

## اثر سوخت جی پی ۴ بر اصطکاک لاستیک نیتریل و آلومینیوم با زبری‌های مختلف

سیده مهدیه عمرانی<sup>۱</sup>، محمدرضا پورحسینی<sup>\*</sup>، مهدی رزاقی کاشانی<sup>۲</sup>  
<sup>۱</sup> تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مواد و فناوری‌های ساخت  
<sup>۲</sup> تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر

### چکیده

یکی از مشکلات استفاده از لاستیک‌ها در صنایع مختلف، ایجاد تنش سطحی در سطح لاستیک است که منجر به ترک سطحی و شکست لاستیک شده، عمر آن را کاهش می‌دهد. این تنش‌ها به هنگام تماس قسمت لاستیکی با سطح فلزی و اصطکاک این دو سطح ایجاد می‌شوند. ناهمواری سطح، ترکیب آمیزه لاستیکی و عوامل محیطی، شرایط آزمون و ... بر اصطکاک لاستیک فلز اثر می‌گذارند. ناهمواری سطح، نقش مهمی در سُرش دو سطح در کنار یکدیگر ایفا کرده، عمدتاً رفتار اصطکاکی را کنترل می‌کند. از طرفی اثر ناهمواری بر ضریب اصطکاک با استفاده از روان‌کننده مناسب قابل کنترل است. در پژوهش حاضر با توجه به کاربرد سوخت جی پی ۴ (JP-4) در صنایع هوایی، اثر روان کاری جی پی ۴ بر میزان کاهش ضریب اصطکاک سُرشی میان لاستیک نیتریل و سطح آلومینیوم با زبری‌های مختلف بررسی شد. نتایج تجربی نشان داد ضریب اصطکاک، وابستگی خوبی با متغیر متوسط ناهمواری سطح ( $R_a$ ) دارد. با اعمال سوخت جی پی ۴ به عنوان روان‌کننده، ضریب اصطکاک حدود ۷۵٪ کاهش یافت. همچنین جی پی ۴، تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به ناهمواری سطح را از روند کاهشی در حالت خشک به روند افزایشی در حالت روان کاری تغییر داد.

### واژه‌های کلیدی

سوخت جی پی ۴  
ناهمواری سطح  
سازوکار اصطکاک  
لاستیک نیتریل  
آلومینیوم

\*مسئول مکاتبات:

MRP\_POLYCRC@MUT.ac.ir

## ۱ مقدمه

بوده است، زیرا حتی تغییرات برآمدگی‌های میکرومتری سطوح صیقلی بر مقدار اصطکاک تأثیرگذارند [۷]. محققان بسیاری برای مطالعه اثر بافت سطح مواد بر روی اصطکاک در تلاش هستند. در منابع، مشخصه‌های آماری ناهمواری مختلفی همچون  $R_z$ ،  $R_q$ ،  $R_a$  و ... برای توصیف بافت سطح به کار می‌روند. معمولاً متغیر ناهمواری سطح  $R_a$  برای توصیف زبری سطوح استفاده می‌شود. در عین حال مطالعات بسیاری به منظور بررسی اثر سایر متغیرهای زبری سطح بر اصطکاک انجام شده است [۸-۱۰].

روش دیگر کنترل اصطکاک، بررسی اثر روان‌کننده‌ها بر ضریب اصطکاک و سازوکارهای تأثیرگذار بر آن است. هدف اصلی از کاربرد روان‌کننده‌ها کاهش اصطکاک ناشی از تماس دو سطح ناهموار همانند سطوح فلز-فلز، لاستیک-فلز و ... است. روان‌کننده‌های مایع با ایجاد لایه سیال مرزی سبب کاهش سطح واقعی تماس و ضریب اصطکاک می‌شوند. انتخاب روان‌کننده مناسب به تجهیزات و شرایط عملیاتی بستگی دارد [۱۱]. حلال‌ها و سوخت‌ها معمول در صنایع خودرویی، هوایی، شیمیایی و ... در مجاورت با بخش‌های لاستیکی و فلزی هستند و همچون دیگر مایعات دارای خاصیت روان‌کاری هستند. از این رو استفاده از آن‌ها به عنوان روان‌کننده امکان‌پذیر است. سوخت جی پی ۴ در سال ۱۹۵۱ توسط دولت ایالات متحده مطابق استاندارد MIL-DTL-5624 به عنوان سوخت هوایی استاندارد ناتو عرضه شد. جی پی ۴، برشی نفتی با ساختار متنوع مولکولی شامل هیدروکربن‌های خطی و آروماتیک است و از مخلوط ۵۰-۵۰ نفت و بنزین به دست می‌آید. این سوخت نیاز نیروی هوایی ایالات متحده را در نیمه دوم قرن بیستم مرتفع کرده، در حال حاضر سوخت معمول در صنایع هوایی آن کشور است [۱۲].

هو و دین [۱۳] تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص رابطه میان اصطکاک و مکان‌نگاری (Topography) سطح در حضور روان‌کننده‌های مختلف انجام داده‌اند. آن‌ها در گزارش‌های خود بیان کرده‌اند، لایه مرزی

سوده‌شناسی (Tribology)، علمی بین‌رشته‌ای و شامل سه موضوع کلیدی اصطکاک، سایش و روان‌کاری است و از مهندسی مکانیک، مهندسی مواد، مهندسی شیمی، مهندسی پلیمر و علوم دیگر بهره می‌برد [۱]. اصطکاک، مقاومت ناشی از حرکت نسبی دو جسم تماس نسبت به یکدیگر است و بر مبنای سه سازوکار اصلی درهم‌گیر کردن مکانیکی، چسبندگی و اتلاف، ایجاد و کنترل می‌شود. دو سازوکار چسبندگی و اتلاف بر اصطکاک لاستیک به سبب خاصیت ویسکوالاستیک آن حاکم هستند.

لاستیک نیتریل بوتادی ان (Nitrile Butadiene Rubber (NBR)) قابلیت جذب ارتعاشات انرژی، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر روغن قابل توجهی دارد و در طراحی و ساخت انواع شیلنگ‌ها، واشرهای حلقه‌ای، مخازن سوخت و ... کاربرد دارد. لاستیک‌ها در اغلب صنایع همچون بسته‌بندی، حمل و نقل، شیمیایی و هوافضا در تماس با سطوح دیگر به ویژه فلزات هستند [۲]. در این موارد تنش اصطکاک در سطح قطعات لاستیکی هنگام نصب و تماس با سطوح فلزی رخ می‌دهد. این تنش‌ها سبب تسریع ایجاد و رشد ترک‌ها و کاهش عمر قطعه می‌شوند. از طرف دیگر اصطکاک بین لاستیک-فلز بر رفتار دینامیکی، هزینه، گرمای اتلافی، سایش و تشکیل لایه ذرات انتقال نیز اثر می‌گذارد [۳]. از این رو دستیابی به راهکاری برای کنترل و کاهش اصطکاک از دغدغه‌های محققان این عرصه است. ناهمواری سطح، سطح تماس واقعی، بار عمودی، سرعت سُرش، دما، روان‌کننده‌ها و خواص مواد از عوامل مهم کنترل اصطکاک هستند. تحقیقات قابل توجهی به منظور مطالعه اثر این متغیرها بر ضریب اصطکاک با استفاده از روش‌های تجربی مختلف انجام شده است [۴، ۵].

در این میان ناهمواری سطح اثر بزرگی بر پدیده‌های فیزیکی مهمی همچون اصطکاک، سایش و مکانیک تماس دارد [۶]. یکی از تلاش‌های اولیه برای شناخت پدیده اصطکاک، ایجاد ارتباط میان آن با ناهمواری سطح



شكل ۱ تصويری از نمونه لاستيك نيتريل

وزنی اکریلونیتریل و چگالی ۰/۹۷ گرم بر سانتی مترمکعب محصول فرانسه با کد مشخصه Krynac NBR 27KNB استفاده شد. آمیزه تهیه شده از این پایه لاستیکی حاوی سامانه پختی مشتمل بر ۱/۸ جزء وزنی گوگرد و ۱/۸ جزء وزنی شتاب دهنده سولفون آمیدی همراه با ۸۰ جزء وزنی دوده ۶۶۰ بود. نمونه‌های اصطکاک این آمیزه مطابق نتایج رثومتري در شرایط بهینه پخت ۱۵۰ درجه سانتی گراد به مدت نیم ساعت مطابق شکل ۱ تهیه شد. سطح آلومینیوم مورد نیاز از صفحات آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به شکل دایره‌ای با قطر ۳۷ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شدند. اندازه‌گیری سختی لاستیک نیتریل و صفحات آلومینیوم در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه سختی سنج مدل EMCO M4U240 انجام شد. مشخصات لاستیک نیتریل و آلومینیوم مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. از سوخت جی پی ۴ به عنوان روان کننده پایه نفتی (تولید بلژیک) در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد، استفاده شد.

روان کننده پوشش یکنواخت‌تری روی سطوح صاف تشکیل می‌دهد و اصطکاک را بیشتر می‌کاهد. رسپ و ویچرن [۱۴] اثر مکان‌نگاری سطح بر اصطکاک را با استفاده از انواع مختلف سطوح مطالعه کرده‌اند. آن‌ها سطح نمونه‌ها را در جهت موازی و عمود بر راستای سُرش خراشیدند و دریافتند که اثر شدت ناهمواری و روان کاری بیش از اثر جهت ناهمواری است. فنگ [۱۵] و همکارانش طی تحقیقات خود دریافتند، ناهمواری سطح تأثیر ویژه‌ای بر رژیم روان کاری و رفتارهای سوده‌شناسی لاستیک نیتریل دارد. هم چنین آسیب سطحی لاستیک به میزان اتصال ناهمواری‌های سطح جسم سخت تر و رژیم روانکاری بستگی دارد.

با وجود تمام این بررسی‌ها، همبستگی میان متغیرهای ناهمواری و اصطکاک لاستیک-فلز در شرایط خشک و روان کاری با سایر مواد، نیازمند بررسی دقیق‌تری است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر روان کاری سوخت جی پی ۴ بر اصطکاک میان لاستیک نیتریل و سطوح آلومینیوم با زبری‌های مختلف است. سازوکار حاکم بر اصطکاک و همبستگی و رابطه اثر سوخت روان کننده با میزان زبری سطح نیز از دیگر مواردی است که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲ تجربی

### ۲-۱ مواد

در این تحقیق، از لاستیک نیتریل (NBR) با ۳۳ درصد

جدول ۱ خواص مکانیکی لاستیک نیتریل و فلز آلومینیوم

خاصیت	لاستیک نیتریل	فلز آلومینیوم
سختی	۷۶ (Shore A)	۷۵(HB)
مدول الاستیک	۱۴/۱ Mpa (۲۰°C و ۰/۱)	۷۲ Gpa
استحکام کششی	۱۶/۸ Mpa	۳۰۰ Mpa

## ۲-۲ دستگاه‌ها

پروفیل‌های سه‌بعدی (3D) سطوح با استفاده از دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی AFM-DME مدل DS 95-200-E شرکت DME NanoTechnologie GmbH ساخت آلمان به دست آمد و با استفاده از نرم‌افزار دی‌جیون (Gwdiggion Software) تحلیل شد. دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VEGA3 شرکت TESCAN ساخت جمهوری چک برای تحلیل سطوح لاستیک و بررسی تشکیل فیلم انتقال استفاده شد. برای بررسی اصطکاک از دستگاه آزمون اصطکاک پلیمرها در آزمایشگاه فیزیک پلیمرها دانشگاه تربیت مدرس ساخت ایران استفاده شد. در این آزمایش، اصطکاک سُرش‌ی نمونه لاستیک نیتریل بر روی صفحات آلومینیومی اندازه‌گیری شد [۱۶].

## ۲-۳ روش‌ها

در این مطالعه، صفحات آلومینیومی با استفاده از کاغذهای سنباده سیلیکون کاربید (SiC) در پنج اندازه مختلف از P36 تا P2500 به صورت یک‌سویه پرداخت شدند. هرچه عدد کاغذ سنباده افزایش می‌یابد، سنباده نرم‌تر شده، سطح صیقلی‌تر می‌شود. متغیرهای ناهمواری صفحات آلومینیومی با استفاده از پروفیلومتر نوری قبل از هر آزمون در جهت سُرش ثبت شد. بعد از انجام آزمون، با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (Atomic Force Microscopy (AFM)) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope (SEM)) به ترتیب، خواص صفحات آلومینوم و سطح لاستیک نیتریل مشخص شد. آزمایش اصطکاک بر روی کلیه سطوح آلومینیومی با ناهمواری سطح متفاوت در نیروی عمودی ۲۰ کیلوگرم و سرعت سُرش ۰/۶۷ متربرثانه (۳۵۰ rpm) اندازه‌گیری شد. این آزمون یک بار تحت شرایط محیطی خشک و بار دیگر در حضور سوخت جی‌پی‌۴ انجام شد. آزمایش اصطکاک به طور خاص برای درک سازوکارهای مختلف اصطکاک، اتلاف، چسبندگی و درگیری‌های فیزیکی مواد پلیمری و نیز اثر سوخت جی‌پی‌۴ بر این سازوکارها انجام شد. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، آزمون اصطکاک برای هر

سطح پنج بار تکرار شد. نخست آزمون خشک و پس از آن در حضور جی‌پی‌۴ به منظور جلوگیری از هرگونه تمیز کردن اضافی صفحات آلومینیوم و عدم تغییرات در ناهمواری سطوح صفحات آلومینیوم انجام شد.

## ۳ نتایج و بحث

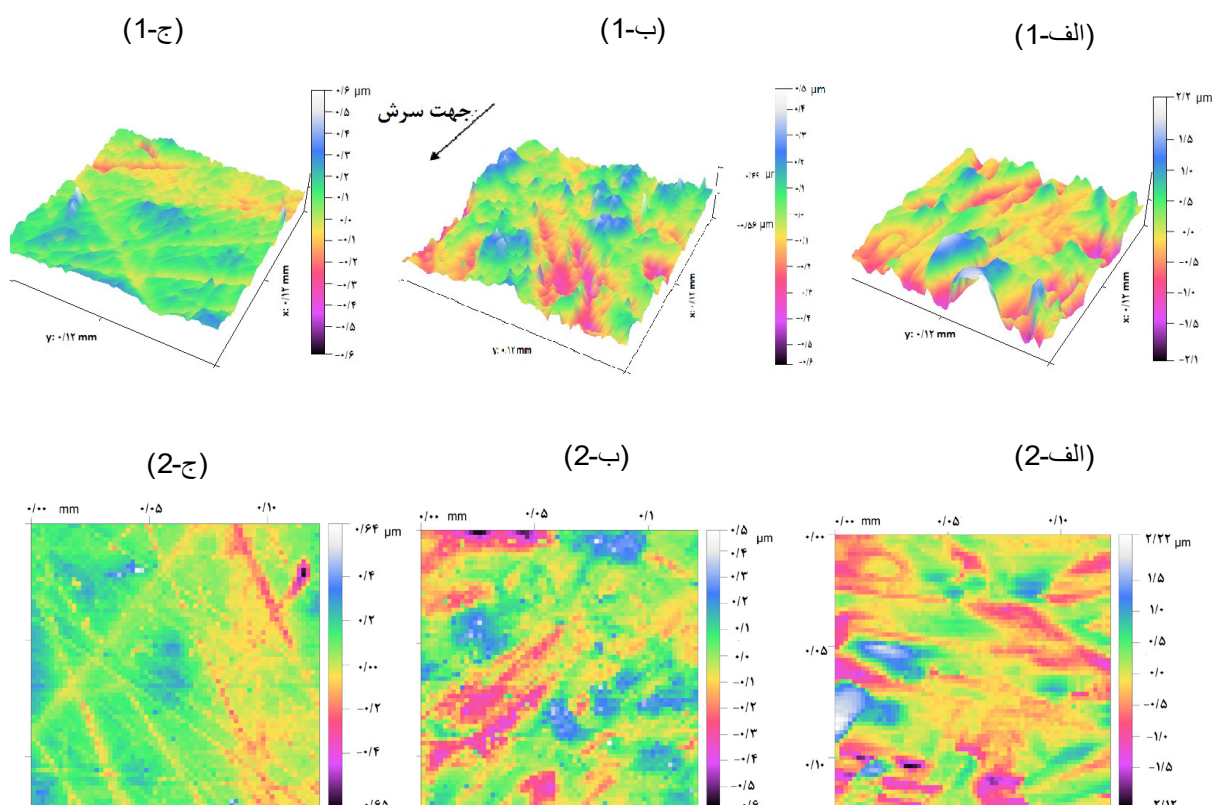
متغیرهای ناهمواری سطوح آلومینیوم در جدول ۲ معرفی شده‌اند [۱۷]. شکل ۲ ناهمواری سطوح آلومینوم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش زبری سطح، اندازه برآمدگی سطوح نیز زیاد می‌شود.

شکل ۳، تغییرات ضریب اصطکاک با زمان به هنگام سُرش لاستیک نیتریل بر روی صفحات آلومینیوم با ناهمواری سطح مختلف را نشان می‌دهد.  $R_a$  برای سطوح از ۰/۰۵ تا ۰/۵۸ میکرومتر متغیر بود. در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک به هنگام تغییر از اصطکاک ایستایی به اصطکاک دینامیکی، پس از رسیدن به قله به تدریج کاهش یافته، به مقداری پایا می‌رسد و پس از آن تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. در شکل ۳-الف در شرایط خشک برای سطح با  $R_a$  برابر ۰/۵۸ میکرومتر (P36)، ضریب اصطکاک پایا حدود ۰/۸ و برای سطح با  $R_a$  برابر ۰/۰۵۵ میکرومتر (P۲۵۰۰)، ضریب اصطکاک پایا حدود ۱ است. این امر نشان‌دهنده این است که برای سطوح صاف همانند آلومینیوم، با افزایش متغیر ناهمواری سطح  $R_a$ ، در شرایط خشک ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زبری سطح، اصطکاک روندی کاهشی دارد و فاصله میان اصطکاک ایستایی (قله) و سُرش (حالت پایا) کم‌تر شده است، به طوری که در سطح بسیار صیقلی، مشاهده نمی‌شود. مشاهده قله نشان از وجود سازوکار اصطکاک چسبندگی در سُرش است که مشاهده می‌شود با افزایش زبری سطح اثر سازوکار آن کم شده است.

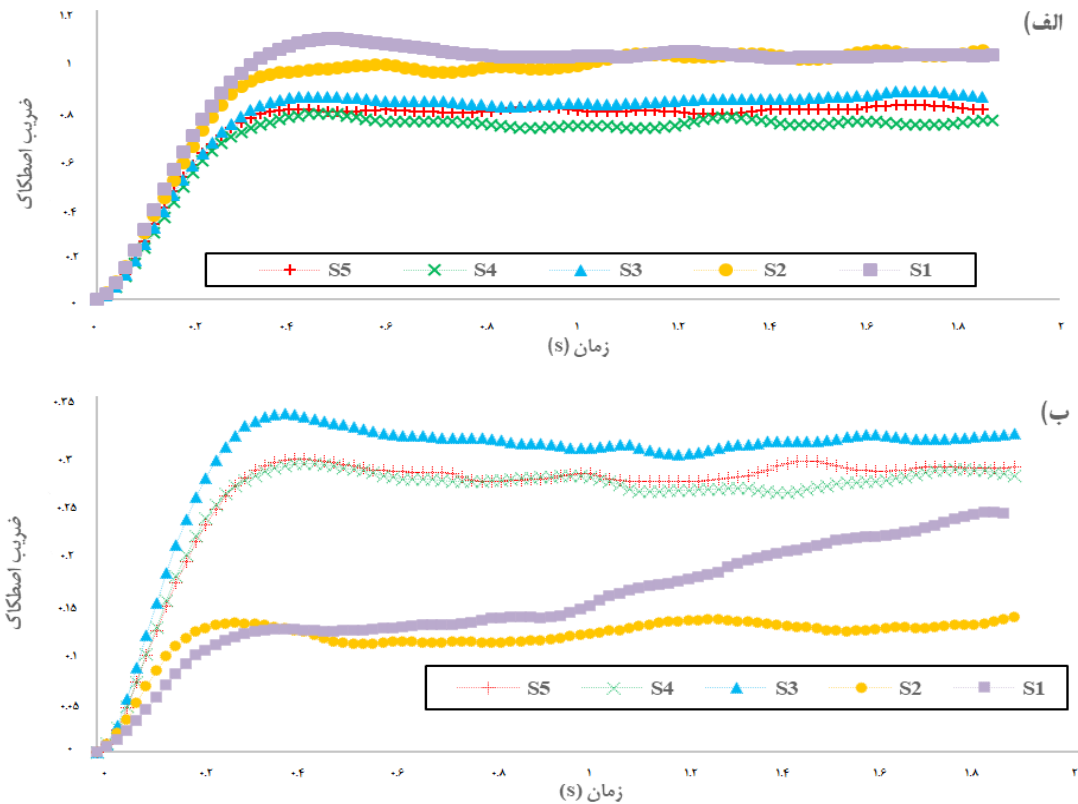
در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود که با اعمال سوخت جی‌پی‌۴ در سطوح صاف، ضریب اصطکاک به هنگام تغییر از اصطکاک ایستایی به اصطکاک سُرش‌ی، با رسیدن

جدول ۲ مقادير ناهمواری سطح برای سطوح آلومینیوم ۵۰۸۳ صیقلی با بافت های مختلف

مقادير ناهمواری سطح ( $\mu\text{m}$ ) صفحات آلومینیوم								شماره	شماره
$D_f$	$\Delta q$	$R_p$	$R_z$	$R_{ku}$	$R_{sk}$	$R_q$	$R_a$	سنباده	نمونه
۳/۰۱	۰/۰۴۳	۰/۸۳۹	۰/۵۹۲	۴/۷۶	-۰/۴۲	۰/۰۷۳	۰/۰۵۵	P2500	S1
۲/۸۴	۰/۰۷۲	۱/۱۹	۰/۸۵۱	۵/۱۱	-۰/۷	۰/۱۲۳	۰/۰۹۲	P1500	S2
۲/۸۱	۰/۱۳	۲/۴۱	۲/۲۶	۲/۷۳	-۰/۵۸	۰/۴۷۵	۰/۳۷	P150	S3
۲/۶۲	۰/۲	۴/۱	۳/۵	۳/۴۱	۰/۰۴	۰/۵۸۶	۰/۴۵۹	P36	S4
۲/۶۹	۰/۲۲	۵/۶۸	۴/۳۱	۳/۲۳	-۰/۲۴	۰/۷۳۴	۰/۵۸	فرچه سیمي	S5



شکل ۲ تصاویر سه بعدی و ریزنگارهای AFM سطوح آلومینیوم آماده شده با سنباده: الف) نمونه S4 سنباده با کاغذ P36، ب) نمونه S3 سنباده با کاغذ P150، ج) نمونه S1 پرداخت با سنباده P2500.

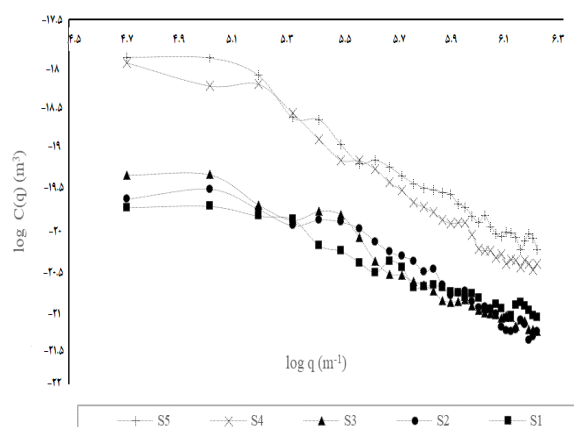


شکل ۳ تغییرات ضریب اصطکاک با شماره نمونه برداری به هنگام سُرش در مقابل سطوح مختلف بافت در (الف) شرایط خشک و (ب) روان کاری

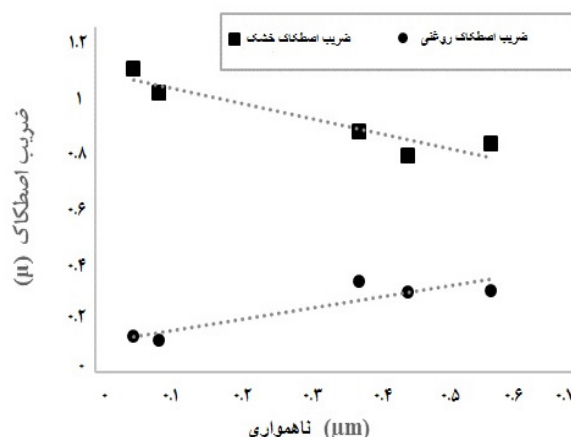
چسبندگی است؛ در نتیجه با افزایش زبری سطح و تعداد برآمدگی‌های سطحی، سطح تماس واقعی میان لاستیک و فلز کاهش می‌یابد و همین امر سبب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود و از  $R_p$  تقریباً  $0/35$  میکرومتر، تغییرات ضریب اصطکاک نسبتاً ثابت می‌شود. با اعمال روان‌کننده مایع، لایه فیلمی میان دو سطح در تماس ایجاد می‌شود و عملاً سطح تماس واقعی میان دو سطح لاستیک و فلز صفر می‌شود. در حضور سوخت جی پی ۴ تغییرات ضریب اصطکاک با ناهمواری سطح، روند معکوس دارد. با افزایش میزان  $R_p$  و برآمدگی‌های سطح، برآمدگی‌ها سبب شکست در لایه فیلم روان‌کننده شده، سطح تماس واقعی را افزایش داده، منجر به زیاد شدن تدریجی ضریب اصطکاک می‌شوند. در نتیجه در شرایط خشک، روند، نزولی و در حضور جی پی ۴،

به قله و تقریباً بدون افت، به مقدار پایا می‌رسد و پس از آن تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. کمترین اصطکاک به سطح صاف و صیقلی S2 و بیشترین اصطکاک متعلق به سطح زبر S4 است و برای دو سطح زبر S3 و S4 تطابق دو منحنی بر یکدیگر مشاهده می‌شود. در حضور این روان‌کننده، ضریب اصطکاک بین  $0/1$  تا  $0/35$  قرار دارد و نسبت به شرایط خشک تا حدود  $75\%$  کاهش یافته است.

در شکل ۴، ضریب اصطکاک سُرش لاستیک نیتریل در مقابل سطوح آلومینیوم در شرایط خشک و سوخت جی پی ۴ با متغیر ناهمواری سطح  $R_p$  بررسی شد. در حالت خشک و در سطوح صاف و صیقلی، با توجه به پیدایش قله در روند منحنی‌های ضریب اصطکاک در تمام سطوح، مشاهده می‌شود سازوکار حاکم از نوع



شکل ۵ چگالی طیف توانی یک بعدی سطوح آلومینیوم با ناهمواری های مختلف



شکل ۶ تغییرات ضریب اصطكاك با متغیر ناهمواری  $R_a$  به هنگام سُرش لاستیک در برابر سطوح با زبری های متفاوت در شرایط خشک و روان کاری

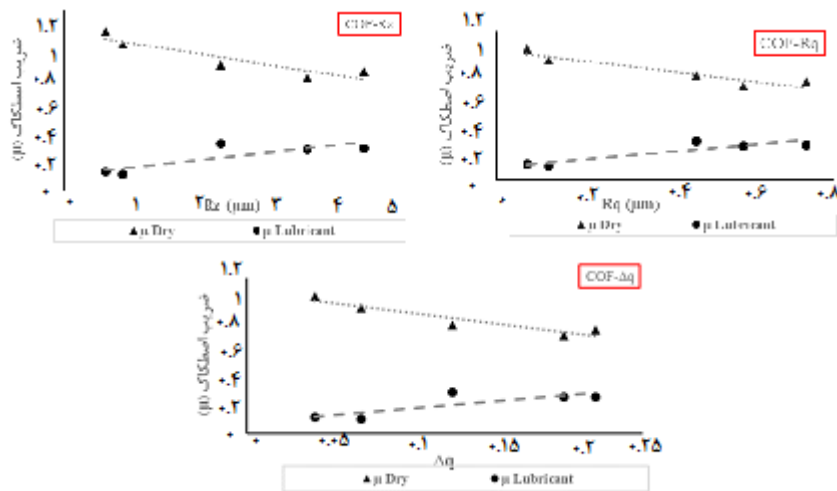
گرفت و نتایج نشان داد تغییرات ضریب اصطكاك برای این متغیرها نیز همانند متغیر  $R_a$  در شرایط خشک و روان کاری روند مشابهی دارد. این نتایج نشان می دهد که ضرایب زبری سطح  $R_q$ ،  $R_a$  و  $R_z$  سطح آلومینیوم، ارتباط نزدیکی با ضریب اصطكاك و مقادیر بهینه آن ها وجود دارد. شکل ۶ نشان دهنده روند تغییرات یکسان برای ضریب اصطكاك با متغیرهای ناهمواری سطح  $R_q$ ،  $R_z$  و  $\Delta q$  است. در شکل ۵ نیز در ناحیه طول موج های کوتاه تر، مناطق همپوشانی منحنی های  $\log C(q)$ - $\log q$  نشان می دهند که نیروی اصطكاك اتلافی، اصطكاك کل را تقریباً برای تمام سطوح زبر در سطح یکسان نگه می دارد و متقابلاً سبب شده است که تغییرات  $\Delta q$  با  $R_a$  و  $R_q$  مشابه شود.

شکل ۷، ریزساختار سطح لاستیک نیتریل به هنگام سُرش بر روی آلومینیوم پرداخت شده با سنباده های P1500 و P36 نشان می دهد. شیارهای در امتداد جهت سُرش در کل سطوح ساییده شده لاستیک، نشان می دهد که پس از اصطكاك، مکان نگاری اصلی سطح تا حدی تغییر کرده است. بردار، جهت سُرش سطوح در تماس را نشان می دهد. به هنگام سُرش لاستیک، در قسمت هایی از سطح لاستیک، شیارها و حفره های سطحی

روند، صعودی است. این امر نشان می دهد که اعمال سوخت روان کننده جی پی ۴ سبب تغییر در سازوکار اصطكاك شده است.

با مقایسه داده های ستون  $D_f$  در جدول ۱ مشاهده می شود، بعد برخال (Fractal) تمامی نمونه ها بین مقدار ۲ و ۳ قرار دارد که نشانگر خودهمبستگی (Self-affinity) الگوی ناهمواری سطوح آلومینیوم هستند. از این رو چگالی طیف توانی

(Power Spectrum Density (PSD)) سطوح آلومینیوم در شکل ۵ بررسی شده است. مکان نگاری برای توصیف کلی سطح و بررسی اثر ناهمواری بر چگالی طیف توانی سطوح استفاده شد. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود در طول موج های بلند،  $\log_{10} C(q)$  تقریباً ثابت باقی مانده است ( $q < 1 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$ ). در این ناحیه هرچه  $R_a$  پایین تر است، مقادیر  $\log_{10} C(q)$  نیز کوچکتر هستند. در ناحیه طول موج های کوتاه یعنی  $q > 1.6 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$  (یعنی  $q > 5.2 \text{ m}^{-1}$ ) تقریباً با افزایش لگاریتم طول موج برای تمام سطوح ناهموار، لگاریتم چگالی طیف توانی کاهش می یابد. علاوه بر این، ناهمواری جذر متوسط ریشه  $R_q$ ، متوسط حداکثر ارتفاع پروفیل  $R_z$  و شیب جذر متوسط ریشه  $\Delta q$  از متغیرهای زبری سطح نیز مورد بررسی قرار



شکل ۶ تغییرات ضریب اصطكاك با متغیرهای  $R_z$ ،  $R_q$  و  $\Delta q$

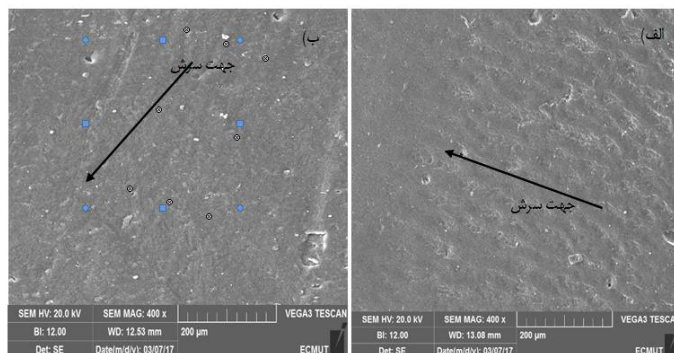
روان کاری، اثر درگیری های فیزیکی کم شده و عرض و عمق شیارهای روی سطح لاستیک تحت اصطكاك کاهش می یابد. همان طور که از مقایسه شکل ۷ و ۸ مشخص است، در حضور سوخت روان کننده، سطح لاستیک به هنگام سُرش در مقابل سطح آلومینیومی به سبب تشکیل لایه فیلم روان کننده در سطح مشترک، آسیب کمتری دیده است. نتیجه گرفته می شود هرگاه سطح فلزی در تماس، دارای مشخصه های ناهمواری در اندازه مناسب باشد، بخشی از روان کننده در درون حفره های میکرونی سطح ناهموار، ذخیره می شود و به تشکیل بهتر لایه روان کننده در سطح و از بین بردن اثر ناهمواری کمک می کند و در نتیجه ضریب اصطكاك کم تر می شود.

در شکل ۷، تنش سطحی و درگیری فیزیکی قله های در تماس بر سطح لاستیک، مشاهده می شود. در شکل ۸ با اعمال سوخت جی پی ۴ و در نتیجه تغییر سازوکار اصطكاك، به شدت از تنش سطح بر روی نیتریل کاسته می شود. هرچند همچنان تعدادی ترک بر روی نمونه باقی می ماند. به طور کلی، در تمامی آزمایش ها، تنش و درگیری فیزیکی در سطح لاستیک مشاهده شد. شکل ۹، تغییرات ضریب اصطكاك را به عنوان

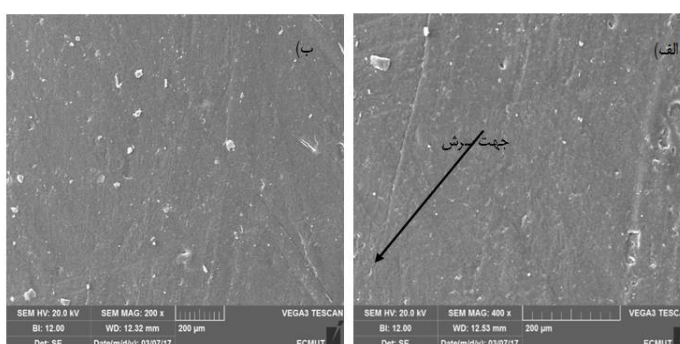
مشاهده می شود که به موجب کنده شدن برآمدگی ها در ناهمواری سطح ایجاد می شود. از سوی دیگر، همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود با کاهش زبری سطح، اندازه برآمدگی های سطح نیز کاهش یافته است و اثر درگیری های فیزیکی و اتلاف بر لاستیک نیتریل ناشی از این برآمدگی ها نیز تضعیف شده است. از آنجا که آلومینیوم نسبت به سایر فلزات، فلزی نرم است و سطحی صاف دارد در حالت خشک، در سطوح با برآمدگی های بسیار کم (P1500, P2500) عدم رخ دادن درگیری های فیزیکی و اتلاف و حاکمیت سازوکار چسبندگی، ضریب اصطكاك بالاتر است. اما با افزایش زبری سطح و بزرگ شدن برآمدگی های ناشی از آن، درگیری های بین سطوح در نقاط برآمدگی ها بیشتر شده و سازوکار چسبندگی کم می شود. همین امر موجب کاهش اصطكاك در این سطوح می شود. البته با افزایش زبری سطوح تا ۰/۳۵ میکرومتر اصطكاك تقریباً ثابت شده است.

شکل ۸-الف و ب، ریزساختار سطح لاستیک نیتریل به هنگام سُرش بر روی سطح آلومینیوم ناهموار در حضور روان کننده جی پی ۴ را نشان می دهد در این شکل به سبب وجود روان کننده بر روی سطح و ایجاد لایه





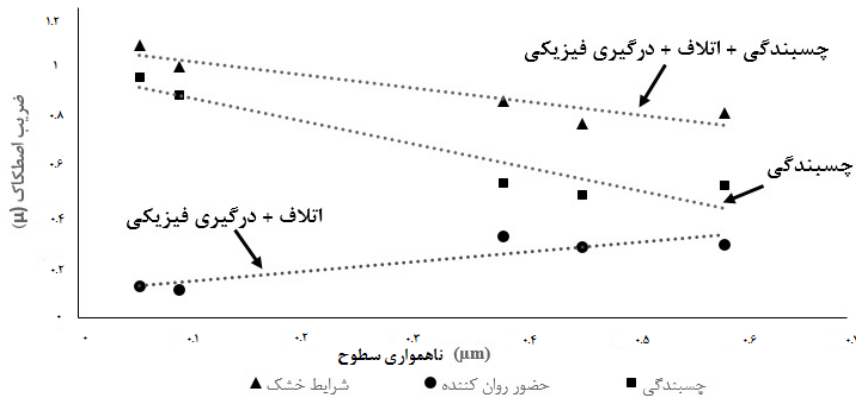
شکل ۷ ریزساختار سطح لاستیک نیتریل به هنگام سُرش خشک در برابر سطح آلومینوم الف)  $R_{a-P36}=0.459$  و ب)  $R_{a-P150}=0.092$



شکل ۸ ریزساختار سطح لاستیک نیتریل به هنگام سُرش در برابر سطح آلومینوم الف)  $R_{a-P36}=0.459$  و ب)  $R_{a-P150}=0.092$  در حضور جی پی پی ۴

شد، برای سطح پرداخت با کوچکترین  $R_a$ ، به سبب بالا بودن سطح واقعی تماس، جزء چسبندگی قوی تر عمل می کند. بدین ترتیب هرچه زبری سطح افزایش می یابد، با زیاد شدن تعداد برآمدگی های سطوح و کم شدن سطح تماس واقعی لاستیک نیتریل-فلز آلومینیوم، اثر جزء چسبندگی نیز کم شده و اثر سازوکار اتلاف و درگیری فیزیکی زیادتر می شود. البته با وجود افزایش اثر دو سازوکار اتلاف و درگیری فیزیکی با افزایش زبری سطح، باز هم اثر سازوکار چسبندگی برای سطوح صاف و صیقلی همچون سطح آلومینیوم بیشتر است و سازوکار حاکم است. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود با اعمال سوخت جی پی پی ۴، برای سطح های فلزی صاف و صیقلی، تأثیرات اندازه ذرات سنباده محدود است و از ۱۰۰ میکرومتر به بالا (P150) تقریباً تأثیر چندانی در شرایط خشک و روان کاری ندارد.

تابعی از شرایط آزمایش برای بررسی اثر سازوکارهای اصطکاک نشان می دهد. با اعمال سوخت جی پی پی ۴ به عنوان روان کننده مایع بر روی سطح سازوکار چسبندگی به طور کامل حذف می شود و تنها سازوکارهای درگیری های فیزیکی و اتلاف باقی می ماند. از اختلاف میان مقادیر سُرش خشک و سُرش در حضور سوخت جی پی پی ۴ در شرایط یکسان و معین، میزان سازوکار چسبندگی اصطکاک به دست می آید. از بررسی شکل ۹ و بزرگی منحنی جزء چسبندگی و بیشتر بودن مقادیر آن از مقادیر دو سازوکار درگیری فیزیکی و اتلاف، نتیجه گرفته می شود که در تماس لاستیک نیتریل- فلز آلومینیوم، سازوکار حاکم، سازوکار چسبندگی است. همانطور که مشاهده می شود مقادیر آن از سازوکار درگیری های فیزیکی و اتلاف بزرگتر است. از بررسی دقیق تر سازوکار چسبندگی مشاهده می شود همان طور که پیش تر بیان



شکل ۹ مقایسه سازوکارهای اصطکاک؛ تغییرات ضریب اصطکاک با ناهمواری سطوح  $R_a$  در اصطکاک سُرش

برای پوشاندن برآمدگی‌های سطح، به هنگام سُرش، این برآمدگی‌ها به داخل سطح لاستیک نفوذ می‌کنند و سبب افزایش ضریب اصطکاک می‌شوند و اصطکاک ایجاد شده سبب ایجاد سطح بالاتری از تنش در لاستیک می‌شود. با اعمال سوخت جی پی ۴ بر سطح تماس، لایه روان‌کننده بر روی برآمدگی‌های سطح لاستیک ایجاد می‌شود که اثر برآمدگی‌های سطح بر ضریب اصطکاک را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. نتیجه می‌شود میزان تنش ایجاد شده بر سطوح لاستیکی در حضور سوخت، با حذف سازوکار چسبندگی و کاهش سازوکار اتلاف کم می‌شود و آسیب‌های کمتری به سطح لاستیک وارد می‌شود. از طرفی با افزایش برآمدگی‌های سطحی، سطح واقعی تماس به تدریج افزایش می‌یابد که منجر به زیاد شدن ضریب اصطکاک می‌شود.

#### ۴ نتیجه‌گیری

برای درک بهتر اثر سوخت جی پی ۴ بر نقش متغیرهای ناهمواری سطح بر ضریب اصطکاک، هنگام سُرش لاستیک نیتریل بر سطح آلومینوم بررسی شد. نتایج به دست آمده بر اساس شرایط آزمایشگاهی نشان می‌دهد تغییرات ضریب اصطکاک با متغیرهای ناهمواری سطح  $R_a$ ،  $R_z$ ،  $R_q$ ،  $\Delta q$  روند یکسانی دارد. هم‌چنین در شرایط خشک و حضور سوخت جی پی ۴ به عنوان روان‌کار تأثیر اندازه ذرات متوسط سنباده در ایجاد زبری سطح محدود است و از اندازه ذرات ۱۰۰ میکرومتر به بالا، (P150 و شماره‌های پایین‌تر سنباده) تأثیر چندانی بر ضریب اصطکاک نمی‌گذارد. مشخص است در سطوح سخت‌تر، ارتفاع برآمدگی‌های سطح و تعداد آن‌ها بیشتر خواهد بود. در نتیجه در سُرش خشک و نبود لایه روان‌کننده

## مراجع

- 1- Maurice L.Q., Lander H., Edwards T and Harrison W.E., Advanced Aviation Fuels: A Look Ahead Via a Historical Perspective, *Fuel*, 80, 747-756, 2001.
- 2- Shen M. X., Peng X. D., Meng X. K., Dong F., Zhang J. P. and Zhu M. H., Fretting Wear Behavior of Acrylonitrile-Butadiene Rubber (NBR) for Mechanical Seal Applications, *Tribol. Int.*, 93, 419-428, 2016.
- 3- Shen M. X., Dong F., Zhang Z. X., Meng X. K. and Peng X. D., Effect of Abrasive Size on Friction and Wear Characteristics of Nitrile Butadiene Rubber (NBR) in Two-Body Abrasion, *Tribol. Int.*, 103, 1-11, 2016.
- 4- Dong C. L., Yuan C. Q., Bai X. Q., Yan X. P. and Peng Z., Tribological Properties of Aged Nitrile Butadiene Rubber under Dry Sliding Conditions, *Wear*, 322-323, 226-237, 2015.
- 5- Mofidi M., Kassfeldt E. and Prakash B., Tribological Behaviour of an Elastomer Aged in Different Oils *Tribol. Int.*, 41, 860-866, 2008.
- 6- Persson B. N., Albohr O., Tartaglino U., Volokitin A. I. and Tosatti E., On the Nature of Surface Roughness with Application to Contact Mechanics, Sealing, Rubber Friction and Adhesion, *J. Phys- Condens. Matter*, 17 (1), R1-R62, 2005.
- 7- Mofidi M., Prakash B., Persson B. N. J. and Albohr O., Rubber Friction on (Apparently) Smooth Lubricated Surfaces, *J. Phys- Condens. Matter*, 20, 1-8, 2008.
- 8- Menezes P. L., Kishore and Kailas S. V., Friction and Transfer Layer Formation in Polymer-Steel Tribo-System: Role of Surface Texture and Roughness Parameters, *Wear*, 271, 2213-2221, 2011.
- 9- Menezes P. L. and Kailas S. V., Role of Surface Texture and Roughness Parameters on Friction and Transfer Film Formation When UHMWPE Sliding Against Steel, *Biosurf. Biotribol.*, 2, 1-10, 2016.
- 10- Sedlaček M., Podgornik B. and Vižintin, J., Correlation between Standard Roughness Parameters Skewness and Kurtosis and Tribological Behavior of Contact Surfaces, *Tribol. Int.*, 48, 102-112, 2012.
- 11- Tang Z. and Li S., A Review of Recent Developments of Friction Modifiers for Liquid Lubricants (2007-present), *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 18, 119-139, 2014.
- 12- National Iranian Oil Products Distribution Company (N.I.O.P.D.C), <https://www.niopdc.ir/fa/products/oil-products/sookhthavaee/sookhtjetjp4.html>, 2017.
- 13- Hu Z. M. and Dean T. A., A Study of Surface Topography, Friction and Lubricants in Metal Forming, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 40, 1637-1649, 2000.
- 14- Rasp W. and Wichern C. M., Effects of Surface-Topography Directionality and Lubrication Condition on Frictional Behavior during Plastic Deformation, *J. Mater. Process. Technol.*, 125-126, 379-386, 2002.
- 15- Feng D., Shen M.X., Peng X. D. and Meng X. K., Surface Roughness Effect on the Friction And Wear Behavior of Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR) under Oil Lubrication, *Tribol. Lett.*, 65:10, 2017.
- 16- Razzaghi Kashani M., Behazin A. and Fakhar, Construction and Evaluation of a New Tribometer for Polymers, *Polym. Test.*, 30, 271-276, 2011.
- 17- Gadelmawla E. S., Koura M. M., Maksoud, T. M. A., Elewa I. M. and Soliman H. H., Roughness Parameters, *J. Mater. Process. Technol.*, 123, 133-145, 2002.

