

تأثیر سوخت‌های JP-10 و DMAZ بر اصطکاک لاستیک نیتریل و آلومینیوم با زبری‌های مختلف

سیده مهدیه عمرانی^۱، محمدرضا پورحسینی^{۲*}، مهدی رزاقی کاشانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ۳- دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس
(تاریخ وصول: ۹۶/۱۰/۲۴، تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۱۵)

چکیده

ایجاد تنش سطحی در سطح لاستیک از مشکلات کاربرد لاستیک‌ها در صنایع مختلف است که منجر به ترک‌های سطحی می‌شود و عمر مفید قطعات لاستیکی را می‌کاهد. این تنش‌ها معمولاً توسط اصطکاک بین دو سطح لاستیکی و فلزی ایجاد می‌شوند. ناهمواری سطح، ترکیب آمیزه لاستیکی، شرایط محیطی، تنظیمات آزمون و... بر اصطکاک لاستیک - فلز اثر می‌گذارند. ناهمواری سطوح سخت نقش مهمی در سرش دو سطح در کنار یکدیگر ایفا و عمدتاً رفتار اصطکاک را کنترل می‌کند. از طرفی اثر ناهمواری بر ضریب اصطکاک با استفاده از روان‌کننده مناسب قابل کنترل است. با توجه به استفاده از سوخت در مخازن و ویژگی خودروان‌کاری اکثر سوخت‌ها، در پژوهش حاضر، اثر سوخت JP-10 و DMAZ به عنوان روان‌کننده بر میزان کاهش ضریب اصطکاک سرشی میان لاستیک نیتریل و سطوح آلومینیوم با زبری‌های مختلف بررسی شد. نتایج تجربی نشان داد، ضریب اصطکاک وابستگی خوبی با متغیر متوسط ناهمواری سطح (R_a) دارد. با اعمال روان‌کننده JP-10 و DMAZ، ضریب اصطکاک به ترتیب حدود ۶۵٪ و ۸۵٪ کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: روان‌کننده، JP-10، DMAZ، ناهمواری سطح، اصطکاک، لاستیک نیتریل.

Influence of JP-10 and DMAZ Fuels on the Friction between NBR and Aluminum with Various Roughness

S. M. Emrani, M. R. Pourhossaini*, M. Razaghi Kashani

Tarbiat Modares University

(Received: 1/14/2018, Accepted: 5/5/2018)

Abstract

In various industries utilization of rubbers is an obstacle due to the generation of superficial stress at the surface of rubber, resulting superficial cracks and reducing the service life of rubber parts. These stresses are usually caused by friction between the surfaces of rubber and metal. Roughness of surfaces, composition of rubber compounds, environmental conditions and test settings affect the rubber-metal friction. Surface roughness plays an important role in sliding between two surfaces and controls friction behaviors. On the other hand, the effect of roughness on the friction coefficient is controllable using a suitable lubricant. In the present study regarding to the fuel consumption in rubber fuel tanks and self-lubrication characteristic in majority of fuels, the effect of JP-10 & DMAZ fuels as lubricants is investigated to reduce the sliding friction coefficient between NBR and aluminum with various roughness. The results show the relation between the sliding friction coefficient and the mean surface roughness (R_a). By applying JP-10 & DMAZ fuels as lubricant, the coefficient of friction decreased by almost 65% and 85%, respectively.

Keywords: Lubricant, JP-10, DMAZ, Surface Roughness, Friction, NBR.

۱- مقدمه

با توجه به نیاز امروز علوم مهندسی، دانش تریبولوژی تعریف شده است. تریبولوژی علمی میان‌رشته‌ای است و از مهارت‌های مهندسی مکانیک، علوم مواد، شیمی و مهندسی شیمی و موارد دیگر بهره می‌برد [۱]. تریبولوژی شامل سه موضوع کلیدی است: اصطکاک، سایش و روان کاری. اصطکاک مقاومتی است که هنگام حرکت یک جسم نسبت به جسم دیگر که با یکدیگر در تماس هستند، اتفاق می‌افتد. سایش از دست دادن مواد به علت آن حرکت است و روان کاری استفاده از یک مایع یا جامد برای به حداقل رساندن اصطکاک و سایش است. اصطکاک شامل سازوکار چسبندگی، اتلاف، تغییر شکل مکانیکی است که در اصطکاک لاستیک به سبب خاصیت گرانش و کشسانی، دو سازوکار چسبندگی و اتلاف حاکم هستند.

فرمولاسیون‌های لاستیکی بر پایه لاستیک نیتریل بوتادی‌ان ضمن قابلیت جذب از ارتعاشات، پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر روغن برجسته‌ای برخوردار بوده و در طراحی و ساخت انواع شیلنگ‌ها، اورینگ‌ها، مخازن سوخت و... کاربرد فراوانی دارد. در اغلب صنایع همچون بسته‌بندی، حمل‌ونقل، صنایع شیمیایی و هوافضا، لاستیک‌ها باید در تماس با سطوح دیگر باشند که اغلب فلزی هستند [۲]. در این صنایع به هنگام جایگیری قطعه لاستیکی در مجاورت سطوح فلزی اصطکاک ایجاد می‌شود و در نتیجه به سبب وجود تنش بر روی سطح لاستیک بعضاً ایجاد ترک و کاهش عمر قطعه نیز وجود دارد. از طرفی اصطکاک بین سطح لاستیک و سطح فلزی بر متغیرهای متعددی از جمله رفتار دینامیکی، هزینه انرژی، گرما/سایش ایجاد شده، تشکیل فیلم/ذرات انتقال نیز اثر می‌گذارد [۳]. از این رو دستیابی به راهکاری برای کاهش اصطکاک از دغدغه‌های محققان این عرصه است. ناهمواری سطح، سطح تماس واقعی، بار عمودی، سرعت سرش، شرایط محیطی مانند دما و روان‌کننده‌ها، و خواص مواد، عوامل مهم در کنترل اصطکاک هستند. تحقیقات قابل توجهی به منظور مطالعه اثر این متغیرها بر ضریب اصطکاک با استفاده از روش‌های تجربی مختلف انجام شده است [۴-۹]. ناهمواری سطح اثر بزرگی بر پدیده‌های فیزیکی مهمی همچون اصطکاک، سایش و مکانیک تماس دارد [۶]. یکی از تلاش‌های اولیه برای توضیح اصطکاک، ایجاد ارتباط میان آن با ناهمواری سطح بود، زیرا که حتی سطوح صیقلی، شامل برآمدگی‌های میکرومتری هستند [۷]. محققان بسیاری برای مطالعه اثر بافت سطح مواد بر روی اصطکاک تلاش کرده‌اند. در منابع بسیاری مشخصه‌های ناهمواری متفاوتی همچون R_a ، R_q ، R_z و... برای توصیف بافت سطح به کار می‌روند. متغیر ناهمواری همچون R_a به طور کلی برای توصیف یک سطح استفاده می‌شود. از این رو مطالعات بسیاری [۱۰-۱۴] به منظور بررسی اثر متغیرهای مختلف زبری بر اصطکاک انجام شده است.

از دیگر تلاش‌ها برای کنترل اصطکاک، بررسی اثر روان‌کننده‌های مختلف بر

اصطکاک و سازوکارهای آن است. هدف اصلی هر روان‌کننده‌ای کاهش اصطکاک ایجاد شده ناشی از تماس دو سطح ناهموار همانند سطوح فلز-فلز، لاستیک-فلز و... است. روان‌کننده‌های مایع لایه بین سطحی ایجاد می‌کنند که سبب عبور دو سطح بر هم با کمترین اصطکاک می‌شود. بنابراین حضور روان‌کننده‌ها به منظور جلوگیری از اصطکاک در قطعات مکانیکی که سطوح با هم در تماس هستند، از جمله راهکارهای پیشنهادی است. انتخاب روان‌کننده مناسب به طراحی تجهیز و شرایط عملیاتی بستگی دارد [۱۵]. سوخت‌ها از جمله روان‌کننده‌های پایه نفتی هستند که در اکثر صنایع همچون اتومبیل، هوافضا، بسته‌بندی و... در تماس با بخش‌های لاستیکی و فلز هستند و همچون دیگر مایعات دارای خاصیت خودروان‌کاری می‌باشند. از این رو استفاده از آن‌ها به عنوان روان‌کننده نیز امکان‌پذیر است.

تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص رابطه میان اصطکاک و توپوگرافی سطح در حضور روان‌کننده‌های مختلف بررسی شده است. هو و دین [۱۶] در گزارش‌های خود بیان کردند که یک سطح صاف تصادفی روان‌کننده بیشتری را نگه می‌دارد و اصطکاک را کاهش می‌دهد. رسپ و ویچرن [۱۷] به مطالعه اثر توپوگرافی سطح در مقاومت اصطکاک با استفاده از انواع مختلف سطوح پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود شرایط سطوح نمونه را با ایجاد خراش سایشی در جهت موازی تا عمود بر سرش تغییر دادند. از چنین رویکردی آن‌ها دریافتند که اثر ناهمواری حساب شده و رژیم روغن کاری بیشتر از جهت سایش است. فنگ و همکارانش [۱۸] دریافتند ناهمواری سطح تأثیر ویژه‌ای بر رژیم روان کاری و رفتارهای تریبولوژی لاستیک نیتریل دارد.

با وجود تمام این بررسی‌ها، همبستگی میان متغیرهای ناهمواری استاندارد و رفتار تریبولوژیکی در شرایط خشک و روان کاری شده حین تماس لاستیک-فلز نیازمند بررسی دقیق‌تری است. هدف از این مقاله، بررسی اثر روان کاری سوخت‌های JP-10^۱ و DMAZ در سازوکار حاکم بر اصطکاک میان لاستیک نیتریل و آلومینیوم و همبستگی آن با مشخصه‌های زبری سطح است. این تحقیق صرفاً از منظر علمی ویژه شرایط خاص انجام شده است و کاربرد سوخت‌های هوا فضایی مورد بحث به عنوان روان‌کننده معمول نیست.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد

در این تحقیق، از لاستیک نیتریل با میزان آکریلونیتریل ۳۳٪ و چگالی ۰/۹۷ گرم بر سانتی متر مکعب، ساخت پتروشیمی کوسین کره، با نام تجاری Krynac NBR 27KNB استفاده شد (شکل ۱). جدول (۱) فرمولاسیون پایه نمونه لاستیکی مورد استفاده را نشان می‌دهد. دوده مورد استفاده در آمیزه‌های لاستیکی، گرید N-660 بود که از شرکت دوده صنعتی پارس خریداری شد.

1- Exo-Tetrahydrodicyclopentadiene (JP-10)

کشور ایران استفاده شد. در این آزمایش، اصطکاک سرشی بین لاستیک نیتریل بر روی صفحات آلومینیومی اندازه‌گیری شد. جزئیات دستگاه و روش تجربی قبلاً ارائه شده است [۱۹].

۲-۳- روش‌ها

در این مطالعه، صفحات آلومینیومی با استفاده از کاغذهای سنباده سیلیکون کاربید^۲ در پنج اندازه مختلف از P36 تا P2500 به صورت یک‌سویه پرداخت شدند. هر چه عدد کاغذ سنباده افزایش می‌یابد، سنباده نرم‌تر شده و سطح صیقلی‌تر می‌شود. متغیرهای ناهمواری صفحات آلومینیومی با استفاده از یک پروفایلومتر نوری قبل از هر آزمون در جهت سرش ثبت شد. بعد از انجام آزمون، با استفاده از یک میکروسکوپ نیروی اتمی^۳ و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۴ به ترتیب خواص صفحات آلومینیوم و سطح لاستیک نیتریل برای مطالعه ویژگی‌های سطوح آن‌ها مانند تشکیل یا عدم تشکیل فیلم انتقال بر روی سطح مشترک آلومینیوم و خواص ترک در سطح پین نیتریل مشخص شد. آزمایش اصطکاک بر روی کلیه سطوح آلومینیومی با ناهمواری سطح متفاوت در نیروی عمودی ۲۰ کیلوگرم و سرعت سرشی ۰/۶۷ متر بر ثانیه (350 rpm) اندازه‌گیری شد. این آزمون یک‌بار تحت شرایط محیطی خشک و بار دیگر در حضور سوخت‌های JP-10 و DMAZ به‌عنوان روان‌کننده انجام شد. این آزمایش‌ها به‌طور خاص برای درک سازوکار مختلف اصطکاک، اتلاف، چسبندگی و درگیری‌های فیزیکی مواد پلیمری و نیز اثر سوخت‌های فوق به‌عنوان روان‌کار بر این سازوکارها انجام شدند. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج آزمون اصطکاک برای هر سطح پنج بار تکرار شد. نخست آزمون خشک انجام شد و سپس آزمون در حضور روان‌کارها به‌منظور 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 (۳) معرفی شده‌اند و جزئیات کامل‌تر این متغیرها در مرجع [۲۰] ارائه شده است. شکل (۲) ناهمواری سطوح آلومینیوم 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 سرش لاستیک نیتریل بر روی صفحات آلومینیوم با ناهمواری سطح مختلف را نشان می‌دهد. R_a برای سطوح از ۰/۰۵ تا ۰/۵۸ میکرون متغیر بود.

جدول ۱- ترکیب آمیزه لاستیکی NBR با درصد‌های مختلف دوده.

| ماده | phr* |
|-------------------------|------|
| لاستیک نیتریل | ۱۰۰ |
| دوده ۶۶۰ | ۸۰ |
| گوگرد | ۱/۸ |
| اکسید روی | ۵ |
| استئاریک اسید | ۱ |
| شتاب‌دهنده سولفون‌آمیدی | ۱/۸ |

*phr - Parts per hundred rubber

صفحات سطح مشترک از جنس آلومینیوم ۵۰۸۳ به شکل دایره‌ای به قطر ۳۷ میلی‌متر ساخته شدند. اندازه‌گیری سختی نمونه لاستیک نیتریل و صفحات آلومینیوم در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه سختی‌سنج مدل EMCO M4U240 انجام شد. مشخصات لاستیک نیتریل و آلومینیوم مورد استفاده در جدول (۲) آورده شده است. از سوخت‌های JP-10 و DMAZ به‌عنوان روان‌کننده در دمای ۲۰ درجه سلسیوس، استفاده شدند.



شکل ۱- تصویری از نمونه لاستیک نیتریل.

جدول ۲- خواص مکانیکی لاستیک نیتریل و فلز آلومینیوم.

| خواصیت | لاستیک NBR | آلومینیوم |
|--------------|-----------------------|-----------|
| سختی | 76 (Shore A) | 75 (HB) |
| مدول الاستیک | 14.1 MPa (20 °C & 1%) | 72 GPa |
| استحکام کششی | 16.8 MPa | 300 MPa |

۲-۲- دستگاه‌ها

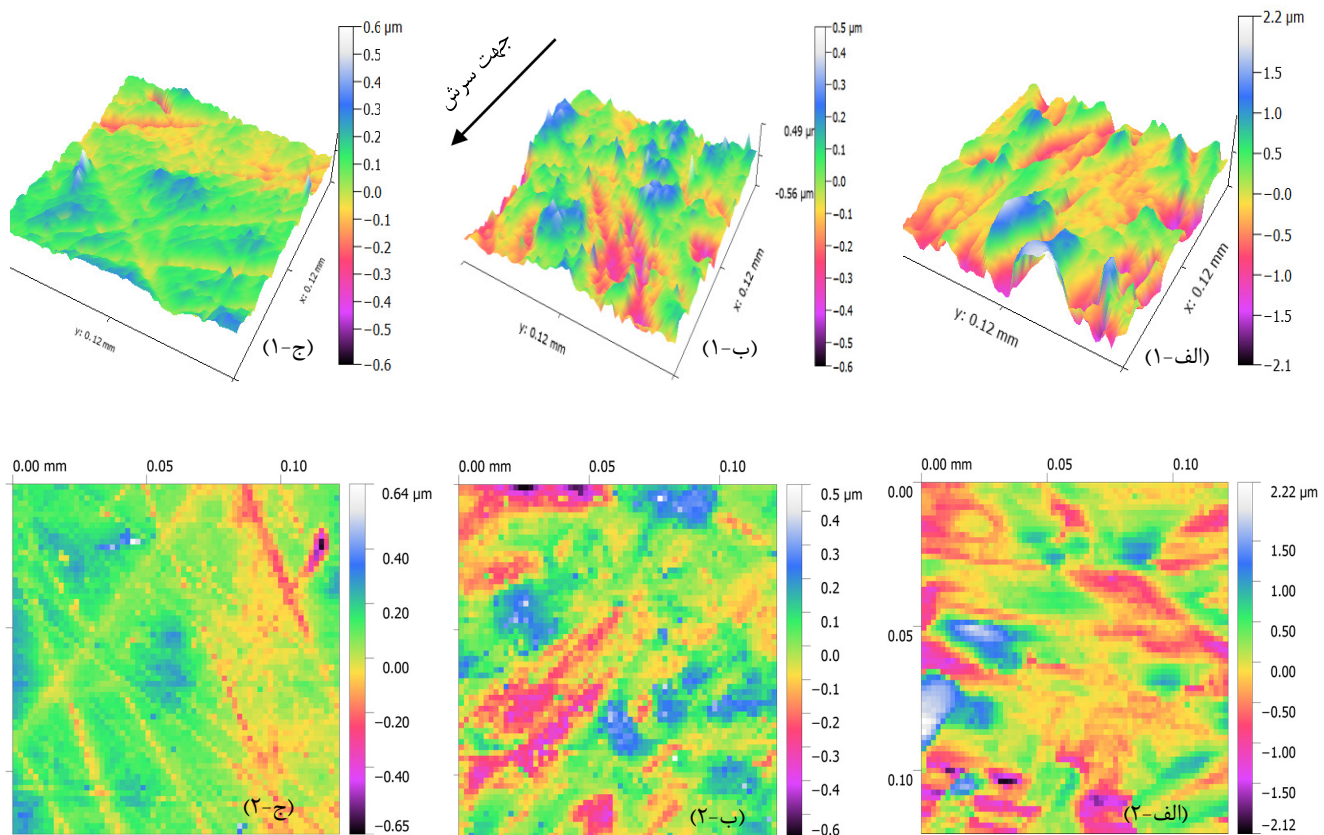
پروفایل‌های سه‌بعدی سطوح با استفاده از یک دستگاه میکروسکوپ نیرو اتمی AFM-DME (مدل DS 95-200-E، شرکت DME، NanoTechnologie GmbH، کشور آلمان) به‌دست آمد و با استفاده از نرم‌افزار دی‌جیون^۱ تحلیل شد. علاوه بر این از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل VEGA3، شرکت TESCAN، ساخت کشور جمهوری چک)، برای آنالیز سطوح لاستیک و بررسی تشکیل فیلم انتقال استفاده شد. برای بررسی اصطکاک از دستگاه آزمون اصطکاک پلیمرها در آزمایشگاه فیزیک پلیمرها در دانشگاه تربیت مدرس ساخت

2- SiC
3- Atomic Force Microscopy (AFM)
4- Scanning Electron Microscope (SEM)

1- Gwdiggion Software

جدول ۳- مقادیر ناهمواری سطح برای سطوح آلومینیوم ۵۰۸۳ صیقلی با بافت‌های مختلف.

| متوسط مقادیر ناهمواری سطح (μm) صفحات آلومینیوم | | | | | | | | سطح آلومینیوم | شماره نمونه |
|---|------------|-------|-------|----------|----------|-------|-------|---------------|-------------|
| Δ_q | Δ_a | R_t | R_z | R_{ku} | R_{sk} | R_q | R_a | | |
| ۰/۰۲۱۷ | ۰/۰۱۶۳ | ۰/۳۱۳ | ۰/۱۵۳ | ۲/۸۷۶ | ۰/۰۱۶ | ۰/۰۷۳ | ۰/۰۵۵ | P2500 | S1 |
| ۰/۰۳۷۶ | ۰/۰۲۶۱ | ۰/۶۵۰ | ۰/۲۵۱ | ۴/۴۰۴ | -۰/۸۴۷ | ۰/۱۱۶ | ۰/۰۹۲ | P1500 | S2 |
| ۰/۰۳۷۳ | ۰/۰۲۶۴ | ۰/۸۷۴ | ۰/۴۰۸ | ۱/۴۹۶ | ۰/۲۳۷ | ۰/۲۷۴ | ۰/۳۸۷ | P150 | S3 |
| ۰/۱۵۷ | ۰/۱۱۸ | ۲/۴۹۲ | ۱/۰۲۳ | ۳/۲۳۱ | ۰/۷۸۶ | ۰/۵۸۳ | ۰/۴۵۹ | P36 | S4 |
| ۰/۱۳۳ | ۰/۰۸۷۱ | ۲/۸۰۷ | ۱/۳۴۳ | ۲/۸۲۷ | ۰/۷۴۳ | ۰/۷۱۷ | ۰/۵۸۹ | فرچه سیمی | S5 |



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی سطوح آلومینیوم آماده شده با سنباده: الف) نمونه S4 سنباده با کاغذ زبر P36، ب) نمونه S3 سنباده با کاغذ P150، ج) نمونه S1 پرداخت با P2500.

اصطکاک ایستایی حداکثر (قله- F_s) و سرشی (حالت پایا - F_k) کمتر شده است، به طوری که در سطح بسیار صیقلی دیگر مشاهده نمی‌شود. مشاهده قله نشان از وجود سازوکار اصطکاک چسبندگی در سرش است که مشاهده می‌شود با افزایش زبری سطح اثر این سازوکار کم شده است. در شکل (۴) مشاهده می‌شود که با اعمال سوخت DMAZ، در سطوح صاف و صیقلی و با R_a کم، ضریب اصطکاک به هنگام تغییر از اصطکاک ایستایی به اصطکاک سرشی، به یک قله رسیده و پس از افت کمتر، به یک مقدار پایا می‌رسد و پس از آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند. کمترین اصطکاک به سطوح زبر S4 و S5 تعلق دارد و منحنی این دو سطح تقریباً بر هم منطبق است. در سطح

در شکل (۳) مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک به هنگام تغییر از اصطکاک ایستایی به اصطکاک دینامیکی، پس از رسیدن به قله به تدریج کاهش یافته و به یک مقدار پایا می‌رسد و پس از آن تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. در شکل (۳) که در شرایط خشک برای سطح با R_a برابر ۰/۵۸ میکرون (S5)، ضریب اصطکاک پایا حدود ۰/۸ و برای سطح با R_a برابر ۰/۰۵۵ میکرون (S1)، 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 روند کاهشی دارد و فاصله میان

از تورم لاستیک می‌شود، علل تفاوت عملکرد این دو سوخت به‌عنوان روان‌کننده تفاوت در قطبیت آن‌ها است. سطح توپولوژیکی قطبی دو روان‌کننده JP-10 و DMAZ به ترتیب $0 A^2$ و $17.6 A^2$ می‌باشد. در بحث قطبیت و کشش سطحی، توانایی تشکیل فیلم مطرح است. هر چه روان‌کننده قطبی‌تر باشد، تمایل آن به کروی شدن بیشتر است. به‌هنگام استفاده از روان‌کننده‌های قطبی که تمایل بیشتری به کروی شدن دارند، بر سطح صاف و صیقلی (S1) با Ra و برآمدگی‌های سطحی کم، برآمدگی‌های سطح قادر به نفوذ در لایه روان‌کننده و غلبه بر کشش سطحی بین ذرات آن نیستند، از این‌رو توانایی تشکیل فیلم این روان‌کننده‌ها کاهش می‌یابد که ضریب اصطکاک بالاتر را به همراه دارد.

در این سطوح، روان‌کننده‌های غیر قطبی به راحتی بر روی سطح، تشکیل فیلم می‌دهند. نتایج به دست آمده در شکل (۷) با این امر همخوانی دارد. با توجه به وجود قله در منحنی‌های مربوط به روان‌کننده‌های قطبی در برابر سطح صیقلی نتیجه گرفته می‌شود، در آن‌ها سهم سازوکار چسبندگی نسبت به سازوکار اتلاف و درگیری فیزیکی بیشتر است. در مقابل، با به‌کارگیری روان‌کننده‌های قطبی بر روی سطح زبر (با Ra بالا) و تعداد برآمدگی‌های سطحی بیشتر، برآمدگی‌های سطح قادر به نفوذ در لایه روان‌کننده و غلبه بر کشش سطحی بوده و مانع از کروی شدن مولکول‌های روان‌کار شده و توانایی تشکیل فیلم را در این روان‌کننده‌ها افزایش می‌دهد. از طرفی چون قادر به شکست کامل لایه روان‌کننده نیستند، میزان کاهش اصطکاک در آن‌ها بیشتر از روان‌کننده‌های غیر قطبی است.

با استفاده از معادله ضریب پرسون^۱، ضرایب همبستگی میان متغیرهای ناهمواری با ضرایب اصطکاک ایستایی حداکثر و سرشی محاسبه و به ترتیب در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان داده شده است. در این شکل‌ها، منحنی‌های توپر و توخالی به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی منفی و مثبت هستند. منظور از همبستگی منفی، نسبت معکوس میان ضرایب اصطکاک با متغیرهای ناهمواری سطح است.

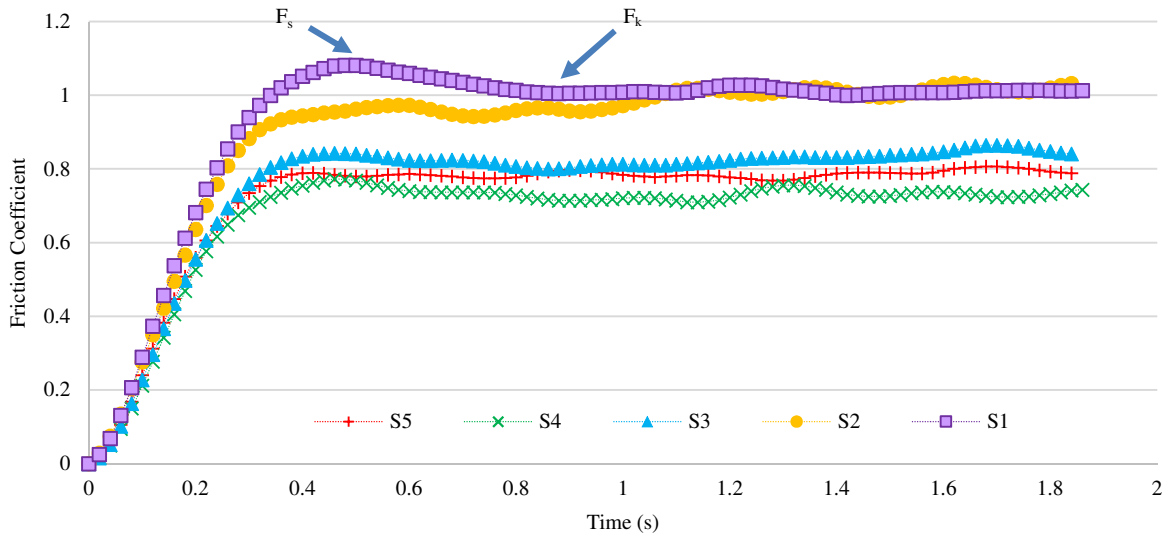
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در حالت خشک و در حضور سوخت روان‌کننده غیر قطبی JP-10، در هر دو حالت سطح زبر و صیقلی، اصطکاک ایستایی و سرشی، R_a بیشترین همبستگی را دارند و در حضور سوخت روان‌کننده قطبی DMAZ، در هر دو حالت اصطکاک ایستایی و سرشی، R_t بیشترین همبستگی را با مقادیر اصطکاک لاستیک نیتریل - فلز آلومینیوم از خود نشان داده‌اند. نکته قابل توجه در شکل‌های (۹ و ۱۰) این است که در شرایط خشک و روان‌کار DMAZ منحنی‌ها توپر و همبستگی‌ها منفی هستند و بدین معنا است که با افزایش متغیرهای ناهمواری سطح اشاره شده، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. این امر با نتایج حاصل از شکل (۶) همخوانی دارد. در حضور روان‌کار JP-10 و همبستگی مثبت متغیرها با ضریب اصطکاک، همخوانی با شکل (۶) نیز دیده می‌شود.

زیر S5 قله‌ای مشاهده نشد. بیشترین ضریب اصطکاک به سطح S1 مرتبط است. از این امر نتیجه گرفته می‌شود در حضور سوخت DMAZ به‌عنوان روان‌کننده، با افزایش ناهمواری سطح ضریب اصطکاک روند کاهشی داشته و بین ۰/۱ تا ۰/۲ قرار دارد و ضریب اصطکاک نسبت به شرایط خشک تا حدود ۸۲٪ درصد کاهش یافته است. در شکل (۵) مشاهده می‌شود که با اعمال سوخت JP-10، در سطوح صاف ضریب اصطکاک به‌هنگام تغییر از اصطکاک ایستایی به اصطکاک سرشی، با رسیدن به قله و بدون افت، به یک مقدار پایا می‌رسد و پس از آن تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. کمترین اصطکاک به سطح صاف و صیقلی S1 و بیشترین اصطکاک متعلق به سطوح زبر S3 و S4 است که در قسمت ایستایی بر یکدیگر منطبق هستند. در حضور این روان‌کننده، ضریب اصطکاک بین ۰/۱۵ تا ۰/۴۲ قرار دارد و نسبت به شرایط خشک تا حدود ۶۵٪ درصد کاهش یافته است.

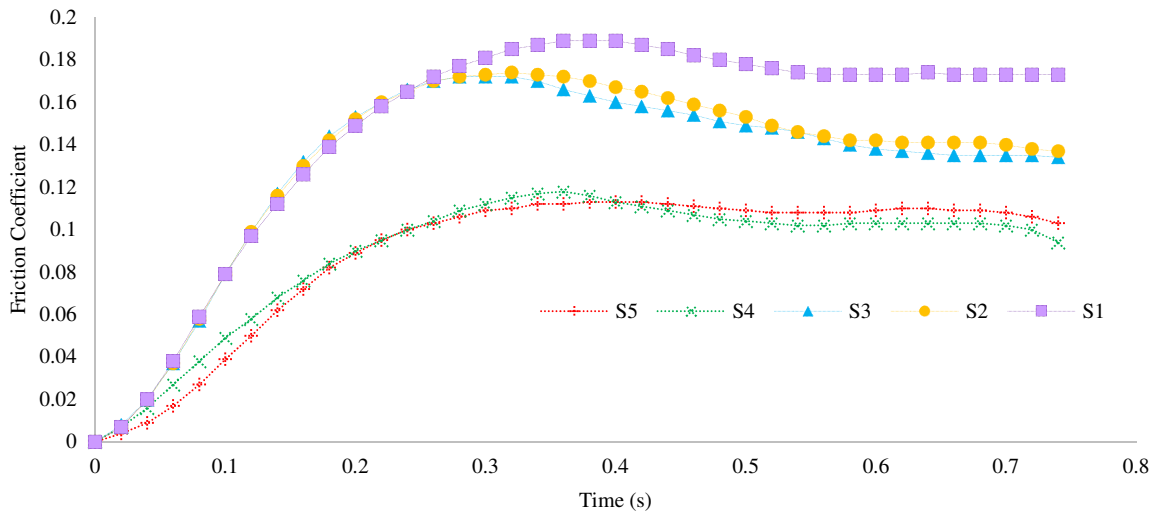
در شکل (۶) ضریب اصطکاک سرش لاستیک نیتریل در مقابل سطوح آلومینیوم در حضور سوخت‌های JP-10 و DMAZ با متغیر ناهمواری سطح Ra مورد بررسی قرار گرفت. در حالت خشک و در سطوح صاف و صیقلی، با توجه به پیدایش قله در روند منحنی‌های ضریب اصطکاک در تمام سطوح، مشاهده می‌شود سازوکار حاکم از نوع چسبندگی است در نتیجه با 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_a تقریباً ۰/۳۵ میکرون، تغییرات ضریب اصطکاک نسبتاً ثابت می‌شود. با اعمال روان‌کننده مایع، یک لایه فیلم میان دو سطح در تماس ایجاد می‌شود و عملاً سطح تماس واقعی میان دو سطح لاستیک و فلز صفر می‌شود. در حضور روان‌کننده JP-10 تغییرات ضریب اصطکاک با ناهمواری سطح روند معکوس دارد. با افزایش میزان R_a و برآمدگی‌های سطح، برآمدگی‌ها سبب شکست در لایه فیلم روان‌کننده شده و سطح تماس واقعی را افزایش داده و منجر به زیاد شدن تدریجی ضریب اصطکاک می‌شوند. در نتیجه در شرایط خشک، روند نزولی و در حضور JP-10 روند صعودی است این امر نشان می‌دهد که اعمال سوخت روان‌کننده JP-10 سبب تغییر در سازوکار اصطکاک شده است. اما در حضور روان‌کننده DMAZ تغییرات ضریب اصطکاک با ناهمواری سطح روند معکوس دارد و با افزایش میزان R_a و برآمدگی‌های سطح روند تغییرات ضریب اصطکاک همچنان نزولی است.

برای درک و مقایسه بهتر اثر زبری سطح بر کاهش اصطکاک توسط روان‌کاری، در شکل‌های (۷ و ۸)، ضریب اصطکاک لاستیک نیتریل نسبت به زمان برای دو روان‌کننده مایع در برابر سطح آلومینیوم زبر و صاف ترسیم شده است. در شکل (۷)، سطح مقابل لاستیک نیتریل، سطح صیقلی S1 با $R_a=0.055$ و سنباده P2500 و در شکل (۸)، سطح مقابل، سطح زبر S5 با $R_a=0.58$ و فرچه سیمی انتخاب شدند. با توجه به کوتاهی زمان (در حد چند ثانیه) تماس در این آزمایش که مانع

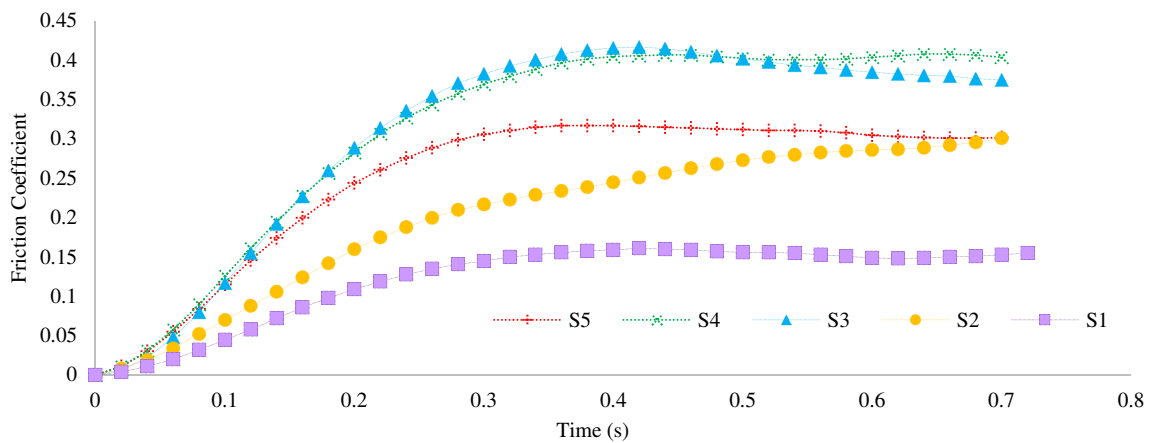
1- Pearson Correlation Coefficient



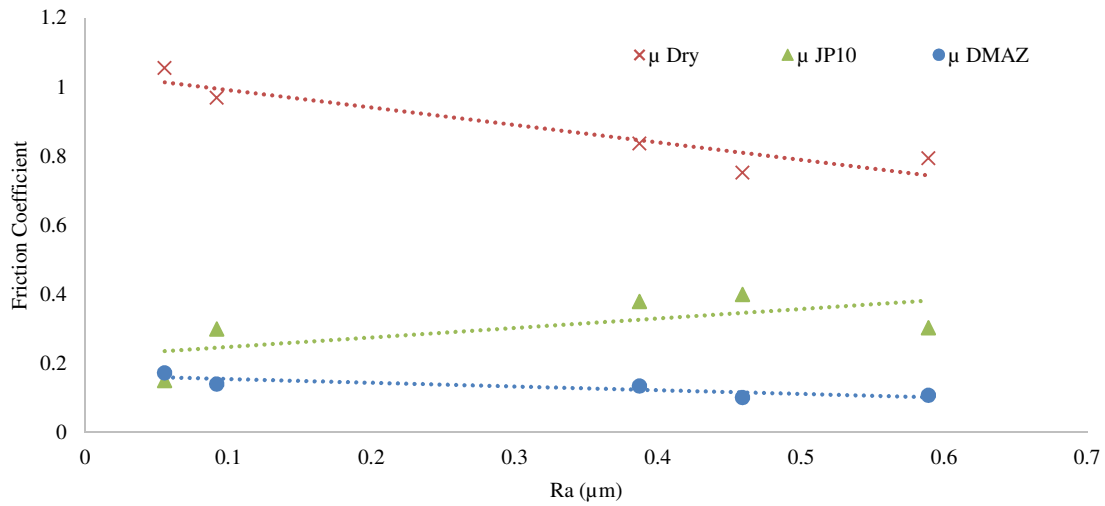
شکل ۳- ضریب اصطکاک ایستایی و سرشی به هنگام سرش در مقابل سطوح آلومینیوم با زبری‌های متفاوت در شرایط خشک.



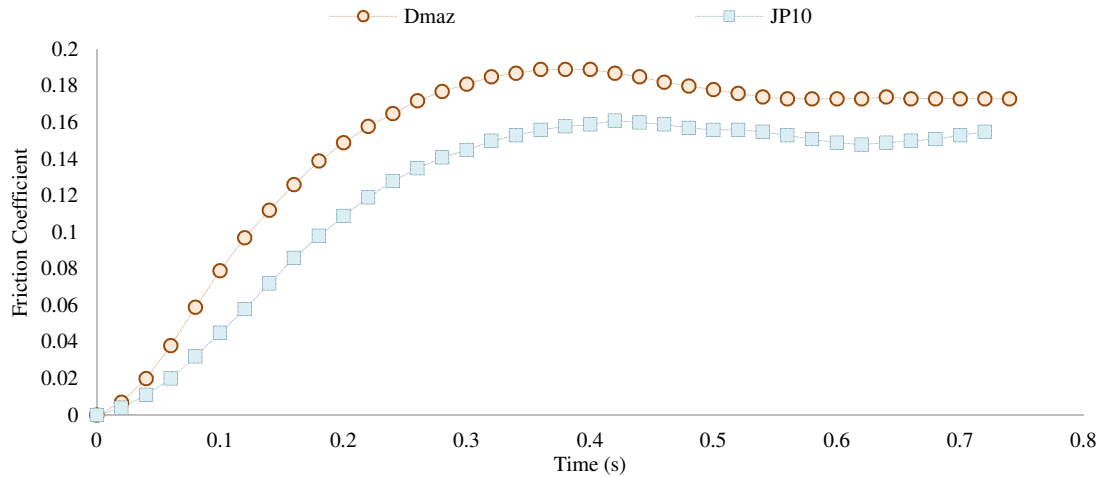
شکل ۴- ضریب اصطکاک لاستیک نیتریل هنگام سرش بر سطوح آلومینیوم با زبری مختلف در حضور سوخت DMAZ.



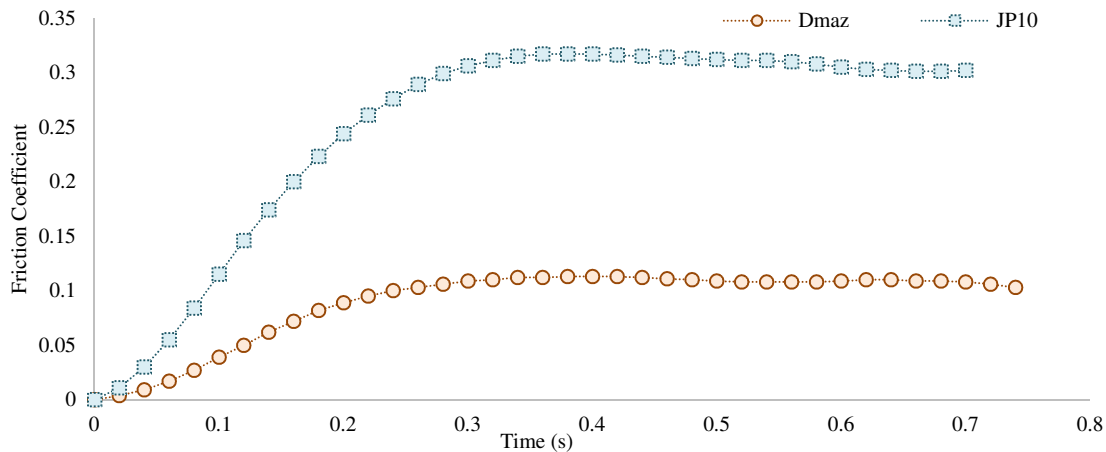
شکل ۵- ضریب اصطکاک لاستیک نیتریل هنگام سرش بر سطوح آلومینیوم با زبری مختلف در حضور سوخت JP-10.



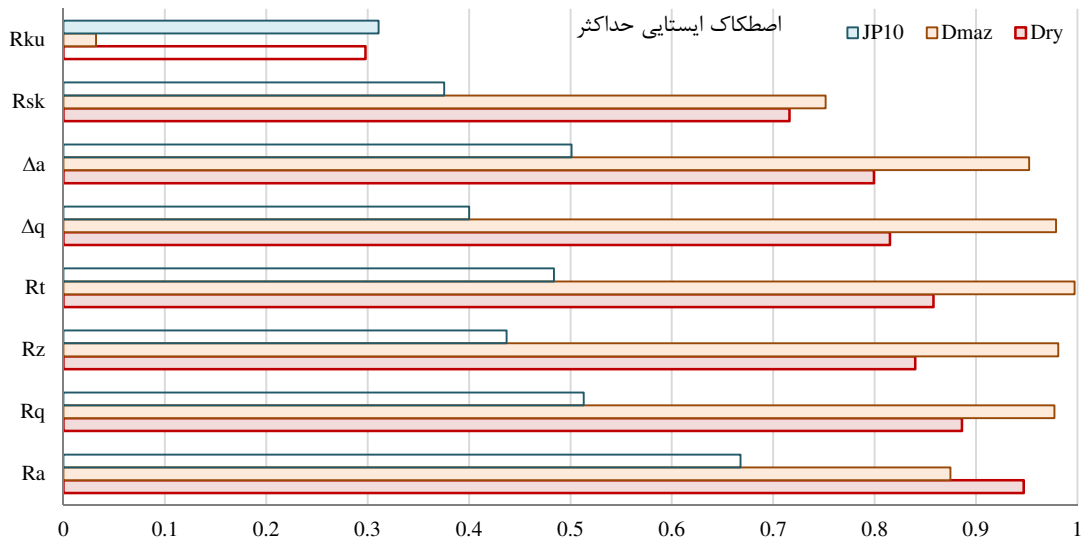
شکل ۶- ضریب اصطکاک سرشی با مشخصه R_a در سرش لاستیک نیتریل بر سطح آلومینیوم در شرایط خشک و حضور JP-10 و DMAZ



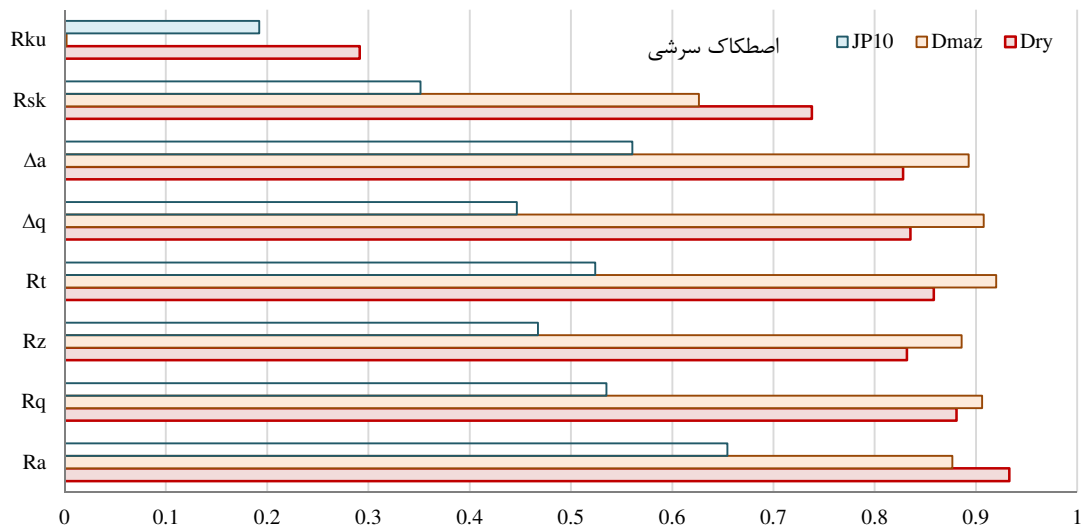
شکل ۷- ضریب اصطکاک لاستیک نیتریل - فلز آلومینیوم با $R_a=0.055$ در حضور روان کارهای مایع.



شکل ۸- ضریب اصطکاک لاستیک نیتریل - فلز آلومینیوم با $R_a=0.58$ در حضور روان کارهای مایع.



شکل ۹- همبستگی مشخصه‌های ناهمواری سطح با ضریب اصطکاک ایستایی در حضور روان کارهای مایع.



شکل ۱۰- همبستگی مشخصه‌های ناهمواری سطح با ضریب اصطکاک سرشی در حضور روان کارهای مایع.

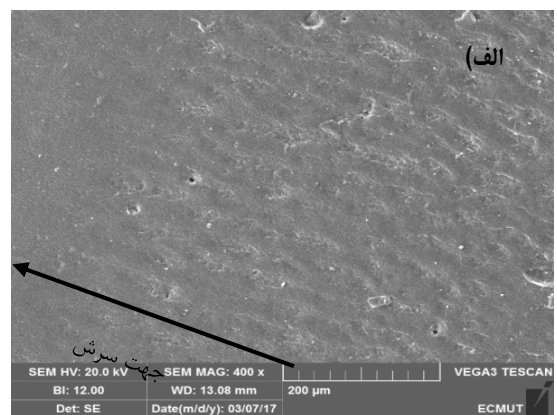
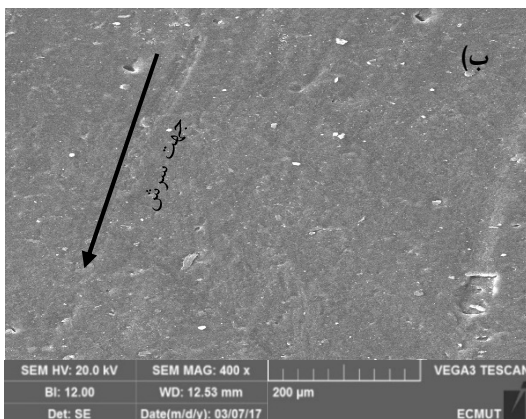
به سایر فلزات، فلزی نرم است و سطحی صاف دارد، در حالت خشک، در سطوح با برآمدگی‌های بسیار کم (P1500, P2500) عدم رخ دادن درگیری‌های فیزیکی و اتلاف و حاکمیت سازوکار چسبندگی، ضریب اصطکاک بالاتر است. اما با افزایش زبری سطح و بزرگ شدن برآمدگی‌های ناشی از آن، درگیری‌های بین سطوح در نقاط برآمدگی‌ها بیشتر شده و سطح واقعی تماس افزایش می‌یابد در نتیجه سازوکار چسبندگی کم می‌شود. همین امر موجب کاهش اصطکاک در این سطوح نسبت به حالت قبل است. البته با افزایش زبری سطوح تا ۰/۳۵ میکرون اصطکاک تقریباً ثابت شده است.

شکل (۱۲) الف و ب مورفولوژی سطح لاستیک نیتریل به هنگام سرش بر روی سطح آلومینیوم ناهموار در حضور دو روان کننده JP-10 و DMAZ را نشان می‌دهد. در این شکل به سبب وجود روان کننده بر

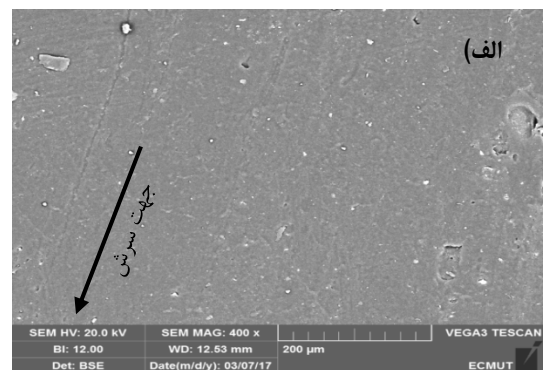
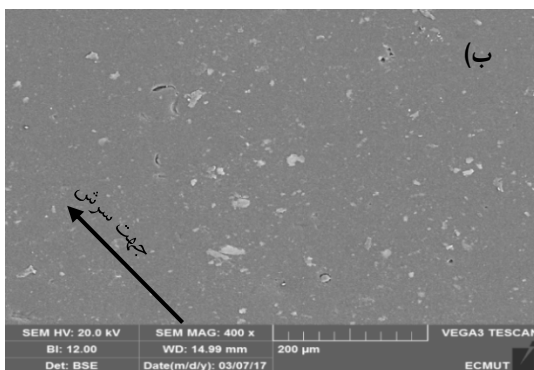
شکل (۱۱)، مورفولوژی سطح لاستیک نیتریل به هنگام سرش بر روی آلومینیوم پرداخت شده با سنباده‌های P1500 و P36 نشان می‌دهد. شیارهای در امتداد جهت سرش در کل سطوح ساییده شده لاستیک، نشان می‌دهد که پس از اصطکاک، توپوگرافی اصلی سطح تا حدی تغییر کرده است. بردار جهت سرش سطوح در تماس را نشان می‌دهد. به هنگام سرش لاستیک، در قسمت‌هایی از سطح لاستیک، شیارها و حفره‌های سطحی مشاهده می‌شود که به موجب کنده شدن برآمدگی‌ها در ناهمواری سطح ایجاد می‌شود. بنابراین در سطوح صیقلی سازوکار سایش ساییده نیز اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با کاهش زبری سطح، اندازه برآمدگی‌های سطح نیز کاهش یافته است و اثر درگیری‌های فیزیکی و اتلاف بر لاستیک نیتریل ناشی از این برآمدگی‌ها نیز تضعیف شده است. از آنجاکه آلومینیوم نسبت

اتلاف باقی می‌مانند. از اختلاف میان مقادیر سرش خشک و سرش در حضور سوخت‌های روان‌کننده در یک شرایط یکسان و معین، میزان سازوکار چسبندگی اصطکاک به‌دست می‌آید. از شکل (۱۳ و ۱۴) و بزرگی منحنی جزء چسبندگی و بیشتر بودن مقادیر آن از مقادیر دو سازوکار درگیری فیزیکی و اتلاف، نتیجه گرفته می‌شود که در تماس لاستیک نیتریل-فلز آلومینیوم، سازوکار حاکم، سازوکار چسبندگی است. از بررسی دقیق‌تر سازوکار چسبندگی مشاهده می‌شود همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، برای سطح پرداخت شده با کوچک‌ترین Ra، به سبب بالا بودن سطح واقعی تماس، جز چسبندگی به شدت قوی‌تر عمل می‌کند. بدین ترتیب هر چه زبری سطح افزایش می‌یابد، با زیاد شدن تعداد برآمدگی‌های سطوح و کم شدن سطح تماس واقعی لاستیک نیتریل-فلز آلومینیوم، اثر جز چسبندگی نیز کم شده و اثر سازوکار اتلاف و درگیری فیزیکی زیادتر می‌شود. اثر سازوکار اتلاف و درگیری فیزیکی در حضور سوخت JP-10 نسبت به سوخت DMAZ بیشتر است. البته با وجود افزایش اثر دو سازوکار اتلاف و درگیری فیزیکی با افزایش زبری سطح، باز هم اثر سازوکار چسبندگی برای سطح آلومینیوم بیشتر و سازوکار حاکم است.

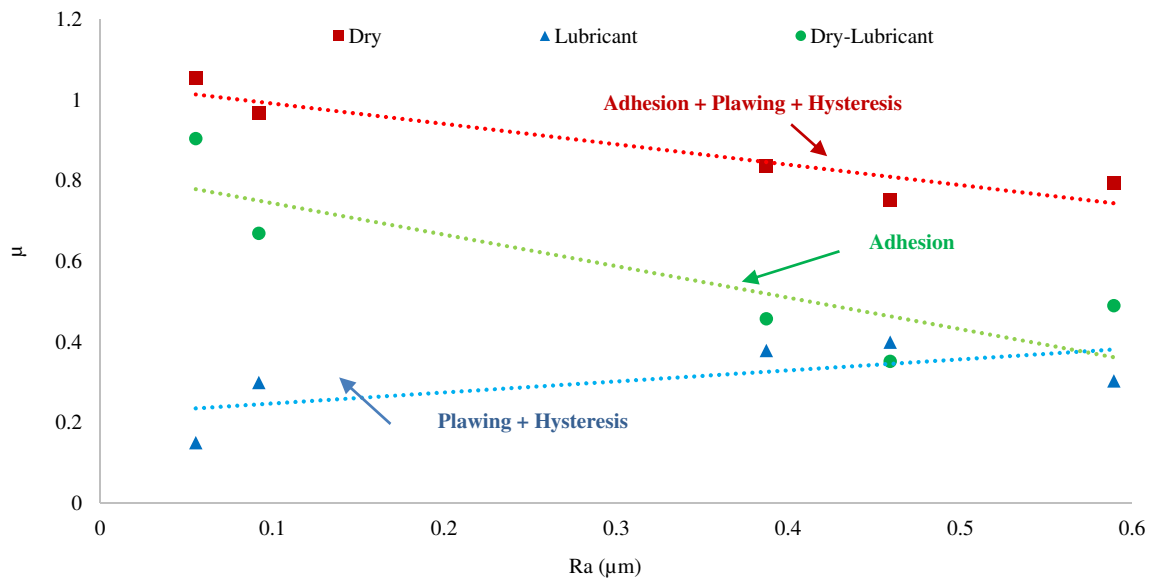
روی سطح و ایجاد لایه روان‌کاری، اثر درگیری‌های فیزیکی کم شده و عرض و عمق شیارهای روی سطح لاستیک تحت اصطکاک کاهش می‌یابد. همان‌طور که از مقایسه شکل (۱۱ و ۱۲) مشخص است، در حضور سوخت روان‌کننده، سطح لاستیک به هنگام سرش در مقابل سطح آلومینیوم به سبب تشکیل لایه فیلم روان‌کننده در سطح مشترک، آسیب کمتری دیده است. نتیجه گرفته می‌شود هرگاه سطح فلزی در تماس، دارای مشخصه‌های ناهمواری در اندازه مناسب باشد، بخشی از روان‌کننده در درون حفره‌های میکروبی سطح ناهمواری ذخیره می‌شود و به تشکیل بهتر لایه روان‌کننده بر سطح و از بین بردن اثر ناهمواری سطح کمک می‌کند و در نتیجه ضریب اصطکاک کمتر می‌شود. از مقایسه شکل (۱۲) الف و ب مشاهده می‌شود، در حضور روان‌کننده قطبی DMAZ نسبت به روان‌کننده غیر قطبی JP-10، ترک‌ها و شیارهای سطحی کاهش یافته‌اند و در نتیجه چین‌خوردگی در سطح کم شده است و ایجاد نقاط تمرکز تنش در سطح لاستیک وجود دارد. شکل‌های (۱۳ و ۱۴) تغییرات ضریب اصطکاک را به‌عنوان تابعی از شرایط آزمایش برای بررسی اثر سازوکارهای اصطکاک نشان می‌دهد. با اعمال سوخت‌های روان‌کننده مایع بر روی سطح سازوکار چسبندگی به‌طور کامل حذف می‌شود و تنها سازوکارهای درگیری‌های فیزیکی و



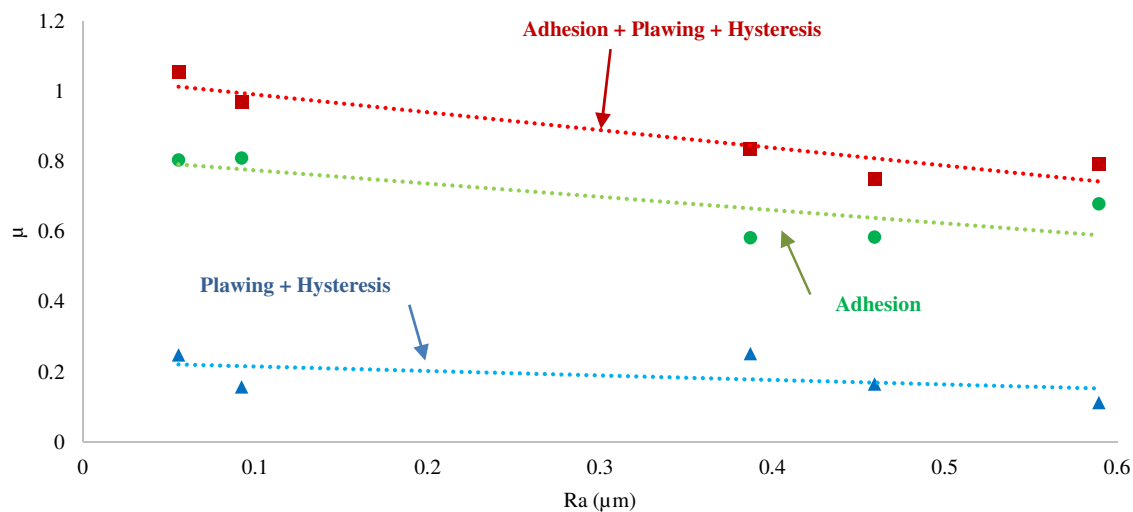
شکل ۱۱- مورفولوژی سطح لاستیک نیتریل به هنگام سرش خشک در برابر سطح آلومینیوم الف) $R_{a-P1500}=0.092$ و ب) $R_{a-P36}=0.459$.



شکل ۱۲- مورفولوژی لاستیک نیتریل در سرش بر آلومینیوم زبر در حضور روان‌کننده الف) غیر قطبی JP-10 و ب) قطبی DMAZ.



شکل ۱۳- مقایسه سازوکارهای اصطکاک در حضور روان کار غیر قطبی JP-10.



شکل ۱۴- مقایسه سازوکارهای اصطکاک در حضور روان کار قطبی DMAZ.

۴- نتیجه گیری

لایه روان کننده بر روی برآمدگی‌های سطح لاستیک ایجاد می‌شود که اثر برآمدگی‌های سطح بر ضریب اصطکاک را به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. میزان و سازوکار کاهش وابسته به میزان قطبی بودن سوخت روان کننده متفاوت است. در سطح زبر، سوخت DMAZ به‌عنوان روان کار قطبی و در سطح صاف و صیقلی، سوخت JP-10 به‌عنوان روان کار غیر قطبی عملکرد بهتری نشان دادند. با اعمال سوخت به عنوان روان کننده مایع و با حذف سازوکار چسبندگی و نیز کاهش سازوکار اتلاف، میزان تنش سطح لاستیکی کم شده و آسیب‌های کمتری به سطح لاستیک وارد می‌شود. بدین ترتیب برای کاهش اصطکاک لاستیک نیتریل با فلز آلومینیوم بدنه مخازن، در صورت استفاده از روان کننده‌های مایع، در برابر سطح زبر، روان کار قطبی و در برابر سطح صاف و صیقلی روان کار غیر قطبی پیشنهاد می‌شود. از

برای درک بهتر اثر سوخت‌های JP-10 و DMAZ و نقش متغیرهای ناهمواری سطح آلومینیوم، سرش لاستیک نیتریل بر سطح آلومینیوم بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ضریب اصطکاک به متغیرهای ناهمواری‌های سطح، شرایط آزمایش (خشک / روان کننده) و ماده روان کننده بستگی دارد. هم‌چنین به هنگام سرش لاستیک نرم در برابر سطح زبر سخت، ضریب اصطکاک لاستیک توسط ناهمواری سطح مشترک سطح سخت‌تر کنترل می‌شود. در ادامه بررسی‌ها، روند تغییرات ضریب اصطکاک با متغیرهای ناهمواری سطح سنجیده شد. مشاهده شد که در شرایط خشک، ضریب اصطکاک با متغیر R_a نسبت به دیگر متغیرهای ناهمواری سطح، همبستگی بهتری دارد. با اعمال سوخت‌های JP-10 و DMAZ به‌عنوان روان کار مایع بر سطح تماس،

- [7] Mofidi, M.; Prakash, B.; Persson, B. N. J.; Albohr, O. "Rubber Friction on (Apparently) Smooth Lubricated Surfaces"; *J. Phys-Condens. Matter* 2008, 20, 1-8.
- [8] Mofidi, M.; Kassfeldt, E.; Prakash, B. "Tribological Behaviour of an Elastomer Aged in Different Oils"; *Tribol. Int.* 2008, 41, 860-866.
- [9] Shen, M. X.; Peng, X. D.; Meng, X. K.; Dong, F.; Zhang, J. P.; Zhu, M. H. "Fretting Wear Behavior of Acrylonitrile-Butadiene Rubber (NBR) for Mechanical Seal Applications"; *Tribol. Int.* 2016, 93, 419-428.
- [10] Menezes, P. L.; Kilas, S. V. "Influence of Roughness Parameters on Coefficient of Friction under Lubricated Conditions"; *Sadhana* 2008, 33, 181-190.
- [11] Menezes, P. L.; Kailas, S. V. "Influence of Surface Texture and Roughness Parameters on Coefficient of Friction and Transfer Layer Formation During Sliding Aluminum Pin on Steel Plate"; *Wear* 2009, 267, 1534-1549.
- [12] Menezes, P. L.; Kailas, S. V.; Lovell, M. R. "Friction and Transfer Layer Formation in Polymer-Steel Tribo-System: Role of Surface Texture and Roughness Parameters"; *Wear* 2011, 271, 2213-2221.
- [13] Menezes, P. L.; Kailas, S. V. "Role of Surface Texture and Roughness Parameters on Friction and Transfer Film Formation When UHMWPE Sliding Against Steel"; *Biosurface and Biotribology* 2016, 2, 1-10.
- [14] Sedlaček, M.; Podgornik, B.; Vižintin, J. "Correlation between Standard Roughness Parameters Skewness and Kurtosis and Tribological Behavior of Contact Surfaces"; *Tribol. Int.* 2012, 48, 102-112.
- [15] Tang, Z.; Li, S. "A Review of Recent Developments of Friction Modifiers for Liquid Lubricants (2007-Present)"; *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 2014, 18, 119-139.
- [16] Hu, Z. M.; Dean, T. A. "A Study of Surface Topography, Friction and Lubricants in Metal Forming"; *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2000, 40, 1637-1649.
- [17] Rasp, W.; Wichern, C. M. "Effects of Surface-Topography Directionality and Lubrication Condition on Frictional Behavior during Plastic Deformation"; *J. Mater. Proc. Tech.* 2002, 125-126, 379-386.
- [18] Feng, D.; Shen, M. X.; Peng, X. D.; Meng, X. K. "Surface Roughness Effect on the Friction and Wear Behavior of Acrylonitrile Butadiene Rubber (NBR) Under Oil Lubrication"; *Tribol. Lett.* 2017, 65:10.
- [19] Razzaghi Kashani, M.; Behazin, E.; Fakhar, A. "Construction and Evaluation of a New Tribometer for Polymers"; *Polymer Testing* 2011, 30, 271-276.
- [20] Gadelmawla, E. S.; Koura, M. M.; Maksoud, T. M. A.; Elewa, I. M.; Soliman, H. H. "Roughness Parameters"; *J. Mater. Proc. Tech.* 2002, 123, 133-145.

طرفی با اعمال سوخت‌های روان‌کننده، برای سطح‌های فلزی همچون آلومینیوم، تأثیرات اندازه ذرات سنباده محدود است و از ۱۰۰ میکرون به بالا (P150 و شماره‌های سنباده پایین‌تر) کمتر می‌شود.

علائم اختصاری

| | |
|-------------------------|----------------------------|
| R_a | ناهمواری متوسط |
| R_q | ناهمواری جذر متوسط ریشه |
| R_z | متوسط ارتفاع ده نقطه‌ای |
| R_t | حداکثر ارتفاع قله تا گودی |
| Δa | متوسط شیب پروفایل |
| Δq | شیب جذب متوسط ریشه پروفایل |
| R_{sk} | متغیر عدم تقارن |
| R_{ku} | متغیر کشیدگی |
| Coefficient of friction | ضریب اصطکاک |
| F_s | اصطکاک ایستایی حداکثر |
| F_k | اصطکاک سرشی |

مراجع

- [1] Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W. "Engineering Tribology"; University of Western Australia, 2013.
- [2] Liang, L.; Zhao, S. H.; Zhu, L. L.; Yao, C. "Properties and Compression Morphological Characteristics of Hydrogenated Nitrile Rubber Filled with Nano-Fillers"; *Chin. Synth. Rubber Ind.* 2012.
- [3] Shen, M. X.; Dong, F.; Zhang, Z. X.; Meng, X. K.; Peng, X. D. "Effect of Abrasive Size on Friction and Wear Characteristics of Nitrile Butadiene Rubber (NBR) in Two-Body Abrasion"; *Tribol. Int.* 2016, 103, 1-11.
- [4] Huang, Y.; Salant, R. F. "Simulation of a Hydraulic Rod Seal with a Textured Rod and Starvation"; *Tribol. Int.* 2016, 95, 306-315.
- [5] Dong, C. L.; Yuan, C. Q.; Bai, X. Q.; Yan, X. P.; Peng, Z.; "Tribological Properties of Aged Nitrile Butadiene Rubber under Dry Sliding Conditions"; *Wear* 2015, 322-323, 226-237.
- [6] Persson, B. N.; Albohr, O.; Tartaglino, U.; Volokitin, A. I.; Tosatti, E. "On the Nature of Surface Roughness with Application to Contact Mechanics, Sealing, Rubber Friction and Adhesion"; *J. Phys-Condens. Matter* 2005, 17, R1-R62.