



## Experimental Study of the Gaseous Coolants Influence in the Milling of Polytetrafluoroethylene on the Surface Characteristics

Ayub Karimzad Ghavidel<sup>1</sup>, Gholamreza Kiani<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Associate Professor, Department of Organic Chemistry and Biochemistry, Faculty of Chemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

### ARTICLE INFO

**Received:** 01.31.2021

**Revised:** 04.26.2021

**Accepted:** 05.09.2021

#### Keyword:

PTFE machining

Gaseous coolant

Surface roughness

Morphology

Decreasing of elastoplastic effect

#### \*Corresponding Author:

Gholamreza Kiani

Email: [g.kiani@tabrizu.ac.ir](mailto:g.kiani@tabrizu.ac.ir)

### ABSTRACT

The achievement of a desirable surface roughness with an efficient structure is a major challenge in machining of Polytetrafluoroethylene (PTFE) owing to its viscoelastic behavior. The aim of this research is to investigate the effect of gaseous coolants utilization on the roughness and structure of surfaces. For this purpose, the effect of Argon noble and CO<sub>2</sub> effective gases on the machining of PTFE were evaluated, taking into consideration the cutting and feed velocities as input factors. The surface roughness was measured by Ra criterion. The microscopic structure of surfaces was investigated using optical and scanning electron microscopes. To measure the machining temperature, the operation was recorded by high accurate thermal camera. The results show that the utilization of CO<sub>2</sub> due to decreasing local machining temperature to below -40°C can change the cutting behavior of material from viscoelastic to elastoplastic, and reduces the surface roughness up to Ra=0.2 μm. Microscopic studies indicate that the using of CO<sub>2</sub> can govern the viscous behavior during cutting which causes the viscous-flowing of material and prevents the generation of surface cracks. CO<sub>2</sub> also protects the surface from chemical interactions and creation of functional groups during the machining. Microscopic examination revealed that the use of carbon dioxide gas prevents separated chips from re-adhering to the surface.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای  
تهران

کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۳۶۷-۳۴۳

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.130311

20.1001.1.23829796.1400.18.3.18.1



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



## مطالعه تجربی تأثیر خنک‌کننده گازی در فرزکاری پلی‌تترافلئورواتیلن بر خصوصیات سطح

ایوب کریم‌زاد قویدل<sup>۱</sup>، غلامرضا کیانی<sup>۲\*</sup>

- ۱- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه شیمی آلی و بیوشیمی، دانشکده شیمی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دستیابی به صافی سطح مطلوب با ساختاری کارا در ماشین‌کاری پلی‌تترافلئورواتیلن (PTFE) به دلیل رفتار ویسکوالاستیک آن، معضلی اساسی است. هدف این پژوهش بررسی تأثیر به‌کارگیری خنک‌کننده‌های گازی و فاکتورهای ماشین‌کاری بر صافی و ساختار سطوح قطعات از این جنس است. برای این منظور اثر دمش گاز نجیب آرگون و گاز فعال دی‌اکسیدکربن با طرح سرعت برشی و پیشروی به‌عنوان متغیرهای مستقل در ماشین‌کاری PTFE ارزیابی گردید. صافی سطوح توسط معیار Ra اندازه‌گیری شد. ساختار میکروسکوپی سطوح نیز توسط میکروسکوپ‌های نوری و روبشی الکترونی بررسی گردید. برای اندازه‌گیری دمای ماشین‌کاری، عملیات توسط دوربین حرارتی با دقت بالا فیلم‌برداری گردید. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن می‌تواند با کاهش دمای موضع ماشین‌کاری تا ۴۰°C-، رفتار برشی ماده را از ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک تغییر دهد و زبری سطح را تا  $Ra=0.2 \mu m$  پایین آورد. مطالعات میکروسکوپی نشان داد گاز دی‌اکسیدکربن می‌تواند رفتار ویسکوز در حین برش را که موجب سیلان ماده می‌شود، کنترل و از پیدایش ترک‌های سطحی جلوگیری کند و همچنین سطح را از تشکیل گروه‌های عاملی و تغییرات شیمیایی حین ماشین‌کاری محافظت کند. در بررسی‌های میکروسکوپی معلوم شد که استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن از چسبیدن مجدد براده‌های جدا شده به سطح جلوگیری می‌کند.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹

### کلیدواژه‌ها:

ماشین‌کاری پلی‌تترافلئورواتیلن  
خنک‌کننده گازی  
صافی سطح  
مورفولوژی  
کاهش اثر الاستوپلاستیک

\*نویسنده مسئول: غلامرضا کیانی

پست الکترونیکی:

[g.kiani@tabrizu.ac.ir](mailto:g.kiani@tabrizu.ac.ir)



©2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## مقدمه

پلی تترافلورواتیلین<sup>۱</sup> (PTFE) از جمله پلیمرهای مهندسی است که در رده ترموپلاستها طبقه‌بندی می‌شود. این پلیمر کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، پتروشیمی، الکترونیک و پزشکی دارد که دلیل آن را می‌توان در ویژگی‌های منحصر به فرد آن دانست [۱؛ ۲]. از جمله این ویژگی‌ها داشتن مقاومت دمایی بالا، اصطکاک سطحی بسیار پایین، نداشتن واکنش‌پذیری با سایر مواد، مقاومت عالی در برابر اسیدها و بازهای قوی و خصوصیات دی‌الکترونیک مثال‌زدنی این پلیمر است [۱؛ ۳-۶]. این خصوصیات برجسته سبب شده است تا در سالیان اخیر کامپوزیت‌سازی آن با میکرو و نانوذرات به منظور بهبود خواص مکانیکی و گسترش کاربردهای آن، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گیرد [۷-۹].

یکی از کاربردهای گسترده PTFE و کامپوزیت‌های آن، در زمینه آب‌بندی انواع سیال‌ها، اسیدها و بازهای قوی است. اجزایی مانند پکینگ توسط فرایند ماشین‌کاری از این نوع پلیمر تولید می‌شوند که در این اجزا کیفیت سطح موجب آب‌بندی بهتر و نیز کاهش اصطکاک در محوره‌های گردنده و در نهایت افزایش عمر و کیفیت قطعه می‌شود [۱؛ ۱۰]. با توجه به ماهیت ذاتی این پلیمر در اصطکاک سطحی پایین، مهندسان و طراحان انتظار دارند تا در سطوح تماس با قطعاتی از جنس PTFE، حداقل اصطکاک ممکن ایجاد شود. زبری سطح یک ویژگی مهم است که در بیشتر مواقع کیفیت ماشین‌کاری را توصیف می‌کند. علاوه بر این زبری سطح چندین ویژگی از قطعات ماشین‌کاری مانند سایش، انتقال گرما و خصوصیات موئینگی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۱-۱۳].

از سوی دیگر رفتار ویسکوالاستیک پلیمرها، ماشین‌کاری آن‌ها را به معضلی برای محققان تبدیل کرده است [۱۴-۱۶]. این خصوصیت حتی در مورد اپوکسی‌رزین‌ها نیز وجود دارد و ماشین‌کاری آن‌ها را نیز تحت شعاع قرار می‌دهد [۱۷؛ ۱۸]. در این راستا، در پلیمرهایی که ساختار شبه‌کریستالی دارند ماشین‌کاری در دمایی پایین‌تر از دمای شیشه‌ای شدن ( $T_g$ )، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا در این دماها با انتقال رفتار پلیمر از حالت ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک و جلوگیری از خمیری شدن براده‌ها، احتمال تشکیل لایه مرزی مجدداً منجمد شده، کاهش می‌یابد [۱۶]. به‌عنوان یک نتیجه کلی رفتار ویسکوالاستیک و دمای شیشه‌ای شدن دو فاکتور اصلی در به چالش کشیدن ماشین‌کاری پلیمرهاست. محققانی در این راستا کوشیده‌اند تا با تحت کنترل درآوردن این رفتارها، معضلات ماشین‌کاری پلیمرها را رفع کنند [۱۴-۱۹]. از جمله تکنیک‌هایی که در این زمینه توانسته است مؤثر واقع گردد، خنک‌کاری شدید پلیمر حین براده‌برداری توسط نیتروژن مایع است که به ماشین‌کاری کرایوژنیک<sup>۲</sup> شهرت یافته است [۱۴؛ ۱۹]. این روش کمک می‌کند تا پدیده انتقال به حالت الاستوپلاستیک روی دهد و دمای ماشین‌کاری، در مقادیری پایین‌تر از  $T_g$  تثبیت گردد. پژوهش‌های مختلفی، تأثیرات مثبت این روش در کاهش زبری سطح حاصل از ماشین‌کاری را به اثبات رسانده‌اند [۱۴؛ ۱۹؛ ۲۰].

در سوی مقابل، علاوه بر روش‌های خنک‌کاری، فاکتورهای ماشین‌کاری از عوامل دخیل در شکل‌گیری مورفولوژی سطوح است. در این راستا نیز محققانی تلاش کرده‌اند تا زبری سطح حاصل از فرایند ماشین‌کاری را بر جنس‌های مختلف پلیمری تحت کنترل درآورند [۲۱-۲۳]. در پژوهش ژیاو<sup>۳</sup> و همکارانش عوامل تأثیرگذار بر کیفیت سطح ماشین‌کاری پلی‌اتیلن با چگالی‌های بالا و پایین ارزیابی شده است. آن‌ها با ثابت نگه‌داشتن عمق برش و تغییر در متغیرهای ماشین‌کاری از جمله عده دوران و نیز میزان پیشروی پی‌بردند که خاصیت ویسکوالاستیک بر کیفیت سطح ماشین‌کاری نقشی مهم و تأثیرگذار دارد. ارتباط مستقیم تغییر شکل ویسکوالاستیک با میزان سرعت و دمای

<sup>1</sup> Polytetrafluoroethylene

<sup>2</sup> Cryogenic

<sup>3</sup> Xiao

ماشین‌کاری از جمله نتایج مهم این پژوهش است که انتخاب پارامترهای مناسب و استفاده از خنک‌کننده‌های مخصوص را ضروری می‌سازد [۲۳].

در پژوهش پتروپولوس<sup>۱</sup> و همکارانش که در رابطه با تأثیر انواع الیاف تقویت‌کننده در کامپوزیت‌ها بر کیفیت سطح آنها می‌باشد، از روش تحلیل آماری رگرسیون و تجزیه و تحلیل واریانس به منظور بررسی شرایط برش و جنس ابزار استفاده شده است. نتایج کار آن‌ها نشان داد که میزان پیشروی، بیشترین تأثیر را بر زبری سطح دارد، در حالی که سرعت برشی در جایگاه دوم قرار داشت. نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که حضور الیاف شیشه‌ای موجب افزایش زبری سطح نسبت به الیاف کربنی می‌شود. ضریب انتقال حرارتی متفاوت این دو کامپوزیت را می‌توان عامل اصلی تفاوت زبری سطح در آن‌ها دانست [۲۲]. در بررسی تجربی مشابه دیگری که پالانیکومار<sup>۲</sup> انجام داده است، تأثیر پارامترهای برش در فرایند ماشین‌کاری کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه<sup>۳</sup> بررسی شده است ولی هر کدام از دو تحقیق فوق، بر استفاده از روش‌های تحلیلی متفاوتی تمرکز داشتند. نکته قابل توجه، دستیابی به نتایج مشابه توسط هر دو مقاله است؛ به نحوی که افزایش سرعت برش و پیشروی باعث افزایش ساییدگی ابزار می‌شود [۲۱].

تغییر ترکیبات PTFE با استفاده از ابزار برشی پلی کریستال تحقیقی بود که کاتالین<sup>۴</sup> و همکارانش انجام دادند که در آن تأثیر پارامترهای برشی و شعاع نوک ابزار بر نیروی برشی و زبری سطح بررسی شده است. از نتایج مهم این پژوهش می‌توان به اثرگذاری بیشتر عمق برش و مقدار پیشروی بر نیروی برش، همچنین زبرتر شدن سطح با افزایش میزان پیشروی اشاره کرد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که زبری سطح به ترتیب با افزایش عمق برش و سرعت برش کاهش می‌یابد [۱۱].

تورنر<sup>۵</sup> و همکارانش پژوهشی در زمینه بررسی تأثیرات خنک‌کننده‌های ماشین‌کاری بر کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن<sup>۶</sup> صورت داده‌اند. هدف اصلی این تحقیق، تعیین درصد جذب خنک‌کننده‌ها توسط ماده تحت ماشین‌کاری بود. شش نمونه از پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن در شش محیط خنک‌کاری از جمله هوا، آب و چهار نوع خنک‌کننده دیگر در دمای ۶۰°C، به مدت هفت روز قرار گرفتند. در نهایت از میان خنک‌کننده‌ها تنها یک ماده با نام Cindolube V30ML کمترین میزان جذب توسط کامپوزیت‌ها را داشت. همچنین این سیال، کمترین اثر مضر را نیز بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها ایجاد کرد. در این بین آب نیز به دلایل تخریب مکانیکی و نیز میزان نفوذ بیشتر، به‌عنوان بدترین نوع خنک‌کننده شناخته شد [۲۴].

براساس مطالعات صورت گرفته استفاده از خنک‌کننده‌های رایج برای ماشین‌کاری PTFE اثر نامطلوبی بر خواص قطعات تولیدی دارد. از سوی دیگر با توجه به رفتار الاستوپلاستیک PTFE در ماشین‌کاری، دستیابی به کیفیت سطح مطلوب، تنها با به‌کارگیری ماده خنک‌کاری امکان‌پذیر است. این پژوهش در تلاش است تا به‌جای استفاده از مایعات خنک‌کاری مرسوم، از سیال‌های گازی برای خنک‌کاری موضع ماشین‌کاری بهره برده و به بررسی تأثیر آن بر صافی سطح، ساختار میکروسکوپی و مورفولوژیکی و همچنین بر ترکیب شیمیایی سطح بپردازد. در این راستا، تأثیر دو نوع گاز آرگون (Ar) و دی‌اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) با در نظر گرفتن متغیرهای ماشین‌کاری نظیر سرعت برشی و پیشروی بررسی خواهد شد.

<sup>1</sup> Petropoulos

<sup>2</sup> Palanikumar

<sup>3</sup> Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

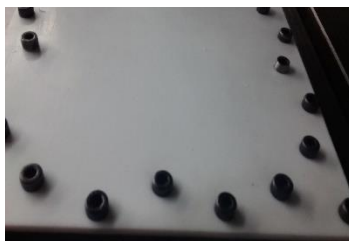
<sup>4</sup> Catalin

<sup>5</sup> Turner

<sup>6</sup> Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ورق PTFE تولیدی شرکت پارس پلیمر ایران در ابعاد  $۱۷۰ \times ۱۷۰ \times ۵$  میلی‌متر که به روش اکستروژن تهیه شده بود، استفاده گردید. عملیات فرزکاری توسط دستگاه FP4M ساخت شرکت ماشین‌سازی تبریز انجام شد. برای حصول اطمینان از صحت عملکرد دستگاه و کالیبره بودن آن، ارزیابی توسط ابزارهای استاندارد دورسنج و ساعت اندازه‌گیری انجام شد. نتایج این ارزیابی نشان داد خطای پیشروی دستگاه کمتر از  $۳\%$  و خطا در تعداد دوران کمتر از  $۵\%$  مقادیر اسمی است. از ابزار انگشتی به قطر  $۴$  میلی‌متر از جنس فولاد تندبر<sup>۱</sup> با روکش تیتانیوم نپتراید به‌عنوان ابزار برشی استفاده شد. برای انجام مراحل مختلف آزمایش‌ها، ورق PTFE مطابق با شکل ۱، بر فیکسچر مخصوصی که قبلاً طراحی و ساخته شده بود، توسط پیچ‌ها بسته شد. فاصله نزدیک این پیچ‌ها به یکدیگر کمک می‌کند تا در حین انجام عملیات از ارتعاش و خم شدن نمونه جلوگیری به‌عمل آید.



شکل ۱. قطعه آماده‌شده برای ماشین‌کاری

از دو کپسول حاوی گاز دی‌اکسیدکربن و آرگون برای تأمین گاز برای خنک‌کاری استفاده شد. به منظور تنظیم فشار خروجی گازهای خنک‌کاری، روی هر دو کپسول مانومتر مربوطه نصب گردید و فشار خروجی روی  $۳$  بار تنظیم گردید. انتقال گازهای خنک‌کاری از خروجی کپسول به محل برش، توسط شیلنگ پنوماتیکی به قطر  $۶$  میلی‌متر انجام شد. برای اندازه‌گیری دمای حین ماشین‌کاری از روش تصویربرداری حرارتی<sup>۲</sup>، توسط دوربین حرارتی CAT S60-FLIR با گستره دمایی  $۵۰-$  تا  $۱۵۰^{\circ}\text{C}$  با ریزنمایی  $۰/۱^{\circ}\text{C}$  استفاده شد. ساختار میکروسکوپی سطوح پس از ماشین‌کاری با استفاده از میکروسکوپ نوری آرادیکال<sup>۳</sup> مجهز به دوربین تصویربرداری در بزرگنمایی‌های  $۱۰۰\times$  و  $X$  بررسی شد. صافی سطوح ماشین‌کاری شده با استفاده از صافی‌سنج Ttr200 ساخت کشور تایوان با در نظر گرفتن  $Lc = 0.8 \text{ mm}$  و  $Lt = 2.4 \text{ mm}$  مطابق استاندارد ISO 25178 با معیار Ra اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر مورفولوژی سطوح ماشین‌کاری شده با بزرگنمایی بیشتر، تصاویر از سطوح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-TESCAN-MIRA3) گرفته شد. این بررسی روی نمونه‌ها با حداقل و حداکثر زبری ایجاد شده با به‌کارگیری گاز آرگون و دی‌اکسیدکربن صورت پذیرفت. ترکیب شیمیایی این سطوح نیز با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی انرژی پراش اشعه ایکس (EDX) آنالیز شد. شایان ذکر است آماده‌سازی نمونه‌های مطالعه شده در SEM، پیرامون شیار ایجاد شده در ماشین‌کاری توسط دستگاه برش لیزری سه‌سند به قطر  $8 \text{ mm}$  با توان  $80 \text{ W}$  و با سرعت برشی  $10 \text{ mm/s}$  برش داده شد، چون در صورت استفاده از روش‌های برش مکانیکی برای آماده‌سازی نمونه-

<sup>1</sup> High-speed steel (HSS)

<sup>2</sup> Thermal imaging camera

<sup>3</sup> Optical microscope

<sup>4</sup> Radical

های SEM در این مرحله احتمال تغییر ساختار مورفولوژیکی سطوح وجود داشت. سطح نمونه‌ها قبل از تصویربرداری توسط این میکروسکوپ، به روش کند و پاش در ضخامت تقریبی ۲۰ انگستریم با طلا پوشش داده شد. شکل ۲ تصویری از نمونه‌ها پس از برش توسط لیزر و پوشش با لایه طلا را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تصویر نمونه‌های آماده شده پس از برش لیزری و پوشش دهی با طلا برای تصویربرداری و آنالیز توسط SEM

طراحی آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل، با در نظر گرفتن سرعت برشی در سه سطح  $15/7$ ،  $20/1$  و  $25/2$ ، سرعت پیشروی در سطوح  $40$ ،  $100$ ،  $160$  و دو نوع گاز خنک‌کاری آرگون و دی‌اکسیدکربن به‌عنوان متغیرهای مستقل انجام شد. عمق برش به میزان  $0/3$  میلی‌متر در تمام مراحل ثابت در نظر گرفته شد. هر مرحله از آزمایش، با سه بار تکرار انجام شد و میانگین صافی سطوح اندازه‌گیری شده به‌عنوان نتیجه نهایی گزارش گردید. مراحل مختلف آزمایش‌ها و پارامترهای تنظیمی هر مرحله در جدول ۱ داده شده است.

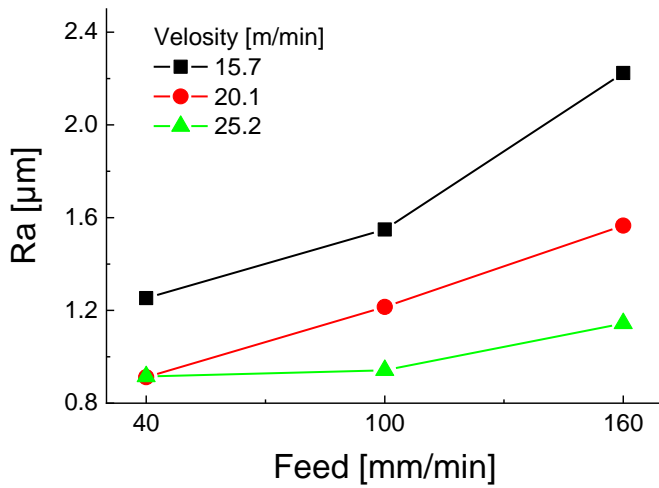
جدول ۱. مراحل انجام آزمایش‌ها

مرحله	نوع گاز خنک‌کننده	سرعت پیشروی (mm/min)	سرعت برشی (m/min)
۱	CO <sub>2</sub>	۴۰	۱۵/۷
۲	Ar	۴۰	۱۵/۷
۳	CO <sub>2</sub>	۱۰۰	۱۵/۷
۴	Ar	۱۰۰	۱۵/۷
۵	CO <sub>2</sub>	۱۶۰	۱۵/۷
۶	Ar	۱۶۰	۱۵/۷
۷	CO <sub>2</sub>	۴۰	۲۰/۱
۸	Ar	۴۰	۲۰/۱
۹	CO <sub>2</sub>	۱۰۰	۲۰/۱
۱۰	Ar	۱۰۰	۲۰/۱
۱۱	CO <sub>2</sub>	۱۶۰	۲۰/۱
۱۲	Ar	۱۶۰	۲۰/۱
۱۳	CO <sub>2</sub>	۴۰	۲۵/۲
۱۴	Ar	۴۰	۲۵/۲
۱۵	CO <sub>2</sub>	۱۰۰	۲۵/۲
۱۶	Ar	۱۰۰	۲۵/۲
۱۷	CO <sub>2</sub>	۱۶۰	۲۵/۲
۱۸	Ar	۱۶۰	۲۵/۲

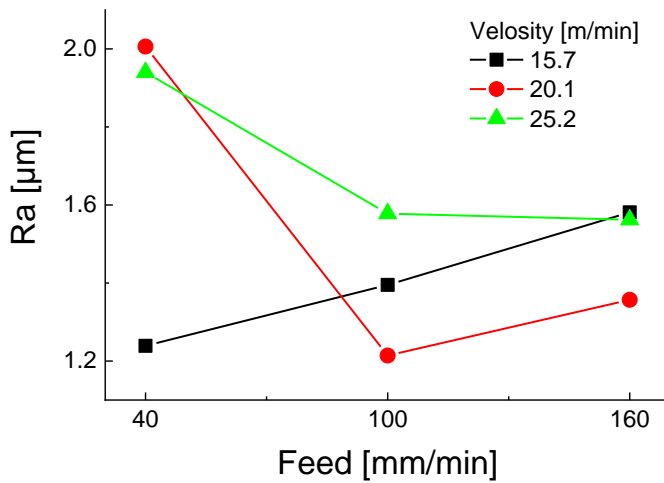
## بحث و نتایج

### صافی سطوح

تأثیر فاکتورهای سرعت برشی و پیشروی، همچنین نوع گاز خنک‌کاری بر صافی سطح در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ (الف) و (ب) به ترتیب نتایج مربوط به اندازه‌گیری صافی سطوح تحت خنک‌کاری گاز دی‌اکسیدکربن و آرگون را نشان می‌دهد. با مقایسه دو شکل مشخص می‌گردد که به‌کارگیری گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان عامل خنک‌کاری، روند تغییرات صافی سطح را قابل‌پیش‌بینی می‌کند در حالی که این امکان برای نمونه‌های ماشین‌کاری‌شده تحت گاز آرگون مقدور نیست. مواد پلیمری از نظر مکانیکی، رفتار ویسکوالاستیک از خود نشان می‌دهند [۲۵]. در مورد PTFE نیز این رفتار صادق است و زمانی که دما بالا می‌رود این رفتار کاملاً متمایل به ویسکوز می‌شود [۲۶]. در فرایند ماشین‌کاری پلیمرها به دلیل اصطکاک بالای بین ابزار و قطعه‌کار، دما بسیار بالا می‌رود و سبب می‌گردد تا در لایه مزری بین ابزار و قطعه، رفتار برشی ویسکوالاستیک اتفاق افتد [۲۰؛ ۲۷]. بدیهی است در چنین شرایطی، عمل برش بر مبنای تئوری‌های موجود قابل‌پیش‌بینی نخواهد بود؛ زیرا بخشی از براده‌های جدا شده می‌توانند به سطح ابزار بچسبند و با تشکیل لبه انباشته، شرایط ماشین‌کاری را تحت تأثیر قرار دهند [۲۶]. همچنین در حالت برش ویسکوالاستیک احتمال چسبیدن بخشی از براده‌های جدا شده به سطح ماشین‌کاری‌شده وجود دارد که منجر به تغییرات تصادفی در مقادیر صافی سطح می‌گردد [۲۸]. در صورتی که عملیات خنک‌کاری بتواند رفتار برشی ویسکوالاستیک را در لایه مزری بین ابزار و قطعه‌کار به رفتار الاستوپلاستیک تبدیل کند؛ تغییرات صافی سطح قابل‌پیش‌بینی خواهد بود. برای انجام این تغییر در رفتار برشی ماده، لازم است که دمای ماده در لایه مزری تا زیر دمای  $T_g$  پلیمر به‌شدت کاهش یابد تا براده‌برداری از ماده از حالت ویسکوز به الاستیک یا حتی پلاستیک (ترد) تبدیل گردد [۱۴؛ ۲۰]. برای اثبات این فرضیه، دمای ماشین‌کاری تحت خنک‌کاری دو گاز آرگون و دی‌اکسیدکربن با دوربین حرارتی فیلم‌برداری شد. شکل ۴ دو تصویر حرارتی از فرایند را برای دو گاز خنک‌کاری استفاده‌شده نشان می‌دهد. در این شکل ۴ (الف) خنک‌کاری با گاز دی‌اکسیدکربن و در شکل ۴ (ب) توسط گاز آرگون صورت پذیرفته است. در این تصاویر به‌وضوح مشاهده می‌گردد که گاز  $CO_2$  توانسته است دمای کانون ماشین‌کاری را تا حدود  $40^\circ C$  - تقلیل دهد. این در حالی است که بهره‌گیری از گاز آرگون تنها توانسته است دما را در موقعیت درگیری ابزار با قطعه، تا حدود  $200^\circ C$  تقلیل دهد. در مورد PTFE دمای شیشه‌ای شدن معمولاً بالاتر از  $110^\circ C$  گزارش شده است [۲۹] ولی در حوالی  $27^\circ C$  تغییرات قابل‌توجهی در رفتار ویسکوزی ماده روی می‌دهد [۳۰]. بنابراین کاهش دما به مقادیر بسیار منفی می‌تواند کمک چشمگیری در انتقال رفتار برشی PTFE ایفا کند. گزارش‌های برخی منابع نشان می‌دهد در دماهای کم‌تر از  $0^\circ C$  ضریب اصطکاک بین فولاد و PTFE به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد که خود می‌تواند در کاهش اصطکاک در ماشین‌کاری و نهایتاً کنترل صافی سطح نقش به‌سزایی داشته باشد [۲۹]. بنابراین استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن به‌عنوان عامل خنک‌کاری قادر است با ایجاد دمای منفی قابل‌توجه و کاهش ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه، رفتار برشی PTFE را از حالت ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک سوق دهد و در نتیجه روند تغییرات صافی سطح با تغییر پارامترهای ماشین‌کاری قابل‌پیش‌بینی باشد.



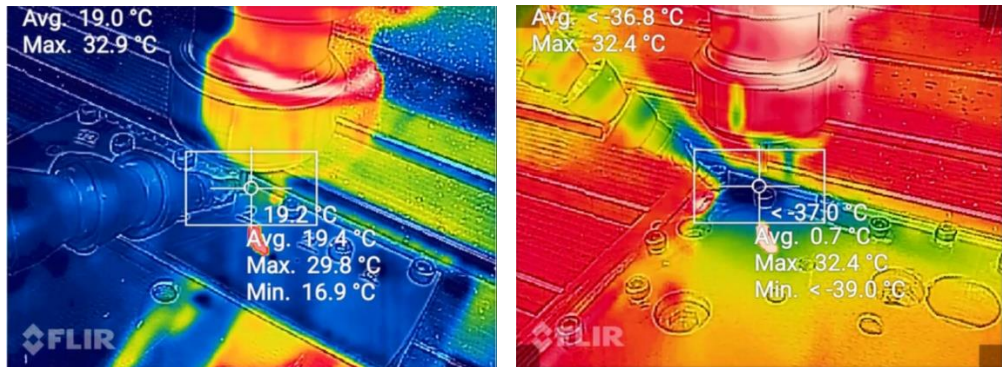
(الف)



(ب)

شکل ۳. تأثیر فاکتورهای فرایند بر صافی سطح حاصل از فرز کاری با ابزار انگشتی روی جنس PTFE با خنک کاری توسط گازهای: (الف) CO2 (ب) Ar





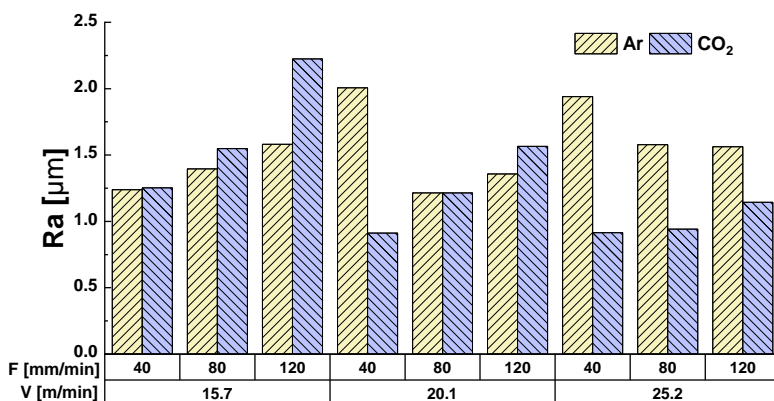
(ب)

(الف)

شکل ۴. تصویر حرارتی فرایند ماشین کاری برای خنک کاری با گاز: (الف) CO<sub>2</sub> (ب) Ar

در شکل ۳ (الف) مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. این روند افزایشی برای تمامی سرعت‌های برشی مطالعه شده مشاهده می‌گردد که در توافق با تئوری‌های گذشته تأثیر پیشروی بر صافی سطح است [۱۶]؛ به نحوی که در فرایند فرزکاری با تعداد دوران ثابت ابزار، با افزایش سرعت پیشروی، گام‌های طی شده به‌ازای هر دور ابزار روی قطعه افزایش می‌یابد و سبب می‌گردد تا صافی سطح ایجاد شده تقلیل پیدا کند [۳۱]. بهبود صافی سطح با افزایش سرعت برشی، نکته قابل توجه دیگر در این شکل است که در فرزکاری مواد الاستوپلاستیک این اثر مشاهده می‌گردد؛ زیرا با افزایش سرعت برشی لبه انباشته کاهش می‌یابد و صافی سطح بهبود پیدا می‌کند. این یافته به همراه نتایج اندازه‌گیری دمای ماشینکاری مؤید انتقال رفتار برشی از حالت ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک تحت تأثیر دمای شدید منفی ایجاد شده با گاز دی‌اکسیدکربن است [۳۰].

شکل ۳ (ب) نیز مقادیر صافی سطوح را برای حالت استفاده از گاز آرگون نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که در مورد استفاده از گاز آرگون شرایط متفاوت‌تر از حالت بهره‌گیری از گاز دی‌اکسیدکربن بوده و رفتار نسبت به سرعت برشی، روند تغییرات منظمی ندارد. به‌نظر می‌رسد در سرعت برشی ۱۵/۷ m/min به دلیل پایین بودن دمای ماشین کاری و نیروی اصطکاکی کم‌تر، رفتار برشی از مدل الاستوپلاستیک تبعیت می‌کند ولی با افزایش سرعت برشی به ۲۰/۱ و سپس ۲۵/۲ m/min، به دلیل افزایش دمای در محل تماس ابزار با ماده، برش تحت تأثیر تئوری برش ویسکوز صورت می‌پذیرد. بدیهی است در این شرایط، به دلیل کاهش شدید ویسکوزیته پلیمر به‌صورت لحظه‌ای در لایه مرزی بین ابزار و قطعه کار [۳۲]، بخشی از آن به ابزار و سطح ماشین کاری شده می‌چسبد و روند تغییرات در مقدار صافی سطح را به حالت تصادفی متمایل می‌سازد. برای مقایسه بهتر، اثر نوع گاز خنک کننده نتایج در نمودار شکل ۵ نیز نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که در سرعت برشی ۱۵/۷ m/min استفاده از گاز آرگون عملکرد بهتری را در ایجاد صافی سطح دارد ولی با افزایش سرعت برشی به تدریج عملکرد گاز دی‌اکسیدکربن مطلوب‌تر است. به‌عنوان یک نتیجه کلی و مقدماتی، به‌کارگیری گاز دی‌اکسیدکربن برای افزایش سرعت برشی در فرایند و ایجاد زبری سطح کم‌تر، توصیه می‌گردد.



شکل ۵. تأثیر استفاده از خنک‌کننده‌های گازی و فاکتورهای ماشینکاری بر صافی سطح فرزکاری PTFE

جدول ۲ آنالیز واریانس داده‌ها و تحلیل رگرسیون خطی نتایج برای حالت استفاده از گاز CO<sub>2</sub> را نشان می‌دهد. براساس رابطه ارائه شده در این جدول می‌توان صافی سطوح را با توجه به فاکتورهای ورودی سرعت برشی، سرعت پیشروی در بازه‌های مطالعه شده تخمین زد.

جدول ۲. آنالیز واریانس و رگرسیون خطی نتایج مربوط به حالت استفاده از گاز CO<sub>2</sub>

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F	P-value
رگرسیون	۲	۱/۲۴۴۵	۰/۶۲۲۶	۱۸/۴۲	۰/۰۰۳
سرعت برشی	۱	۰/۵۷۳۹	۰/۵۷۳۹۸	۱۶/۹۶	۰/۰۰۶
پیشروی	۱	۰/۶۷۱۶	۰/۶۷۱۶۴	۱۹/۸۸	۰/۰۰۴
خطا	۶	۰/۰۳۳۷۸		----	
مجموع	۸	۱/۲۴۴۷	S = ۰/۱۸۳۷۸۹	RSq = ۸۶%	RSq(adj) = ۸۱.۳۳%

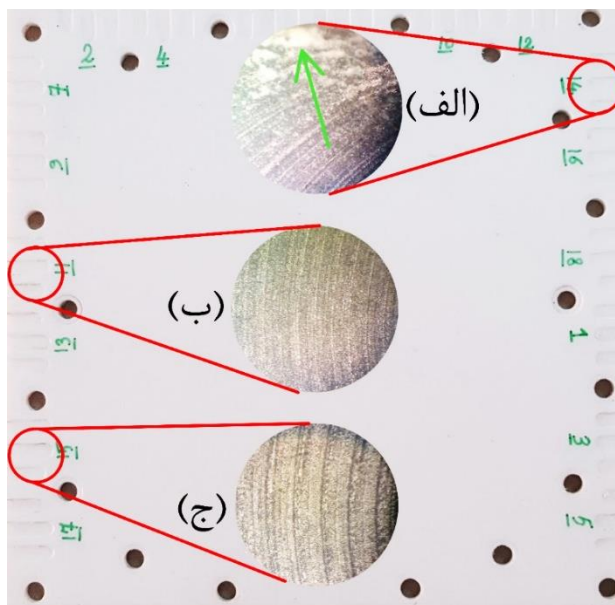
سرعت برشی =  $۰/۰۷۰۴ \times$  پیشروی  $\times ۰/۰۰۵۱۵ + ۲/۲۱۸ =$  زبری سطح

### ساختار میکروسکوپی سطوح

ساختار سطوح در بزرگنمایی‌های کوچک توسط میکروسکوپ نوری مطالعه گردید. شکل ۵ نمونه‌ای از تصاویر گرفته شده برخی از سطوح پس از ماشین‌کاری را نشان می‌دهد. مطالعات میکروسکوپی انجام شده نشان داد در سطوح ماشین‌کاری شده‌ای که توسط گاز آرگون خنک‌کاری گردیدند، تکه‌های کوچکی از پلیمر ویسکوز شده در لایه مرزی بین ابزار و سطح گذرا در بسیاری از نقاط به سطح چسبیده‌اند که سبب می‌گردند تا زبری سطح افزایش یابد. نمونه‌ای از این پدیده در شکل ۶ (الف) با فلش سبز رنگ نشان داده شده است. تعداد این نقاط در مورد سرعت‌های برشی ۲۰/۱ و ۲۵/۲ m/min با کاهش سرعت‌های پیشروی به شدت افزایش یافته است. به نظر می‌رسد به دلیل اصطکاک بالای موجود بین ابزار و سطح در حال ماشین‌کاری تحت این شرایط، پروسه بیشتر متمایل به حالت رفتاری ویسکوالاستیک می‌باشد و موجب ازدیاد این نقاط شده است [۳۳]. با افزایش مقدار پیشروی در سرعت برشی ۲۰/۱ m/min، تعداد این نقاط کمتر مشاهده گردید که نشان می‌دهد علاوه بر خنک‌کاری، کاهش اصطکاک توسط تنظیم فاکتورهایی نظیر افزایش پیشروی، نقش مؤثری در هدایت پروسه ماشینکاری پلیمرها به سمت حالت الاستوپلاستیک دارد. شایان ذکر

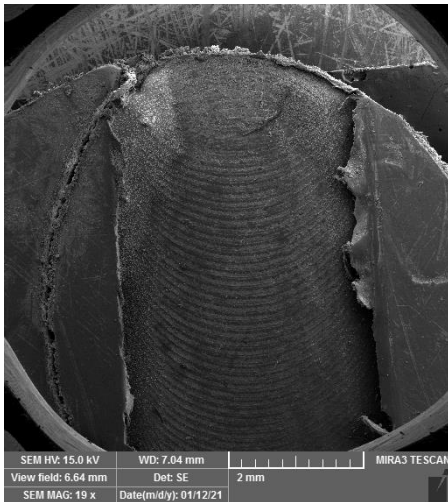
است که افزایش زبری سطح در سرعت برشی  $20/1 \text{ m/min}$  با افزایش پیشروی از  $100$  به  $160 \text{ mm/min}$  (مطابق با شکل ۲ (ب)) به دلیل تعمیق اثر خواب ابزار و بزرگتر شدن گام این اثر است که در تصویر میکروسکوپی شکل ۵ (ج) به وضوح مشاهده می‌گردد. مقایسه اثر سرعت برشی بر سطوح نشان داد که با افزایش سرعت برشی از  $20/1$  به  $25/2$  متر بر دقیقه تعداد نقاط ناشی از چسبندگی ویسکوز شدیداً بالا می‌رود و به این دلیل زبری سطح با ازدیاد سرعت برشی به بیشینه مقدار خود برخلاف تصور رایج، موجب بدتر شدن کیفیت سطح می‌گردد. در سرعت برشی  $15/7 \text{ m/min}$  رفتار کاملاً متفاوتی مشاهده شد. در این سطح از سرعت برشی چون اصطکاک حین ماشین‌کاری کم‌تر است، نقاط ناشی از چسبندگی ویسکوز مشاهده نشد. در این مقدار از سرعت برشی، افزایش زبری سطح با فزونی یافتن پیشروی نیز می‌تواند به اثر خواب ابزار نسبت داده شود؛ زیرا در بررسی‌های میکروسکوپی صورت گرفته، گام‌های اثر خواب ابزار بزرگ‌تر و برجسته‌تر مشاهده گردید.

در سطوح ماشین‌کاری شده تحت اثر گاز دی‌اکسیدکربن هیچ علائمی به نفع وجود نقاط ناشی از چسبندگی ویسکوز مشاهده نشد. این یافته به وضوح بیان می‌کند که به کارگیری این سیال گازی برای خنک‌کاری می‌تواند در پدیده انتقال رفتار ماشین‌کاری از حالت ویسکوالاستیک به حالت الاستوپلاستیک و همچنین کاهش ضریب اصطکاک حین ماشین‌کاری موفق عمل کند و سبب گردد تا زبری سطح براساس شناخت‌های رایج از اثر فاکتورهای ماشین‌کاری قابل پیش‌بینی باشد [۳۱]. نکته قابل ذکر در مورد سطوح خنک شده با این گاز اثر معمول افزایش پیشروی در عمق بخشیدن به خطوط و اثرات خواب ابزار است که همان‌گونه که در شکل ۶ (ب) و (ج) نشان داده شده است در حین مطالعات میکروسکوپی مشاهده گردید و اثبات می‌کند که رفتار ماده تحت برش بیشتر متمایل به الاستوپلاستیک است [۳۴].

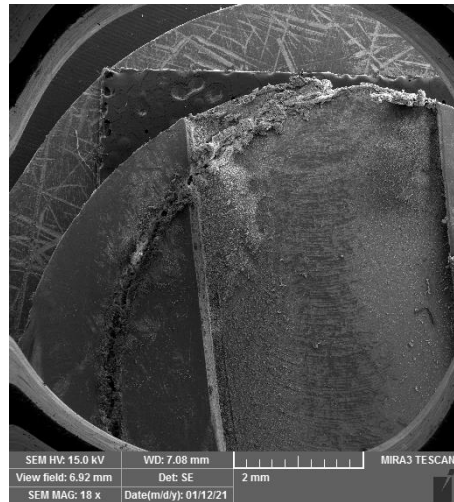


شکل ۶. تصویر میکروسکوپی برخی از سطوح ماشین‌کاری شده: (الف) گاز خنک‌کاری آرگون، سرعت برشی  $25/2 \text{ m/min}$  و پیشروی  $40 \text{ mm/min}$  (ب) گاز خنک‌کاری دی‌اکسیدکربن، سرعت برشی  $20/1 \text{ m/min}$  و پیشروی  $160 \text{ mm/min}$  (ج) گاز خنک‌کاری دی‌اکسیدکربن، سرعت برشی  $25/2 \text{ m/min}$  و پیشروی  $100 \text{ mm/min}$

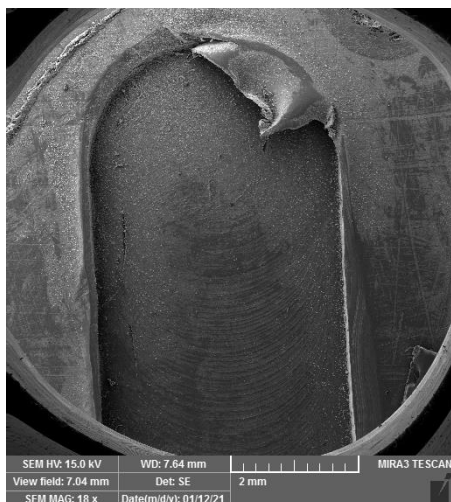
شکل ۷ تصاویر گرفته شده توسط حالت میدانی SEM (Field) از نمونه‌ها با حداقل و حداکثر زبری سطح برای گازهای آرگون و دی‌اکسیدکربن را نشان می‌دهد. مقایسه تصاویر ارائه شده در این شکل بوضوح نشان می‌دهد که برای نمونه با حداقل زبری سطح با به‌کارگیری گاز دی‌اکسیدکربن (شکل ۷(الف)) لبه‌های شیار کاملاً مستقیم و عاری از هرگونه پلیسه ایجاد شده‌اند. در لبه سمت چپ، قسمت بالایی شکل ۷(الف) مواد زاید مشاهده می‌گردد که در اثر پاشش مذاب در فرایند برش لیزری نمونه‌ها شکل گرفته است و مربوط به عملیات فرزکاری نیست. در شکل ۷(ب) نیز که نمونه تحت گاز دی‌اکسیدکربن با فاکتورهای ماشین‌کاری متفاوت از حالت (الف) خنک‌کاری شده است، وجود پلیسه‌های ناشی از ماشین‌کاری مواد ویسکوز دیده می‌شود. این یافته اثبات می‌کند که علاوه بر خنک‌کاری نمونه تا دمای زیر  $T_g$ ، فاکتورهای متغیر ماشین‌کاری خود نیز تأثیر غیرقابل‌انکاری بر رفتار برشی ماده می‌گذارد. در شکل (الف)  $V=25.4$  m/min و  $F=40$  mm/min و در شکل (ب)  $V=15.7$  m/min و  $F=160$  mm/min است. با مقایسه شرایط ماشین‌کاری دو نمونه به‌نظر می‌رسد اگر فرایند در دمایی بسیار کم‌تر از دمای  $T_g$  انجام گردد، سرعت‌های برشی پایین رفتار ویسکوزی ماده تحت برش را تشدید می‌کنند در صورتی که سرعت‌های برشی بالاتر این رفتار را تضعیف می‌کند. در نمونه‌های ماشین‌کاری شده تحت دمش گاز آرگون که در شکل‌های (ج) و (د) نشان داده شده‌اند نیز لبه‌ها دارای پلیسه هستند که نشانگر رفتار برشی ویسکوز است. انتظار می‌رود در پروسه ماشین‌کاری پلیمرها با تمایل یافتن عملیات به‌سوی برش الاستوپلاستیک، این پلیسه‌ها به حداقل میزان ممکن برسند. شواهد موجود این یافته را تأیید می‌کند که اگر بتوان برش در حالت ویسکوز را تقلیل داد مقدار صافی سطح نیز بهبود خواهد یافت که به‌کارگیری هم‌زمان گاز دی‌اکسیدکربن و سرعت‌های برشی بالا می‌تواند به این پدیده کمک شایانی کند.



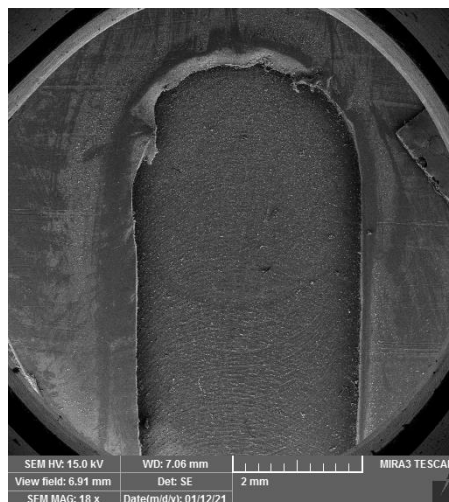
(ب)



(الف)



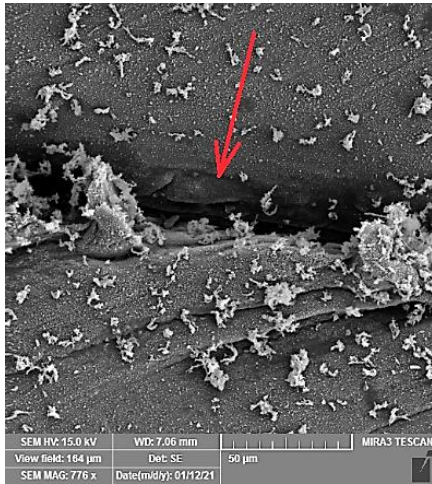
(د)



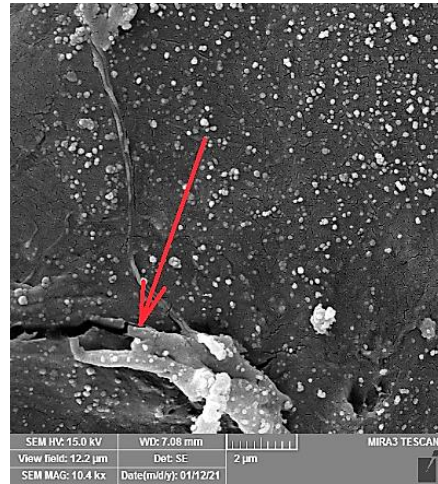
(ج)

شکل ۷. تصاویر میدانی نمونه‌های مطالعه شده با میکروسکوپ روبشی الکترونی. (الف) و (ب) ماشین کاری تحت دمش گاز  $CO_2$  و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف)  $V=25.4$  m/min و  $F=40$  mm/min (ب)  $V=15.7$  m/min و  $F=160$  mm/min (ج)  $V=20.1$  m/min و  $F=100$  mm/min (د)  $V=20.1$  m/min و  $F=40$  mm/min

همان‌گونه که بحث شد یکی از مشکلاتی که در ماشین کاری مواد ویسکوالاستیک روی می‌دهد لایه مرزی بین ابزار و قطعه کار به دلیل افزایش دما به منطقه‌ای بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن انتقال می‌یابد [۱۶]. در تداوم عملیات پس از کاهش دمای این لایه به زیر  $T_g$ ، مجدداً کریستال‌های این ناحیه به حالت ویسکوالاستیک بازمی‌گردند. این پدیده انتقالی و برگشت‌پذیر احتمال شکل‌گیری میکروتُرک‌ها و سوراخ‌های ناشی از انقباض ترمودینامیکی را در این لایه افزایش می‌دهد [۳۵؛ ۳۶]. میکروتُرک‌ها خطری حیاتی برای عملکرد قطعات پلیمری محسوب می‌گردند؛ زیرا تحت اثر بارگذاری احتمال رشد و شکست قطعه را قوت می‌بخشند [۳۶]. برای این منظور سطوح با SEM به صورت دقیق و جزئی مورد بازرسی قرار گرفت. در نمونه خنک‌کاری شده با  $CO_2$  ترک در سطوح مشاهده نگردید ولی برای سطوح خنک‌کاری شده با Ar ترک‌هایی مشاهده شد که دو نمونه از آن‌ها در شکل ۸ به تصویر کشیده شده است. این نتایج نشان می‌دهد گاز  $CO_2$  نه تنها در بهبود صافی سطح نقش مؤثری دارد بلکه در جلوگیری از پیدایش ترک‌های ناشی از پدیده انتقالی به دمای  $T_g$  نیز مفید است؛ زیرا تغییرات دمایی اتفاق افتاده با پوشش این گاز نمی‌تواند لایه گذرا بین ابزار و ماده تحت ماشین کاری را به دمای بالاتر از  $T_g$  رهنمون سازد.



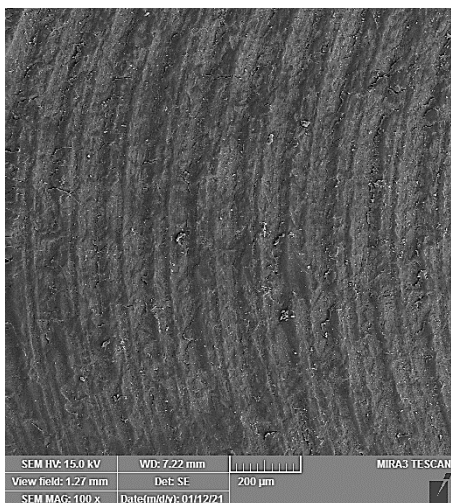
(ب)



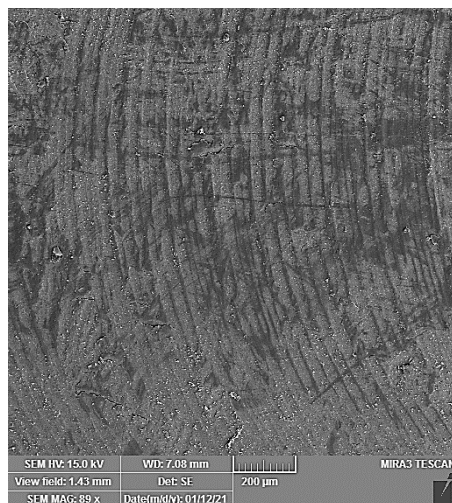
(الف)

شکل ۸. میکروتِرک‌های ایجاد شده در لایه مرزی بین ابزار و قطعه کار برای سطوح ماشین کاری شده تحت دمش گاز Ar با شرایط ماشین کاری متفاوت: (الف)  $V=20.1$  m/min و  $F=100$  mm/min و (ب)  $V=20.1$  m/min و  $F=40$  mm/min

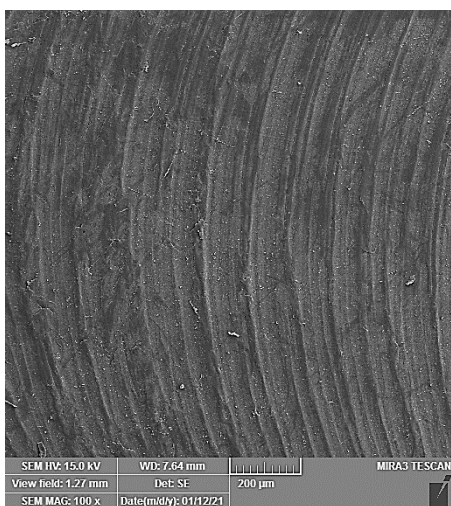
میکروگراف‌های تهیه شده توسط SEM برای نمونه‌های مطالعه شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. شکل ۹ (الف) و (ب) مربوط به نمونه‌های ماشین کاری شده تحت دمش گاز  $CO_2$  است. در این تصاویر مشاهده می‌گردد که اثر خواب ابزار به صورت مشهود، مشابه با مواد با رفتار برشی الاستوپلاستیک مانند فولاد ایجاد شده است [۳۷؛ ۳۸]. در شکل ۹ (ج) و (د) میکروگراف‌های سطوح مربوط به نمونه‌های خنک کاری شده با گاز Ar نمایش داده شده است. در این دو شکل نیز مشاهده می‌گردد ماده در حین برش علاوه بر براده برداری دچار سیلان نیز شده است. این تفسیر با آنالیز فاصله خطوط خواب ابزار با گام پیشروی مشاهده شده در این تصاویر قابل استنباط است. مقدار پیشروی به ازای هر دور ابزار برای حالت مطالعه شده، می‌تواند از حاصل تقسیم سرعت پیشروی بر عده دوران ابزار به دست آید. در اشکال (ج) و (د) در شکل ۹ مقادیر محاسبه شده با فاصله خطوط اثر ابزار تطابق ندارد که می‌تواند علایمی برای سیلان لایه سطحی یا انتقال و بازانتقال این لایه به دمای  $T_g$  تلقی شود. در شکل ۹ (و) سطح PTFE قبل از عملیات ماشین کاری نشان داده شده است که می‌تواند برای مقایسه مفید باشد. مقایسه این تصویر با شکل‌های (ب) و (ج) حاکی از سیلان لایه سطحی ماشین کاری شده است.



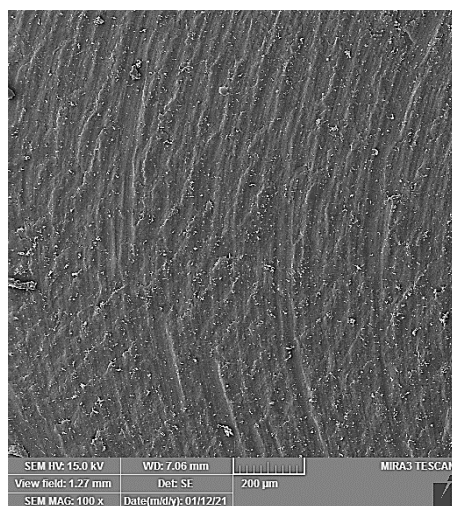
(ب)



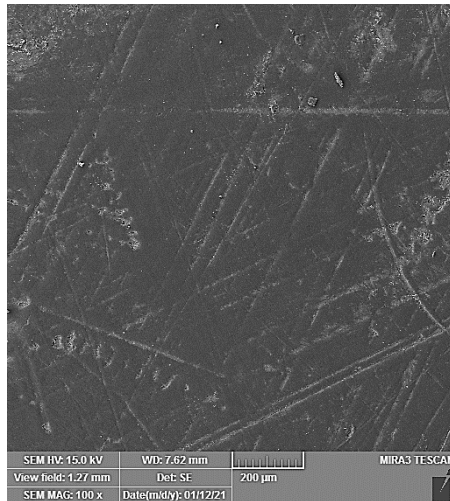
(الف)



(د)



(ج)



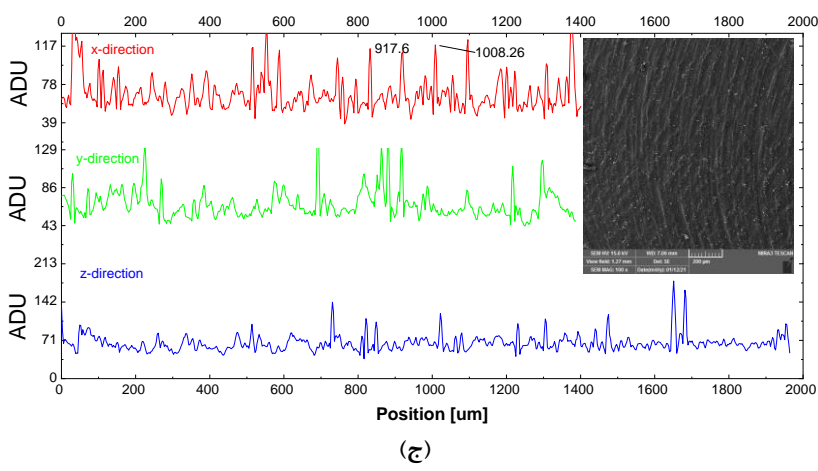
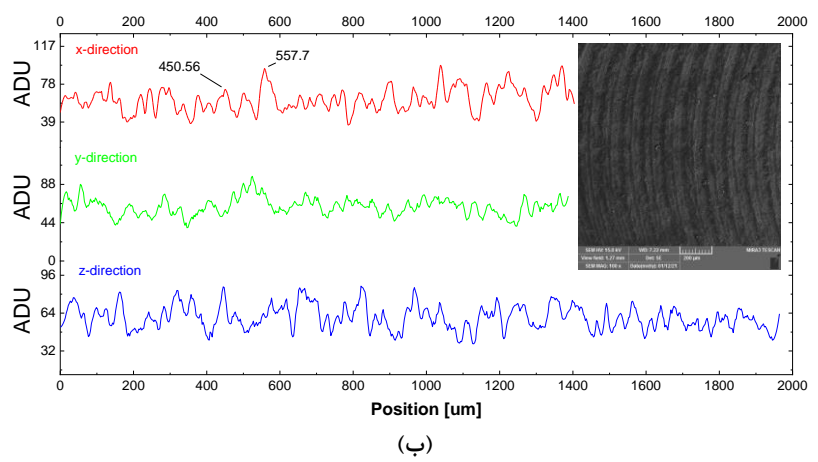
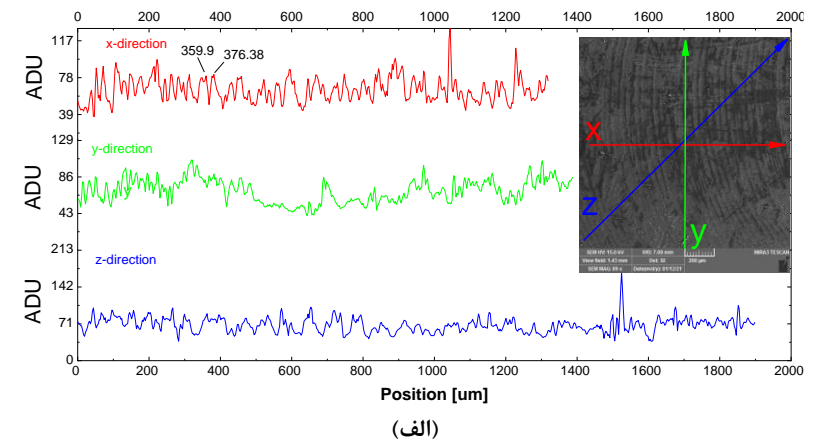
(و)

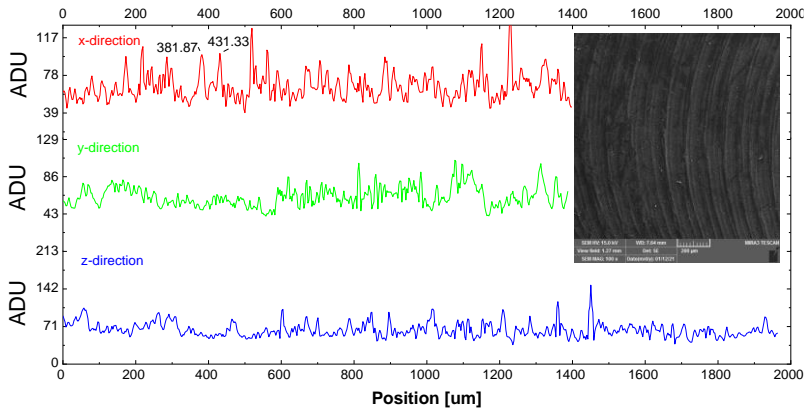
شکل ۹. میکروگراف‌های SEM سطوح با بزرگ‌نمایی 100X. (الف) و (ب) ماشین‌کاری تحت دمش گاز  $CO_2$  و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف)  $F=40 \text{ mm/min}$  و  $V=25.4 \text{ m/min}$  (ب)  $F=160 \text{ mm/min}$  و  $V=15.7 \text{ m/min}$  (ج)  $F=100 \text{ mm/min}$  و  $V=20.1 \text{ m/min}$  (د)  $F=40 \text{ mm/min}$  و  $V=20.1 \text{ m/min}$  (و) سطح خام و ماشین‌کاری

نشده

برای تعمیق تفاسیر فوق پروفیل سطوح هر میکروگراف می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید بررسی شود که در شکل ۱۰ این پروفیل‌ها ترسیم گردیده است. پروفیل‌ها توسط دستگاه SEM در سه راستای نام‌گذاری شده با  $x, y, z$  اندازه‌گیری شده است که جهت این امتدادها در شکل ۱۰ الف مشخص شده است. راستای  $x$  امتداد حرکت پیشروی است که قاعدتاً اگر رفتار برشی الاستوپلاستیک روی دهد باید گام تکرار پستی و بلندی‌های سطح از گام پیشروی ابزار تبعیت نسبی داشته باشد. اگر رفتار نوسانی پروفیل سطح در این راستا، رفتاری نامتعارف و خارج از پیش‌بینی مذکور نشان دهد، اثبات می‌گردد که لایه سطحی دچار سیلان شده یا ارتعاش روی داده است. در پلیمرها ارتعاش به دلیل ضریب میرایی قابل‌توجه آن‌ها غیرمحمول است [۳۷] ولی سیلان ناشی از انتقال و بازانتقالی ترمودینامیکی به  $T_g$  می‌تواند روی دهد. فاصله اثر خطوط ابزار در هر پروفیل با اعداد سیاه درج شده است که موقعیت  $x$  هر اثر را معرفی می‌کند. تفاضل دو عدد معرفی شده برابر با اثر خواب ابزار است که می‌تواند با پیشروی به‌ازای هر دور ابزار مقایسه گردد. آنالیز پروفیل امتداد  $x$  نمونه‌ها نشان داد که فرکانس نوسانی سطوح ماشین‌کاری شده با  $CO_2$  از مقدار پیشروی ابزار برحسب دور تا حدودی تبعیت می‌کند در صورتی که این روند، در مورد گاز Ar مشاهده نمی‌گردد. بدین ترتیب اثر مثبت گاز دی‌اکسیدکربن در تغییر رفتار برشی PTFE به الاستوپلاستیک مجدداً اثبات می‌گردد.



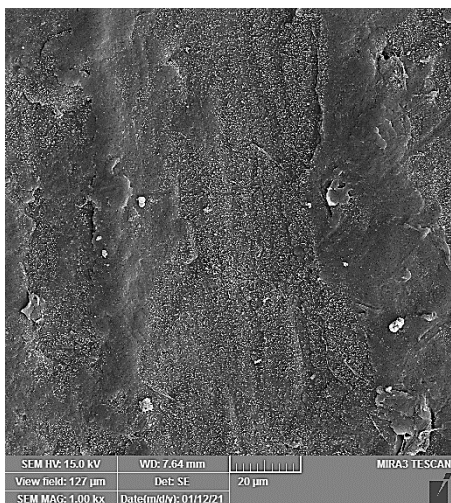




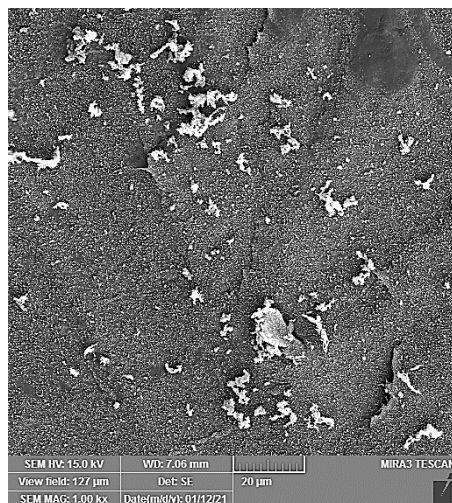
(د)

شکل ۱۰. پروفیل سطوح ماشین کاری شده در راستاهای x (امتداد پیشروی)، y (عمود بر امتداد پیشروی) و z (زاویه  $45^\circ$  با امتداد پیشروی). (الف) و (ب) ماشین کاری تحت دمش گاز  $CO_2$  و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف)  $F=100$  و  $V=20.1$  m/min (ج)  $F=160$  mm/min و  $V=15.7$  m/min (ب)  $F=40$  mm/min و  $V=25.4$  m/min (د)  $F=40$  mm/min و  $V=20.1$  m/min. مقدار پیشروی به ازای هر دور ابزار برای (الف) ۲۰ (ب) ۱۲۸ (ج) ۶۲.۵ و (د) ۲۵  $\mu\text{m}$  می‌باشد.

برای مشاهده عینی پدیده‌های مشروح در فوق، میکروگراف‌هایی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰ برابر توسط SEM تصویربرداری شدند که نتایج حاصل به همراه تصویری از سطح خام نمونه در شکل ۱۱ گزارش شده است. در شکل ۱۱ (الف) که حداقل زبری سطح در بین تمام مراحل انجام آزمایش‌ها را دارد، تکه‌هایی روی سطح مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد به دلیل نرخ خنک‌کاری بالا با دمش گاز  $CO_2$ ، زمان برای انجماد لایه ویسکوز فراهم نگردیده است و بخش از براده‌ها که دمای آن‌ها به بالاتر از  $T_g$  رسیده است، به سرعت منجمد می‌گردد و فرصت جدایش کامل از سطح را پیدا نکرده‌اند. در شکل (ب) نیز که مربوط به خنک‌کاری با  $CO_2$  با شرایط ماشین کاری متفاوت است این تکه‌ها با تعداد بیشتر و با سایز کوچک‌تر مشاهده می‌شوند. در نمونه‌های مربوط به گاز Ar که در شکل‌های (ج) و (د) نشان داده شده‌اند این تکه‌ها وجود ندارند ولی اعوجاج سطح و پستی‌بلندی‌ها بیانگر انتقال و بازگشت دمای سطح به  $T_g$  است. بدیهی است این اعوجاج‌های ناشی از انقباض حین انجماد لایه، تأثیر قابل‌ذکری بر صافی سطح دارد و می‌تواند موجب افزایش زبری سطح گردد. این نتایج مؤید تحلیل صورت گرفته در مورد پروفیل‌های سطح هستند.



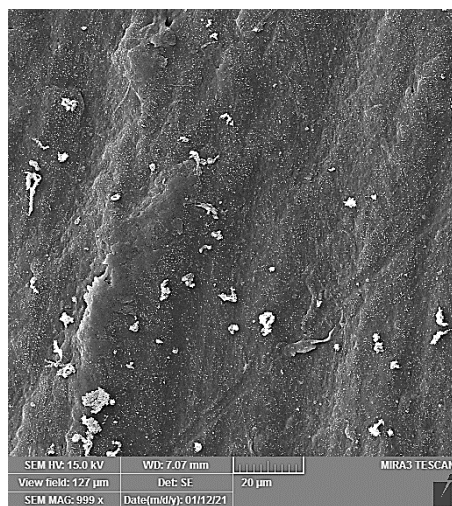
(ب)



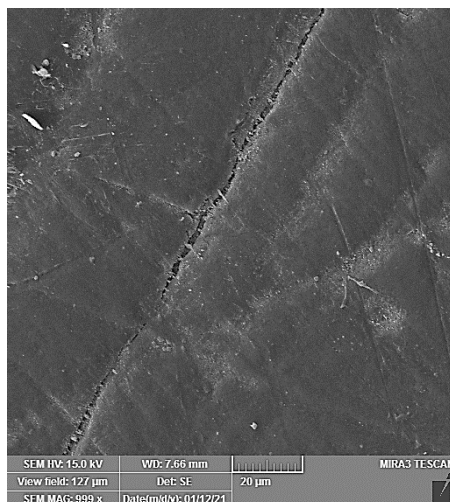
(الف)



(د)



(ج)

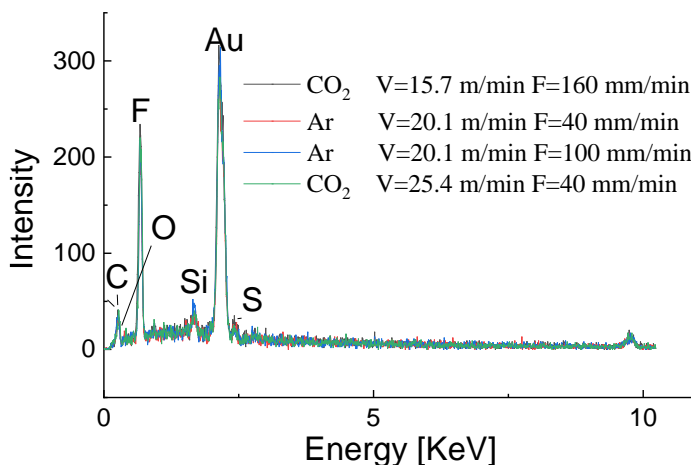


(و)

شکل ۱۱. میکروگراف‌های SEM سطوح با بزرگ‌نمایی 1000X. (الف) و (ب) ماشین‌کاری تحت دمش گاز CO<sub>2</sub> و (ج) و (د) تحت گاز Ar. (الف) V=25.4 m/min و F=40 mm/min (ب) V=15.7 m/min و F=160 mm/min (ج) V=20.1 m/min و F=100 mm/min (د) V=20.1 m/min و F=40 mm/min (و) سطح خام و ماشین‌کاری نشده

### آنالیز عنصری سطوح

شکل ۱۰ نمودار حاصل از نتایج EDX نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در جدول ۳ نتایج آنالیز عنصری انجام شده توسط EDX برحسب درصد وزنی عناصر حاضر در سطح درج شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود پنج عنصر کربن، اکسیژن، فلئورن، سیلیسیم و گوگرد در تمامی سطوح مطالعه شده وجود دارند. در این بین، سیلیسیم و گوگرد می‌توانند ناشی از آلودگی‌های محیطی در حین ماشین‌کاری یا انتقال آلودگی از طریق گاز باشند؛ زیرا گازهای استفاده شده از نظر خلوص در رده گازهای صنعتی است. عناصر مهم تشکیل‌دهنده PTFE شامل کربن و فلئورن می‌باشند که می‌توانند در حضور گاز اکسیدشده یا تشکیل گروه‌های عاملی جدید را بدهند که در آن صورت مقداری اکسیژن نیز در سطح ظاهر خواهد شد [۳۹؛ ۴۰]. مشاهده می‌شود استفاده از گاز فعال دی‌اکسیدکربن توانسته است از اکسیداسیون فلئورن تا حد قابل‌توجهی جلوگیری کند و مقدار اکسیژن در سطح که معرف گروه‌های اکسیدشده یا عامل‌دار در سطح می‌باشند، در این نمونه‌ها به مراتب کمتر از حالت ماشین‌کاری تحت گاز آرگون است. این یافته نشان می‌دهد اگرچه گاز آرگون در زمره گازهای نجیب دسته‌بندی می‌شود و کم‌ترین اثر واکنشی با سطوح را دارد ولی به دلیل بالا رفتن دما و انتقال لایه سطحی به دمایی بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن، گروه‌های عاملی می‌توانند در سطح ظاهر گردند. این واکنش برخلاف انتظار اولیه است که ناتوانی گاز آرگون در سطح را می‌توان به خلوص پایین آن نیز نسبت داد. به‌عنوان یک نتیجه کلی گاز دی‌اکسیدکربن از نظر حفاظت شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده سطح نیز موفق‌تر از گاز آرگون عمل می‌کند.



شکل ۱۲. طیف‌نگاری نمونه‌ها توسط آنالیز EDX

جدول ۳. نتایج آنالیز EDX از سطح نمونه‌ها بر حسب درصد وزنی عناصر حاضر در سطح

گاز	CO <sub>2</sub>		Ar	
خنک‌کننده				
شرایط ماشین کاری	V=25.4 m/min F=40 mm/min	V=15.7 m/min F=160 mm/min	V=20.1 m/min F=100 mm/min	V=20.1 m/min F=40 mm/min
Ra (μm)	0.2	2.2	1.2	2.06
کربن (C)	33.75%	32.14%	30.2%	33.72%
اکسیژن (O)	3.27%	3.28%	6.55%	4.05%
فلوئورین (F)	54.46%	56.66%	53.05%	52.82%
سیلیسیم (Si)	3.71%	3.2%	4.5%	3.7%
گوگرد (S)	4.81%	4.9%	5.7%	5.2%

### نتیجه‌گیری

مطالعه تجربی ماشین کاری PTFE تحت خنک‌کاری گاز نجیب آرگون و گاز فعال دی‌اکسیدکربن با در نظر گرفتن سرعت برشی و پیشروی به‌عنوان متغیرهای فرایند انجام شد. تأثیر گازها بر کنترل دمای موضع ماشین کاری توسط فیلم‌برداری حرارتی ارزیابی گردید. زبری سطوح پس از عملیات اندازه‌گیری شد و سطوح توسط میکروسکوپ-های نوری و الکترونی روبشی مورد بازرسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که: گاز دی‌اکسیدکربن می‌تواند دمای موضع ماشین کاری را به دمایی در حدود  $40^{\circ}\text{C}$  - تقلیل دهد و بدین ترتیب موجب تغییر رفتار ماشین کاری PTFE از ویسکوالاستیک به الاستوپلاستیک شود. با این انتقال رفتار، صافی سطح می‌تواند تا حدود  $Ra=0.2\ \mu\text{m}$  کاهش یابد و روند تغییرات صافی سطح با تغییرات سرعت برشی و پیشروی منطبق بر مواد الاستوپلاستیک قابل پیش‌بینی باشد. این در حالی است که گاز آرگون تنها می‌تواند دما را تا حدود  $20^{\circ}\text{C}$  کاهش دهد که تأثیر قابل ذکر بر رفتار ماشین کاری PTFE ندارد.

بررسی‌های میکروسکوپی نشان داد به کارگیری گاز آرگون با نبود توانایی مطلوب در انتقال حرارت و ایجاد نشدن تغییر در رفتار برشی PTFE می‌تواند موجب بالا رفتن دما در لایه مرزی بین ابزار و قطعه به دماهای بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن گردد و در نتیجه موجب سیلان در این لایه شود. در انجماد مجدد این لایه اعوجاج‌هایی ایجاد می‌گردد و بدین طریق زبری سطح افزایش یابد. نتیجه مهم دیگر این پدیده، ظهور ترک‌هایی در سطح ماشین‌کاری شده است که می‌توانند در زمان بارگذاری رشد کنند و شکست سریع را موجب شوند. این ترک‌ها در سطوحی که با دمش گاز دی‌اکسیدکربن ماشین‌کاری شده بودند، مشاهده نگردید.

آنالیز عنصری سطح نمونه‌ها نشان داد که استفاده از گاز دی‌اکسیدکربن در جلوگیری از تشکیل گروه‌های عاملی سطحی موفق‌تر از گاز آرگون عمل می‌کند.

## References

- [1] Dhanumalayan, E., & Joshi, G. M. (2018). Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 1(2), 247-268. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0023-8>
- [2] Dupont. (2021). *Teflon PTFE fluoropolymer resin*. Rjchase. [http://www.rjchase.com/ptfe\\_handbook.pdf](http://www.rjchase.com/ptfe_handbook.pdf)
- [3] Bijwe, J., & Sharma, M. (2012). Nano and Micro PTFE for Surface Lubrication of Carbon Fabric Reinforced Polyethersulphone Composites. In *Tribology of Nanocomposites* (19-39). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33882-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33882-3_2)
- [4] Feng, Y., Xiong, T., Jiang, S., Liu, S., & Hou, H. (2016). Mechanical properties and chemical resistance of electrospun polytetrafluoroethylene fibres. *RSC advances*, 6(29), 24250-24256. <https://doi.org/10.1039/C5RA27676D>
- [5] Khedkar, J., Negulescu, I., & Meletis, E. I. (2002). Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*, 252(5), 361-369. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00859-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00859-6)
- [6] Li, J., & Ran, Y. (2010). Evaluation of the friction and wear properties of PTFE composites filled with glass and carbon fiber. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 41(2), 115-118. <https://doi.org/10.1002/mawe.200900545>
- [7] Khoddamzadeh, A., Liu, R., & Wu, X. (2009). Novel polytetrafluoroethylene (PTFE) composites with newly developed Tribaloy alloy additive for sliding bearings. *Wear*, 266(7), 646-657. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.08.007>
- [8] Cheng, X., Xue, Y., & Xie, C. (2003). Tribological investigation of PTFE composite filled with lead and rare earths-modified glass fiber. *Materials Letters*, 57(16), 2553-2557. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01310-1](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01310-1)
- [9] Unal, H., Kurtulus, E., Mimaroglu, A., & Aydin, M. (2010). Tribological Performance of PTFE Bronze Filled Composites under Wide Range of Application Conditions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(14), 2184-2191. <https://doi.org/10.1177/0731684409345617>
- [10] Younse, P., Alwis, T. d., Backes, P., & Trebi-Ollennu, A. (2012, March 3-10 ). *Sample sealing approaches for Mars Sample Return caching*. 2012 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6187048>
- [11] Fetecau, C., & Stan, F. (2012). Study of cutting force and surface roughness in the turning of polytetrafluoroethylene composites with a polycrystalline diamond tool. *Measurement*, 45(6), 1367-1379. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.03.030>

- [12] Feng, D., Shen, M.-x., Peng, X.-d., & Meng, X.-k. (2017). Surface roughness effect on the friction and wear behaviour of acrylonitrile-butadiene rubber (NBR) under oil lubrication. *Tribology Letters*, 65(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0793-5>
- [13] Hecht, K., Messerschmidt, F., Pfeifer, P., Dittmeyer, R., Kraushaar-Czarnetzki, B., & Hecht, S. (2013). Surface roughness of machined microchannels and its effect on multiphase boundary conditions. *Chemical Engineering Journal*, 227, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.127>
- [14] Aldwell, B., O'Mahony, J., & O'Donnell, G. E. (2015). The Effect of Workpiece Cooling on the Machining of Biomedical Grade Polymers. *Procedia CIRP*, 33, 305-310. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.058>
- [15] Campos Rubio, J. C., Panzera, T. H., & Scarpa, F. (2015). Machining behaviour of three high-performance engineering plastics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(1), 28-37. <https://doi.org/10.1177/0954405414525142>
- [16] Kakinuma, Y., Kidani, S., & Aoyama, T. (2012). Ultra-precision cryogenic machining of viscoelastic polymers. *CIRP Annals*, 61(1), 79-82. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.039>
- [17] Amini, S., Baraheni, M., & Moeini Afzal, M. (2018). Statistical study of the effect of various machining parameters on delamination in drilling of carbon fiber reinforced composites. *Journal of Science and Technology of Composites*, 5(1), 41-50. <https://doi.org/10.22068/jstc.2018.28562>
- [18] Azad Hassan, M., Shakouri, E., & Saraeian, P. (2017). Investigation of Surface Roughness in Turning of Epoxy-Glass Composite Tubes. *Modares Mechanical Engineering*, 16(12), 629-636 .
- [19] Ghosh, R., Knopf, J. A., Gibson, D. J., Mebrahtu, T., & Currie, G. (2007, September). *Cryogenic machining of polymeric biomaterials: An intraocular lens case study*. Medical Device Materials IV: Proceedings of the Materials & Processes for Medical Devices Conference 2007, USA. [https://www.researchgate.net/publication/272494251\\_Cryogenic\\_Machining\\_of\\_Polymeric\\_Biomaterials\\_An\\_Intraocular\\_Lens\\_Case\\_Study?enrichId=rgreq-1ae115a3a1583e145610b5333098ce34-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI3MjQ5NDI1MTtBUzoxOTg4NzQ1NzM2MTEwMDhAMTQyNDQyNjgwMTY0OA%3D%3D&el=1\\_x\\_2&esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/272494251_Cryogenic_Machining_of_Polymeric_Biomaterials_An_Intraocular_Lens_Case_Study?enrichId=rgreq-1ae115a3a1583e145610b5333098ce34-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI3MjQ5NDI1MTtBUzoxOTg4NzQ1NzM2MTEwMDhAMTQyNDQyNjgwMTY0OA%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf)
- [20] Morkavuk, S., Köklü, U., Bağcı, M., & Gemi, L. (2018). Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 147, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.024>
- [21] Palanikumar, K., & Paulo Davim, J. (2007). Mathematical model to predict tool wear on the machining of glass fibre reinforced plastic composites. *Materials & Design*, 28(7), 2008-2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.06.018>
- [22] Petropoulos, G., Mata, F., & Davim, J. P. (2008). Statistical study of surface roughness in turning of peek composites. *Materials & Design*, 29(1), 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.11.005>
- [23] Xiao, K. Q., & Zhang, L. C. (2002). The role of viscous deformation in the machining of polymers. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(11), 2317-2336. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00178-9)

- [24] Turner, J., Scaife, R. J., & El-Dessouky, H. M. (2015). Effect of machining coolant on integrity of CFRP composites. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1(1), 54-60. <https://doi.org/10.1179/2055035914Y.0000000008>
- [25] Di Lorenzo, S., Di Paola, M., La Mantia, F. P., & Pirrotta, A. (2017). Non-linear viscoelastic behavior of polymer melts interpreted by fractional viscoelastic model. *Meccanica*, 52(8), 1843-1850. <https://doi.org/10.1007/s11012-016-0526-8>
- [26] Tan, B., & Stephens, L. S. (2019). Evaluation of viscoelastic characteristics of PTFE-Based materials. *Tribology International*, 140, 105870. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105870>
- [27] Wang, H., Sun, J., Li, J., Lu, L., & Li, N. (2016). Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9-12), 1517-1525. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7479-2>
- [28] Dandekar, C. R., & Shin, Y. C. (2012). Modeling of machining of composite materials: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, 102-121. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.01.006>
- [29] Nicholson, J. (2017). *The chemistry of polymers*. Royal Society of Chemistry. <https://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-78262-832-3>
- [30] Calleja, G., Jourdan, A., Ameduri, B., & Habas, J.-P. (2013). Where is the glass transition temperature of poly(tetrafluoroethylene)? A new approach by dynamic rheometry and mechanical tests. *European Polymer Journal*, 49(8), 2214-2222. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.04.028>
- [31] Natarajan, E., Kaviarasan, V., Lim, W. H., Tiang, S. S., Parasuraman, S., & Elango, S. (2020). Non-dominated sorting modified teaching-learning-based optimization for multi-objective machining of polytetrafluoroethylene (PTFE). *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(4), 911-935. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01486-9>
- [32] Tomkovic, T., & Hatzikiriakos, S. G. (2020). Rheology and processing of polytetrafluoroethylene (PTFE) paste. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(9), 1852-1865. <https://doi.org/10.1002/cjce.23816>
- [33] Theiler, G., Hübner, W., Gradt, T., Klein, P., & Friedrich, K. (2002). Friction and wear of PTFE composites at cryogenic temperatures. Extended version of the paper presented at the 2nd World Tribology Congress, Vienna, 3-7 September 2001. *Tribology International*, 35(7), 449-458. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00035-X)
- [34] Knight, W. A., & Boothroyd, G. (2005). *Fundamentals of metal machining and machine tools*. CRC Press. <https://www.routledge.com/Fundamentals-of-Metal-Machining-and-Machine-Tools/Knight-Boothroyd/p/book/9781574446593>
- [35] Karimzad Ghavidel, A., Navidfar, A., Shabgard, M., & Azdast, T. (2016). Role of CO2 laser cutting conditions on anisotropic properties of nanocomposite contain carbon nanotubes. *Journal of Laser Applications*, 28(3), 032006. <https://doi.org/10.2351/1.4947491>
- [36] Karimzad Ghavidel, A., Shabgard, M., & Biglari, H. (2016). Microscopic and mechanical properties of semi-crystalline and amorphous polymeric parts produced by laser cutting. *Journal of applied polymer science*, 133(44). <https://doi.org/10.1002/app.44179>



- [37] Chung, D. (2001). Materials for vibration damping. *Journal of materials science*, 36(24), 5733-5737. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1012999616049>
- [38] Lalwani, D. I., Mehta, N. K., & Jain, P. K. (2008). Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1), 167-179. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.018>
- [39] Grisorio, R., Suranna, G. P., Mastorilli, P., & Nobile, C. F. (2007). Insight into the Role of Oxidation in the Thermally Induced Green Band in Fluorene-Based Systems. *Advanced Functional Materials*, 17(4), 538-548. <https://doi.org/10.1002/adfm.200600083>
- [40] Rivas, F. J., Beltrán, F. J., Gimeno, O., & Carbajo, M. (2006). Fluorene Oxidation by Coupling of Ozone, Radiation, and Semiconductors: A Mathematical Approach to the Kinetics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(1), 166-174. <https://doi.org/10.1021/ie050781i>