub>2</sub>

شکل 1 تصاویر SEM از پودرهای مصرفی برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی: (a) PTFE، (b) گرافیت و (c) ZrO<sub>2</sub>

کاهش می‌دهد. این کاهش دانسیته در جدول 1 برای نمونه‌های دارای بیش از 20wt.% زیرکونیا قابل رویت است.

شکل 3 توزیع عنصر زیرکونیم در تعدادی از نمونه‌های کامپوزیتی را نشان می‌دهد. این توزیع می‌تواند بیانگر توزیع ذرات زیرکونیا در این نمونه‌ها باشد. کلوخه‌ای شدن ذرات زیرکونیا تا حدودی در مرز دانه‌های تفلون در نمونه دارای 20wt.% زیرکونیا رخ داده است (شکل 3b). کلوخه‌ای شدن شدید این ذرات در نمونه دارای 30wt.% زیرکونیا مشهود است (شکل 3c). از تصاویر 2 و 3 می‌توان چنین استنباط نمود که با افزایش مقدار زیرکونیا تا 20wt.% در زمینه PTFE دارای 10wt.% گرافیت، توزیع این ذرات تقریباً یکنواخت و بدون کلوخه‌ای شدن شدید باقی می‌ماند اما افزایش بیشتر زیرکونیا منجر به پدیدار شدن کلوخه‌های شدید می‌شود.

### 3-2- بررسی خواص نمونه‌ها

#### 3-2-1- نرخ سایش

در جدول 1 نتایج آزمایشات دانسیته سنجی، سایش و سختی سنجی بیان شده است. بر اساس نتایج تست سایش بین روی دیسک، نمونه F (دارای 20wt.% زیرکونیا) بیشترین مقاومت به سایش را دارد. افزودن 20wt.% ذرات سخت زیرکونیا منجر به کاهش نرخ سایش به میزان 63% در مقایسه با نمونه A (PTFE خالص) و کاهش 57% در مقایسه با نمونه کامپوزیت B (تفلون حاوی 10wt.% گرافیت بدون زیرکونیا) شده است. بر اساس نتایج تحقیقات گذشته [3،1] حضور ذرات سخت در زمینه تفلون، که دارای توانایی حمل بار بالاتری نسبت به زمینه می‌باشند، موجب جلوگیری از لغزش راحت مولکولهای تفلون و در نتیجه کوچکتر شدن اندازه تکه‌های جدا شده ناشی از سایش می‌شود. همچنین نشست ذرات ریز جدا شده فاز سخت در زبری‌های سطح محل سایش، موجب افزایش طول عمر فیلم نازک سایش روی پین ساینده می‌شود.

در شکل 4 تصاویر SEM از محل سائیده شده نمونه‌های B و F پس از تست سایش ارائه شده است. در نمونه B پدیده جریان سرد و جدا شدن تکه‌ای دانه‌های تفلون از سطح به صورت بشقابی و ترکهای سطحی ناشی از تست سایش بین روی دیسک مشاهده می‌شود. با توجه به تصاویر نمونه F، حضور ذرات سخت زیرکونیا در زمینه تفلون باعث کاهش جدا شدن بشقابی ذرات می‌شود؛ این امر می‌تواند موجب کاهش نرخ سایش و بهبود رفتار سطحی شود.

برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سختی سنجی مدل Swick Roell مطابق استاندارد ASTM D2240 Shore D از 5 قسمت هر نمونه با بار 50N و زمان اعمال 10s در دمای محیط سختی سنجی صورت پذیرفته و میانگین نتایج محاسبه شد.

بررسی رفتار سطحی با دستگاه تست سایش پین روی دیسک چرخان طبق استاندارد G99 ASTM با پین فولادی 100 Cr6 (AISI 52 100)، با سرعت 0.1ms<sup>-1</sup>، مسافت 200m و بار 1050g انجام گردید. نرخ سایش با استفاده از رابطه 3 محاسبه شد.

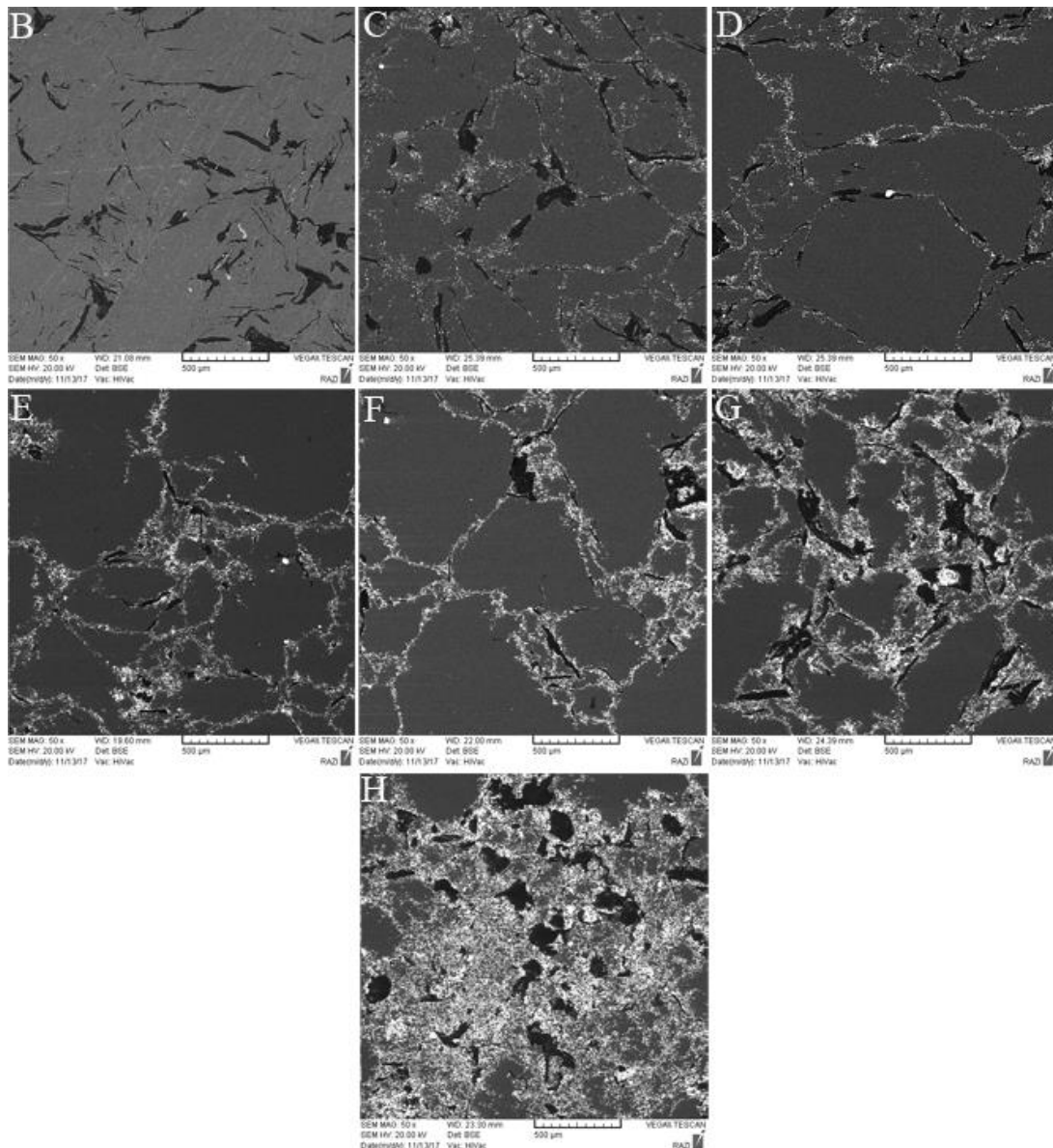
$$\omega = \frac{\Delta M}{(L \cdot \rho \cdot W)} \quad (3)$$

که در این رابطه  $\omega$  نرخ سایش بر حسب  $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ ،  $\Delta M$  جرم مواد کم شده بر حسب g،  $L$  مسافت بر حسب m،  $\rho$  دانسیته بر حسب  $\text{gmm}^{-3}$  و  $W$  مقدار بار اعمالی بر حسب N می‌باشد.

### 3- نتایج و بحث

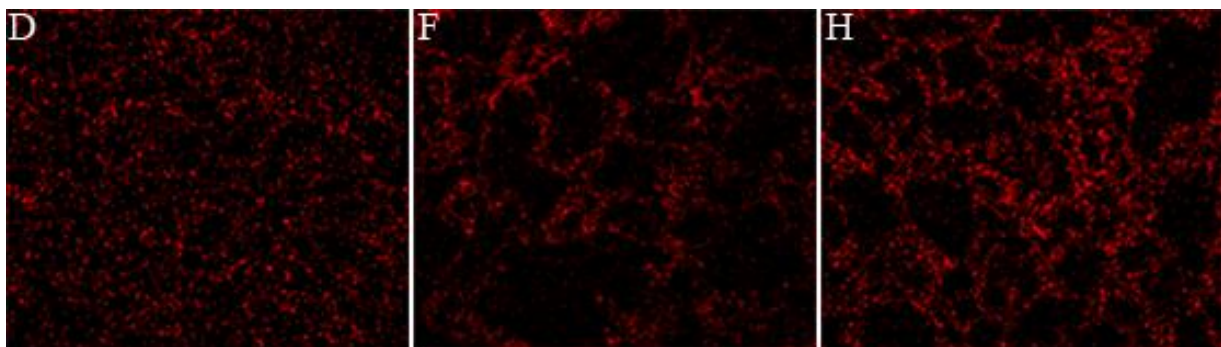
#### 3-1- مطالعه ریز ساختار و توزیع ذرات در نمونه‌ها

شکل 2 تصاویر SEM از نمونه‌های کامپوزیتی دارای مقادیر مختلف زیرکونیا را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که از نمونه b (دارای 5wt.% زیرکونیا) تا نمونه g (دارای 30wt.% زیرکونیا) میزان زیرکونیا در ساختار افزایش یافته است. با افزایش مقدار زیرکونیا در ساختار، تجمع و کلوخه‌ای شدن این ذرات در مرز دانه‌های تفلون رخ داده است. احاطه شدن ذرات زیرکونیا توسط PTFE، به دلیل سازگاری مناسب تفلون با انواع فازهای ثانوی، و عدم کلوخه شدن زیاد این ذرات تا نمونه دارای 20wt.% زیرکونیا نیز قابل مشاهده است. می‌توان گفت که پخت مناسب منجر به احاطه خوب ذرات زیرکونیا توسط فاز زمینه (تفلون) شده و این امر، سطحی همگن و بدون تخلخل را بوجود آورده است. بر اساس نتایج تحقیق کنته و همکارانش [11]، افزایش مواد سخت در زمینه تفلون باعث کاهش اندازه دانه‌های زمینه می‌شود. مصداق این امر در تصاویر SEM قابل مشاهده است (شکل 2). در نمونه‌های دارای بیش از 20wt.% زیرکونیا، تجمع بیش از حد زیرکونیا در بین دانه‌های تفلون باعث کلوخه‌ای شدن زیاد این ذرات می‌شود. این امر منجر به عدم نفوذ فاز زمینه به داخل کلوخه‌ها شده و تخلخل‌های باقیمانده در بین ذرات دانسیته نمونه‌ها را



**Fig. 2** SEM micrographs from PTFE containing 10wt.% graphite without zirconia (B) and with various zirconia contents of: C) 5wt%, D) 10wt., E) 15wt.%, F) 20wt.%, G) 25wt.% and H) 30wt.%

شکل 2 تصاویر SEM از نمونه‌های PTFE دارای 10wt.% گرافیت بدون زیرکونیا (B) و کامپوزیتی حاوی مقادیر مختلف زیرکونیا: (C) 5wt.% (D) 10wt.% (E) 15wt.% (F) 20wt.% (G) 25wt.% (H) و 30wt.%



**Fig. 3** Zirconium elemental distribution patterns in PTFE containing 10wt.% graphite composites with various zirconia contents of: D) 10wt.%, F) 20wt.% and H) 30wt.%

شکل 3 الگوی توزیع عنصری زیرکونیم در کامپوزیتهای PTFE دارای 10wt.% گرافیت حاوی مقادیر مختلف زیرکونیا: (D) 10wt.% (F) 20wt.% (H) و 30wt.%

جدول 1 ترکیب، دانسیته، سختی و پارامترهای حاصل از تست سایش برای نمونه‌های مختلف

Table 1 Composition, density, hardness and wear test parameters for various samples

کد نمونه	ترکیب نمونه	دانسیته تجربی (gcm <sup>-3</sup> )	دانسیته تئوری (gcm <sup>-3</sup> )	درصد تخلخل	سختی (shore D)	ضریب اصطکاک	کاهش وزن (g)	کاهش حجم (mm <sup>3</sup> )	نرخ سایش (×10 <sup>-5</sup> mm <sup>3</sup> N <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )
A	PTFE	2.1611	2.2	1.76	50	0.150	0.00321	1.48200	73.755
B	PTFE-10Gr	2.1475	2.2043	2.57	53	0.015	0.00272	1.26795	63.082
C	PTFE-10Gr/5ZrO <sub>2</sub>	2.1887	2.2757	3.82	53	0.250	0.00223	1.02306	50.067
D	PTFE-10Gr/10ZrO <sub>2</sub>	2.2449	2.3502	4.33	54	0.340	0.00192	0.85527	42.550
E	PTFE-10Gr/15ZrO <sub>2</sub>	2.2995	2.4297	5.36	54	0.180	0.00154	0.74022	36.830
F	PTFE-10Gr/20ZrO <sub>2</sub>	2.3861	2.5148	5.12	56	0.020	0.00142	0.54200	26.968
G	PTFE-10Gr/25ZrO <sub>2</sub>	2.4320	2.6060	6.67	55	0.200	0.00170	0.69850	34.750
H	PTFE-10Gr/30ZrO <sub>2</sub>	2.4489	2.7042	9.44	53	0.250	0.00230	0.93919	46.726

و در نتیجه کلوخه‌ای شدن این ذرات در مرز دانه‌های تفلون شده است (شکل‌های 2 و 3). این امر می‌تواند موجب افزایش فاصله مولکول‌های زنجیری تفلون (تخلخل)، کاهش دانسیته، ضعیف شدن پیوند بین دانه‌ها و در نتیجه کاهش توان حمل بار کامپوزیت و افزایش نرخ سایش شود. در واقع جدا شدن تکه‌ای ذرات و عدم تشکیل فیلم مداوم نازک بین پین و دیسک، که ناشی از کاهش قدرت پیوند بین دانه‌ها است، می‌تواند منجر به افزایش نرخ سایش شود.

لذا می‌توان نتیجه گرفت که حضور ذرات سخت زیرکونیا تا 20wt.% در زمینه PTFE-10Gr، با کاهش پدیده جریان سرد و جدا شدن تکه‌ای موجب کاهش نرخ سایش می‌شود. در واقع افزایش فصل مشترک بین دانه‌های تفلون و زیرکونیا مانع از جایجایی راحت مولکول‌های تفلون (جریان سرد) شده و به دلیل توان حمل بار بالای ذرات زیرکونیا، حضور این ذرات منجر به افزایش توان حمل بار کامپوزیت شده است. افزودن بیش از 20wt.% زیرکونیا به زمینه تفلون (نمونه‌های G و H) موجب تجمع بیش از حد این ذرات در مرز دانه‌ها

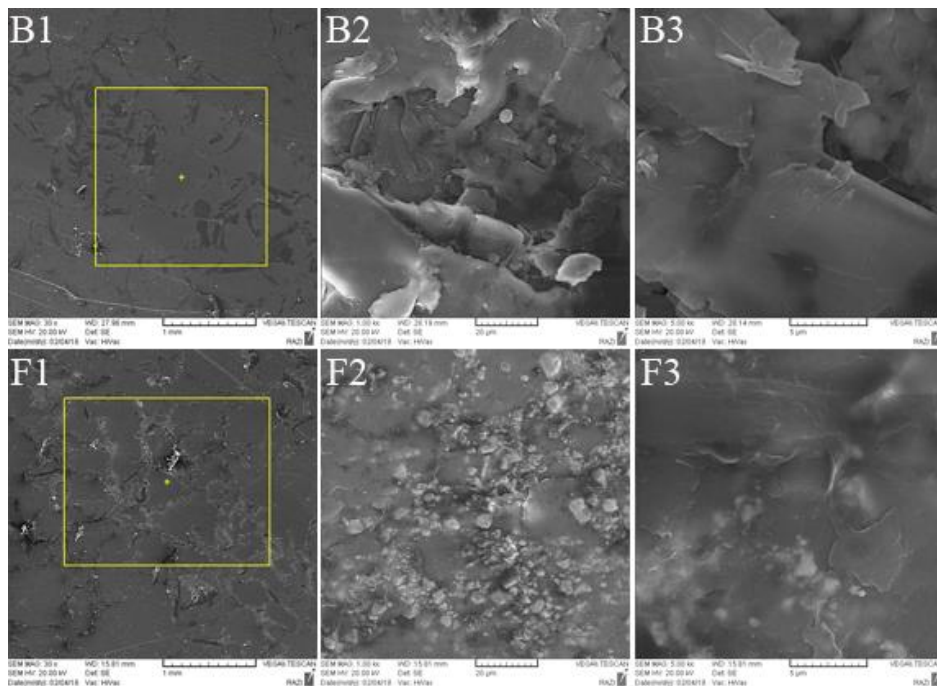


Fig. 3 SEM micrographs from worn surfaces of B (PTFE-10Gr) and F (PTFE-10Gr/20ZrO<sub>2</sub>) samples with various magnifications of: series-1: 30×, series-2: 1000× and series-3: 5000×

شکل 4 تصاویر SEM از سطوح سائیده شده نمونه‌های B (PTFE-10Gr) و F (PTFE-10Gr/20ZrO<sub>2</sub>) در بزرگنماییهای مختلف: سری 1: 30×، سری 2: 1000× و سری 3: 5000×

طور معمول به منظور کاهش نرخ سایش و ضریب اصطکاک در کامپوزیت‌های زمینه تفلون استفاده می‌شوند [2]. افزودن ذرات کربن و گرافیت به زمینه تفلون

همچنین بر اساس نتایج مندرج در جدول 1، حضور 10wt.% گرافیت (نمونه B) موجب افزایش مقاومت به سایش به میزان 14% و کاهش ضریب اصطکاک به میزان 90% نسبت به تفلون خالص شده است. گرافیت و کربن به

تفلون، باعث کاهش نرخ سایش به میزان 63%، افزایش سختی به میزان 12% و کاهش ضریب اصطکاک در حدود 87% نسبت به PTFE خالص می‌شود. کمترین نرخ سایش به همراه بیشترین سختی و کمترین ضریب اصطکاک مربوط به نمونه تفلون دارای 10wt.% گرافیت و 20wt.% زیر کونیا است.

✓ افزودن مقادیر بیشتر از 20wt.% زیر کونیا به PTFE-10Gr منجر به کاهش سختی و افزایش نرخ سایش و ضریب اصطکاک نسبت به نمونه PTFE-10Gr/20ZrO<sub>2</sub> می‌شود که این امر در نتیجه کلوخه‌های شدن بیش از حد ذرات ZrO<sub>2</sub> در مرز دانه‌های تفلون می‌باشد.

#### 5- مراجع

- [1] Suh, J. and Bae, D., "Mechanical Properties of Polytetrafluoroethylene Composite with Graphene Nanoplate by Solid Processing," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 95, No. C, pp. 317-323, 2016.
- [2] Ebnesaajad, S., "Expanded PTFE Applications Handbook: Technology, Manufacturing and Application," First ed., Matthew Deans Acquisition, Cambridge, pp. 9-116, 2016.
- [3] Conte, M. and Igartua, A., "Study of PTFE Composite Tribological Behavior," *Wear*, Vol. 296, No. 1-2, pp. 568-574, 2012.
- [4] Khedkar, J., Negulescu, I. and Meletis, E. I., "Sliding Wear Behavior of PTFE Composite," *Wear*, Vol. 252, No. 5-6, pp. 361-369, 2002.
- [5] Shi, Y., Feng, X., Wang, H., and Lu, X., "The Effect of Surface Modification on the Friction and Wear Behavior of Carbon Nano Fiber Filled PTFE Composite," *Wear*, Vol. 264, No. 11-12, pp. 934-939, 2008.
- [6] Xin, F., Xiaosong, D. Yijun, S., Huaiyuan, W., Shenghua, S. and Xiaohua, L., "A Study on the Friction and Wear Behavior of Polytetrafluoroethylen Filled with Potassium Titanate Whisker," *Wear*, Vol. 261, No. 11-12, pp. 1208-1212, 2006.
- [7] Burris, D. L. and Gregory Sawyer, W., "Improved Wear Resistance in Alumina PTFE Nano Composite with Irregular Shaped Nano Particles," *Wear*, Vol. 260, No. 7-8, pp. 915-918, 2006.
- [8] Su, F. H., Zhang, Z. Z. and Liu, W. M., "Friction and Wear Behavior of Hybrid Glass/PTFE Fabric Composite Reinforced with Surface Modified Nanometer ZnO," *Wear*, Vol. 265, No. 3-4, pp. 311-318, 2008.
- [9] Wang, Y. and Yan, F., "A Study on Tribological Behavior of Transfer Film of PTFE/Bronze Composite," *Wear*, Vol. 262, No. 7-8, pp. 876-882, 2007.
- [10] Burris, D. L. and Sawyer, W. G., "Tribological Behavior of PEEK Components with Compositionally Graded PEEK/PTFE Surfaces," *Wear*, Vol. 262, No. 1-2, pp. 220-224, 2007.
- [11] Conte, M., Pinedo, B. and Igartua, A., "Role of Crystallinity on Wear Behavior of PTFE Composites," *Wear*, Vol. 307, No. 1-2, pp. 81-86, 2013.
- [12] Panda, A. and Dyadyura, K., Valíček, J., Harníčárová, M., Zajac, J., Modrák, V., Pandová, I., Vrábel, P., Nováková-Marcínčinová, E. and Pavelek, Z., "Manufacturing Technology of Composite Materials-Principles of Modification of Polymer Composite Materials Technology Based on Polytetrafluoroethylene," *Materials (Basel)*, Vol. 10, No. 4, pp. 377-396, 2017.
- [13] Gamboni, O. C., Riul, C., Billardon, R., Filho, W. W. B., Schmitt, N. and Canto, R. B., "On the Formation of Defects Induced by Air Trapping During Cold Pressing of PTFE Powder," *Polymer*, Vol. 82, pp. 75-86, 2016.
- [14] Kowandy, C., Richard, C. and Chen, Y. M., "Characterization of Wear Particles for Comprehension of Wear Mechanism: Case of PTFE against Cast Iron," *Wear*, Vol. 265, No. 11-12, pp. 1714-1719, 2008.
- [15] Gujrathi, S. M., Dhamande, L. S. and Patare, p. M., "Wear Studies on Polytetrafluoroethylene (PTFE) Composites: Taguchi Approach," *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, Vol. 3, No. 2, pp. 47-51, 2013.
- [16] Wang, Y. and Yan, F., "Tribological Properties of Transfer Film of PTFE Based Composite," *Wear*, Vol. 261, No. 11-12, pp. 1359-1366, 2006.
- [17] Feng, B., Fang, X., Wang, H. X., Dong, W. and Li, Y. C., "The

باعث افزایش هدایت حرارتی به میزان 10% نسبت به تفلون خالص می‌شود. افزایش هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی، مقاومت به سایش را ارتقاء می‌دهد.

#### 3-2-2- ضریب اصطکاک

تفلون به دلیل ساختار مولکولی خاص کمترین انرژی سطحی و کمترین ضریب اصطکاک را در بین پلیمرهای رایج صنعتی دارد [1]. بر اساس نتایج تست سایش موجود در جدول 1، افزودن زیر کونیا تا 10wt.% منجر به افزایش ضریب اصطکاک نسبت به نمونه PTFE-10Gr شده است. افزایش ضریب اصطکاک می‌تواند به دلیل عدم تشکیل فیلم نازک مداوم بین پین سایش با دیسک (نمونه‌ها) به دلیل مقدار کم ذرات سخت زیر کونیا و عدم پیوند محکم در بین دانه‌های تفلون باشد. در ادامه با افزایش مقدار زیر کونیا در نمونه تا 20wt.%، ضریب اصطکاک کاهش یافته است. این امر می‌تواند به دلیل افزایش فاز سخت زیر کونیا در مرز دانه‌ها، کاهش جدا شدن تکه‌های و در نتیجه تشکیل فیلم لایه‌ای نازک مداوم باشد. این کاهش ضریب اصطکاک در نتیجه افزودن فازهای ثانوی با نتایج تحقیقات قبلی همخوانی دارد [9,8,6]. می‌توان مشاهده نمود که نمونه F (دارای 20wt.% زیر کونیا) کمترین ضریب اصطکاک در بین نمونه‌های کامپوزیتی دارای زیر کونیا را به خود اختصاص داده است و ضریب اصطکاک آن اندکی بیشتر از نمونه PTFE-10Gr می‌باشد. همانطوریکه نتایج قبلی نشان می‌دهد، افزودن بیشتر ZrO<sub>2</sub> به تفلون منجر به کلوخه‌های شدن این ذرات در بین مرز دانه‌ها شده و در نتیجه موجب افزایش تخلخل و کاهش دانسیته می‌شود. افزایش کلوخه‌های شدن باعث جدا شدن راحت ذرات زیر کونیا و تجمع این ذرات جدا شده پشت پین ساینده شده، و احتمالاً این امر موجب افزایش ضریب اصطکاک در نمونه‌های G و H شده است.

#### 3-2-3- سختی

بر اساس نتایج سختی سنجی مندرج در جدول 1، افزودن گرافیت به تفلون منجر به افزایش سختی شده است به طوریکه سختی نمونه B (دارای 10wt.% گرافیت) نسبت به نمونه A (تفلون خالص) به میزان 6% افزایش یافته است. همچنین افزودن زیر کونیا تا 20wt.% سختی را باز هم افزایش داده و سختی نمونه F به میزان 12% بیشتر از نمونه A است. افزودن ذرات سخت بعنوان عوامل تقویت کننده، به دلیل افزایش توان حمل بار، می‌تواند سختی را افزایش دهد. این افزایش سختی باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود [2,1]. همچنین ممانعت ذرات سخت ZrO<sub>2</sub> از تغییر فرم دانه‌های PTFE نیز عامل دیگری برای افزایش سختی است.

#### 4- نتیجه‌گیری

- ✓ کامپوزیت PTFE-Gr را می‌توان به شیوه پرس سرد و پخت تولید کرد. افزودن 10wt.% گرافیت به تفلون موجب کاهش ضریب اصطکاک به میزان 90%، کاهش نرخ سایش تا حدود 14% و افزایش سختی در حد 6% نسبت به PTFE خالص می‌شود.
- ✓ کامپوزیت PTFE-10Gr/ZrO<sub>2</sub> را نیز می‌توان به شیوه پرس سرد و پخت تولید کرد. بیشینه مقدار ممکن برای زیر کونیا در این کامپوزیت، که توزیع تقریباً یکنواخت و قابل قبولی در ساختار داشته باشد، برابر با 20wt.% است. در مقادیر بیشتر، کلوخه‌های شدن شدید ذرات زیر کونیا در مرز دانه‌های تفلون به وقوع می‌پیوندد.
- ✓ حضور ذرات سخت زیر کونیا به همراه گرافیت در زمینه تفلون، به دلیل ارتقاء توان حمل بار زمینه و جلوگیری از لغزش راحت مولکولهای

- Effect of Crystallinity on Compressive Properties of Al-PTFE," *Polymers (Basel)*, Vol. 8, No. 10, pp. 356-369, 2016.
- [18] Salahi, E., Alidoostie, M., Isafi, S. and Mobasherpoor, I., "The Effects of Temperature on the Hardness and Microstructural properties of Hydroxyapatite/Zirconia-Alumina Nano Composites," In Persian, *Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-8, 2012.
- [19] Aziziyan, M., Rabiee, S. M. and Novroozi, S., "Investigations on the YSZ Additions' Effects on the Microstructure of Calcium Phosphate-Zirconia Glass-Ceramic Nano Composite," In Persian, *Iranian Journal of Ceramic Science & Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 9-16, 2012.
- [20] Pahnaneh, F., Naeimi, F. and Aghakhani, M., "Improvement of Surface Properties of Ti64 Alloy in the Presence of ZrO<sub>2</sub> Nano-Particles by Using of Tungsten Inert Gas Welding," In Persian, *Iranian Journal of Surface Science and Engineering*, Vol. 13, No. 33, pp. 89-100, 2017.
- [21] Salehi, S., Fathi, M. H., and Raeissi, K., "Fabrication and characterization of nanostructured hydroxyapatite (HA)/ yttria stabilized zirconia (YSZ) composite coatings with various contents of yttria," In Persian, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 29, No. 1, pp. 31-43, 2010.
- [22] Salehi, H. R., Salami, S., Atarian, M. and Ozhdelnia, O., "Fabrication and Characterization of Pyrolyzed Phenolic/Carbon Nanocomposite Reinforced by Metal Oxide Nanoparticles," In Persian, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 32, No. 1, pp. 39-53, 2013.
- [23] Jamshidi-Alashti, R., Borouni, M. and Niroumand, B., "Production and microstructural investigation of cast ZrO<sub>2</sub>/AZ91 nanocomposite," In Persian, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 32, No. 2, pp. 55-66, 2013..

