

اصطکاک شناسی مواد آببند لاستیکی

Tribology of elastomeric seal materials

چکیده:

آببندها مانع از نشت سیال یا گاز از دستگاه و ورود آلودگی به دستگاه می‌شوند. آببندها به دو دسته آببندهای پویا و ایستا تقسیم می‌شوند. بسته به نوع کاربرد و شرایط مورد استفاده آن‌ها می‌توانند از فلزات، پلاستیک‌های منعطف، لاستیک‌ها و مواد چندسازه ساخته شوند. لاستیک‌ها با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود پرکاربردترین مواد هستند. برخی از عوامل شایع در ایجاد وادادگی آببندها عبارتند از: طراحی، اندازه، برهم‌کنش روغن-لاستیک، سایش، شرایط محیطی و بارگذاری. بسیاری از این وادادگی‌ها مربوط به مسائل اصطکاک-شناسی می‌باشد. گرمایش اصطکاک می‌تواند باعث افزایش دما و تسریع تخریب شیمیایی یا حرارتی آببندهای لاستیکی شود. از طرفی درجه حرارت بالا می‌تواند سختی آببندهای لاستیکی را کاهش دهد و به دنبال آن وادادگی‌های دیگری را به دنبال داشته باشد. اصطکاک‌شناسی علم و فناوری برهم‌کنش سطوح در حال حرکت می‌باشد و شامل مطالعه و کاربرد اصول اصطکاک، رفتگی و روانکاری است. ضریب اصطکاک سطح لاستیک را می‌توان با توجه به عوامل موثر آن که شامل بخش‌های چسبش، تغییر شکل (پسماند)، گرانش و هم‌چسبی (پارگی) می‌باشد، بیان کرد. ضریب اصطکاک یکی از خواص کنترل کننده لاستیک در نوع رفتگی است. در حالت کلی رفتگی به سه نوع خستگی، سایشی، گول‌ه‌ای شدن رخ می‌دهد. در عمل ترکیبی از سه شکل رفتگی اتفاق می‌افتد و مشخص کردن سهم هر یک از آنان در طول رفتگی مشکل است. شناخت رفتار اصطکاک و سازوکار رفتگی لاستیک‌های ویژه آببندی در تعیین عملکرد و عمر سرویس‌دهی آنها مهم است و همچنین درک عمیق‌تر این رفتارها می‌تواند به طراح کمک کند تا موادی با خواص مناسب برای کاربردهای مشخص در آببندی انتخاب کند.

واژه‌های کلیدی: آببندهای لاستیکی، وادادگی آببندها، اصطکاک شناسی، رفتگی

نوع مقاله: ترجمه

گلرخ ذوالفقاری فرد^{۱*}، علی عباسیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پلیمر، دانشکده نفت و مهندسی شیمی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دکترای تخصصی، استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی پلیمر، تهران، ایران
* عهده دار مکاتبات:

golrokh.zolfaghari@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴

مقدمه:

آببند قسمتی است که مانع از نشت سیال یا گاز از دستگاه و ورود آلودگی به دستگاه می‌شود. لاستیک‌ها دارای ویژگی‌های کاملاً منحصر به فردی هستند که آنها را مواد مناسبی برای ساخت آببندها می‌کند.

اصطکاک شناختی لاستیک‌های آببندی شده در مرز یا روانکاری مخلوط زیاد بررسی نشده است. درک عمیق‌تر رفتارهای اصطکاک شناختی لاستیک‌ها می‌تواند به طراح کمک کند تا موادی با خواص مناسب برای کاربردهای مشخصی انتخاب کند.

آببندها و آببندی

کنترل جابجایی سیال بین دو ناحیه با مرز مشترک را آببندی می‌گویند. برخی ملاحظات مربوط به ساختار یا طراحی یا رواداری (tolerance) ممکن است فاصله‌ای بین دو سطح ایجاد کند که دیگر خودشان نتوانند عمل آببندی را انجام دهند. در این شرایط آببندها جسمی اضافه شونده بین دو سطح هستند که می‌تواند چنین فواصلی را به ابعاد کوچک‌تری کاهش دهند.

دسته‌بندی آببندها

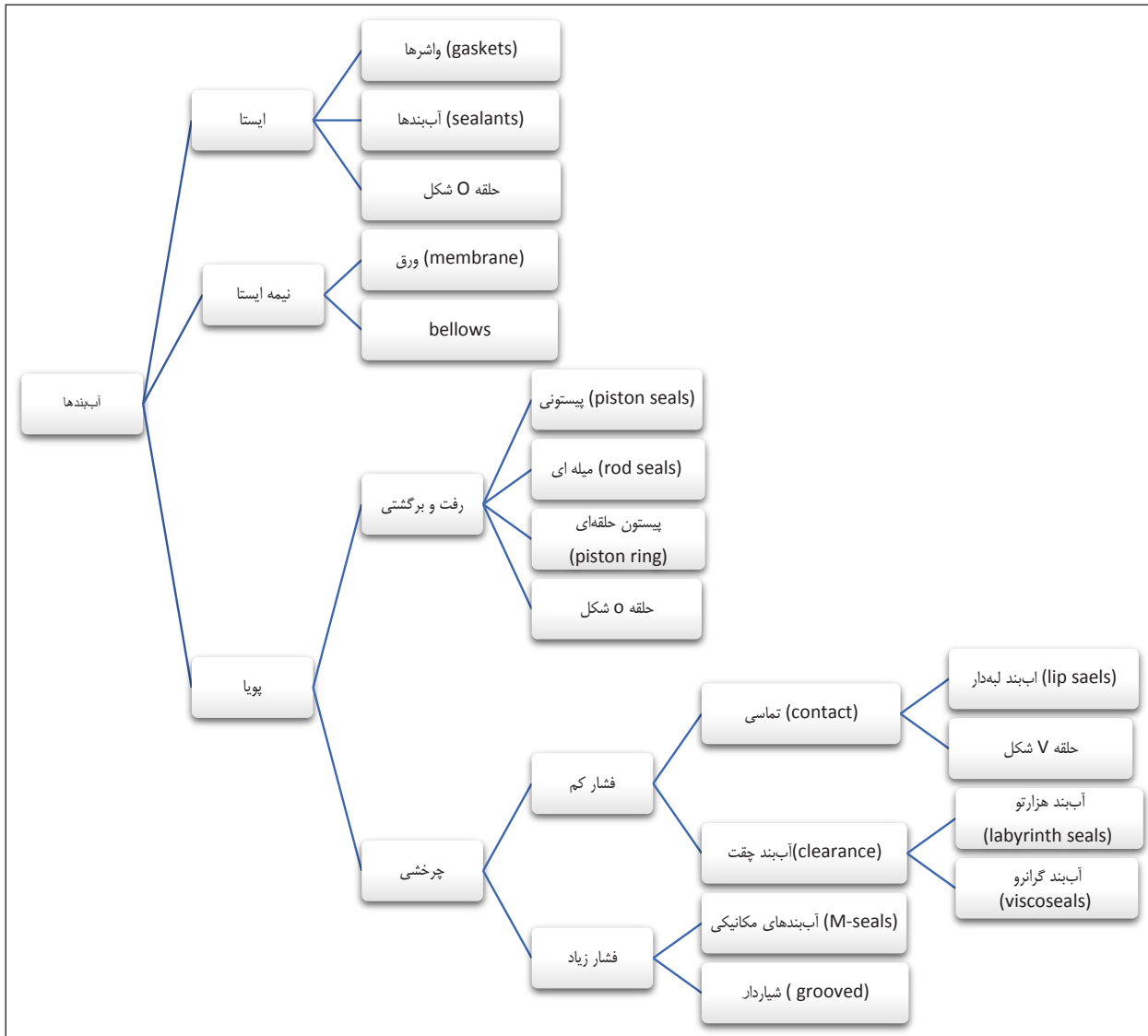
آببندها را می‌توان به دو دسته آببندهای ایستا و پویا تقسیم کرد. آببندهای ایستا عمل آببندی را بین دو سطحی که حرکت نسبی ندارند و آببندهای پویا عمل آببندی را بین دو سطحی که در حرکت نسبی هستند، ایجاد می‌کنند. دسته‌بندی آببندها در شکل ۱ نشان داده شده است. مسائل مربوط به اصطکاک شناختی در آب بندهای پویا به دلیل حرکت آنها بر روی سطوح آببندی شده قابل توجه است.

آببندهای ایستا و نیمه‌ایستا

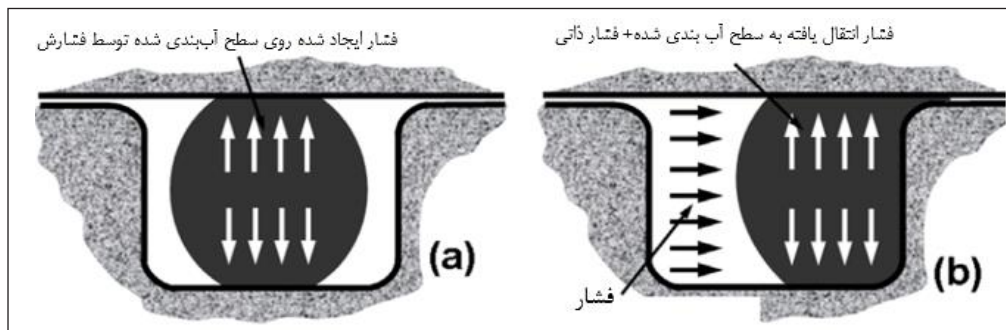
آببندهای ایستا در مکان‌هایی که حرکت نسبی بین دو سطح آب بندی شده وجود ندارد مورد استفاده قرار می‌گیرند. در آببندهای ایستا حرکت از طریق تغییر شکل کشسان آببند ممکن می‌شود. شکل ۲ آببند استاتیک حلقه‌ای O شکل را نشان می‌دهد. به دلیل انعطاف‌پذیری مواد لاستیکی و مقاومت آنها در برابر تغییر حجم فشار وارده به آببند به سطح آببندی شده انتقال می‌یابد. حلقه‌های O شکل در آببندهای رفت و برگشتی و گاه چرخشی نیز با همان سازوکار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بسیاری از آببندها (آببندهای پویا) روی سطحی که باید آببندی شود حرکت می‌کنند و برای کاهش نشتی، اصطکاک و رفتگی (wear) در طول عملکردشان باید بهینه‌سازی شوند. اصطکاک حرکتی یک آببند در برابر سطح آببندی‌شونده باید به حداقل رسانده شود تا هم عملکرد کلی دستگاه افزایش یابد و هم با کاهش ضخامت لایه روانکار، نشتی به حداقل برسد. به واسطه الگوهای شکل‌گرفته روی سطح آببند لاستیکی (که ممکن است در زمان تولید یا عملکردشان روی آنها به وجود آمده باشد) از نشتی می‌توان جلوگیری کرد، اما در برخی آببندها به عنوان مثال آببندهای رفت و برگشتی (reciprocating seal) با افزایش فشار تماس و کاهش ضخامت لایه روانکار، نشتی را می‌توان کاهش داد. در چنین شرایطی خطر ناکافی بودن روانکار و تماس مستقیم بین آببند لاستیکی و سطح آببندی شده وجود دارد و امکان دارد این خطر توسط عوامل دیگر مانند بارهای جانبی، ارتعاشات و سطح نهایی خوب پرداخت نشده تشدید شود.

امکان دارد آببندها از طریق سازوکارهای مختلف حاصله از نشتی یا آلودگی به روان‌کننده دچار وادادگی شوند. مهم‌ترین انواع وادادگی آببندها عبارتند از سایش (abrasion)، تخریب حرارتی، تخریب شیمیایی، مانایی فشاری، تخریب پلاسمایی، فشردگی بیش از حد، بیرون‌زدگی و از جا درآمدن. اصطکاک زیاد آببندها کارایی دستگاه‌ها را کاهش می‌دهد و هم‌چنین باعث افزایش دما و سرعت بخشیدن به وادادگی آببندها از طریق سازوکارهایی مانند تخریب حرارتی، تخریب شیمیایی، سایش و غیره می‌شود. اکثر آببندها در شرایط روانکاری شده عمل می‌کنند اما گاهی اوقات نیز ممکن است در شرایط خشک یا با روان‌کننده ناکافی حین کار عمل کنند. بدین ترتیب درک رفتار اصطکاک و سازوکار رفتگی لاستیک‌های ویژه آببندی در تعیین عملکرد و عمر سرویس‌دهی آنها مهم است. با اینکه رفتار اصطکاک لاستیک‌ها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است، اما بیشتر مطالعات قبلی مربوط به رفتار آنها در دو حالت شرایط خشک و یا روانکاری شده‌ی کامل می‌اشد. رفتار



شکل ۱- دسته بندی آببندها



شکل ۲- عملکرد یک حلقه O شکل لاستیکی: (a) بدون فشار اعمالی، (b) هنگامی که فشار اعمال می شود.

داده شده است، هنگامی که شفت می‌چرخد تنش برشی در لایه منجر به تغییر شکل ناصافی‌های سطح شده و آن‌ها را به صورت پره‌ای درمی‌آورد و باعث می‌شود مایع از سمت آب‌بند شده هوا به سمت روغن پمپ شود.

آب‌بندهای رفت و برگشتی

آب‌بندهای رفت و برگشتی عمل آب‌بندی را در زمان حرکت‌های رفت و برگشتی و در امتداد محور شفت بین عناصر بیرونی و درونی ایجاد می‌کنند (شکل ۴). آب‌بندهای رفت و برگشتی به آب‌بندهای پیستونی، میله‌ای و برف پاک‌کنی (wipers) تقسیم می‌شوند. رفتار آب‌بندهای میله‌ای و پیستونی شبیه به آب‌بندهای ایستای نشان داده‌شده در شکل ۲ است. تلاش‌های قابل توجهی برای توسعه مواد کاربردی، فناوری، شکل و هندسه، دقت و قابلیت اطمینان آب‌بندهای رفت و برگشتی برای بهبود ویژگی‌های کاربردی آنها مانند کاهش نشتی و اتلاف اصطکاکی، کاهش حجم محفظه مورد نیاز، افزایش عمر آب‌بندها و غیره صورت گرفته‌است. از آنجایی که معمولاً حلقه‌های O شکل و دیگر آب‌بندهای رفت و برگشتی لاستیکی با شکل متقارن عملکرد ضعیفی دارند در بسیاری از کاربردها از حلقه‌های V شکل، حلقه‌های U شکل یا ترکیبی از

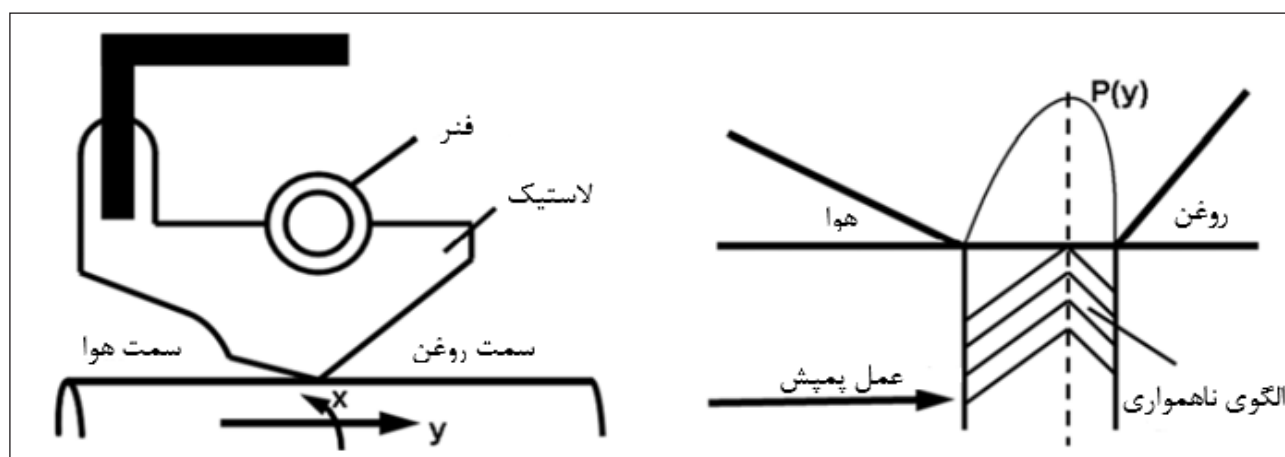
با توجه به این که در آب‌بندهای ایستا و نیمه‌ایستا هیچ حرکت نسبی بین سطوح آب‌بندی شده وجود ندارد، موضوع اصطکاک‌شناختی مهم نیست.

آب‌بندهای چرخشی

آب‌بندهای چرخشی عمل آب‌بندی را بین یک شفت در حال چرخش و یک سطح خارجی مانند سطح شیاردار یا بدنه‌ی توخالی ایجاد می‌کنند.

آب‌بندهای لبه‌دار چرخشی (rotary lip seals) از پرستفاده‌ترین آب‌بندهای پویا هستند. سطح آب‌بندی شده توسط یک لایه بسیار نازک از مایع آب‌بندی‌کننده روانکاری می‌شود. روانکاری دوگانه (یا مخلوطی از دو روش روانکاری) در سرعت‌های بسیار کم و در حین کار اتفاق می‌افتد.

شکل ۳ منطقه‌ای را در مجاورت ناحیه آب‌بندی شده نشان می‌دهد. یک لایه مایع نازک از کنار سطح شفت جدا می‌شود. ضخامت این لایه ۱ میکرومتر و طول آن ۰.۵-۱ میلی‌متر است. سازوکار پمپش وارو مانع از نشت روغن به سمت هوا می‌شود. دلایل متعددی برای توضیح پمپش وارو بیان شده‌است که مهم‌ترین دلیل آن تاثیر تغییر شکل برشی است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان



شکل ۳: شبیه‌سازی آب‌بندهای لبه‌دار چرخشی (سمت چپ) و سازوکار پمپش وارو (reverse pumping) در آب‌بندهای لبه‌دار چرخشی (سمت راست)

مواد آببند لاستیکی

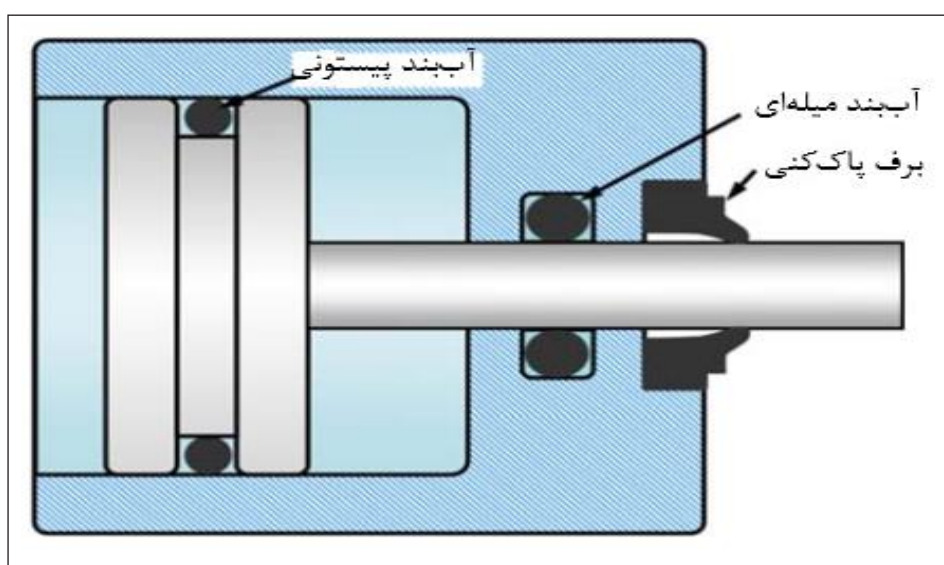
بسته به کاربرد: فلزات، پلاستیک‌های منعطف، لاستیک‌ها و مواد چندسازه می‌توانند تبدیل به آببند شوند. با این حال لاستیک‌ها محبوب‌ترین مواد آببند در کاربردهای عمومی هستند.

لاستیک‌ها دسته‌ای از مواد بسپاریند که دارای قابلیت ارتجاعی بوده بدان معنی که توانایی بازیابی شکل بعد از تغییر شکل را دارا می‌باشند، اما بین لاستیک خام و لاستیک شبکه‌ای شده تفاوت وجود دارد. در لاستیک خام چون ساختار شبکه‌ای سختی وجود ندارد رفتارشان مانند مواد روان‌شونده برشی است و در دماهای بالا تغییر شکل می‌دهند در مقابل لاستیک‌های شبکه‌ای شده به دلیل ساختار شبکه‌ای خود که حرکت بزرگ مولکول‌های زنجیره مولکولی را محدود می‌کند ناحیه انتقال شیشه‌ای ندارند.

لاستیک‌ها پدیده کرنش وابسته به زمان که گرانبه‌کشسانی (viscoelasticity) نامیده می‌شود را از خود نشان می‌دهند. و در هنگام تغییر شکل هر دو مشخصه گرانبه‌کشسانی و کشسان را از خود نشان می‌دهند. مواد گرانبه‌کشسانی اعمال تنش در برابر جریان برشی و

چند آببند مختلف استفاده می‌شود. برخی از آببندهای رفت و برگشتی برای بهبود عملکردشان با مواد سخت‌تری مانند فلزات یا بسپارهای سخت تقویت شده‌اند. هنگامی که یک حلقه U شکل به جای حلقه V شکل استفاده می‌شود، حجم محفظه مورد نیاز کاهش می‌یابد و عملکرد آن افزایش می‌یابد. این تغییر در مقدار متغیرها هنگامی که یک آببند فشرده چندسازه (به شکل چندسازه فشرده) (compact composite) مورد استفاده قرار می‌گیرد باعث ایجاد یک مرحله اضافی می‌شود.

آببندهای رفت و برگشتی در آغاز عملکردشان، اصطکاک بسیار زیادی دارند و میزان آن به طور قابل توجهی به میزان توقف قبلی وابسته است. هنگامی که آببند در حال حرکت از سطح آببندی شده روغن به سمت خشک (in-stroke) است، ضخامت لایه بسیار نازک و اصطکاک بالا است اما هنگامی که آببند در حال حرکت از سمت خشک به سمت روغن است (outstroke)، ضخامت لایه بسیار بیشتر و اصطکاک کمتر می‌شود. نشستی آببند با ضخامت لایه کامل در محل تماس که عمدتاً در زمان حرکت به سمت روغن ایجاد می‌شود متناسب است.

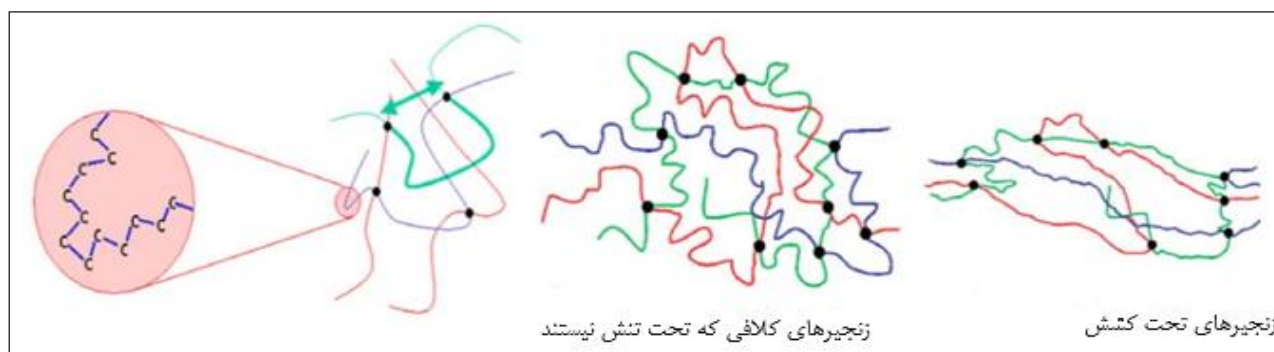


شکل ۴- تصویر شبیه‌سازی شده از انواع آببندهای رفت و برگشتی

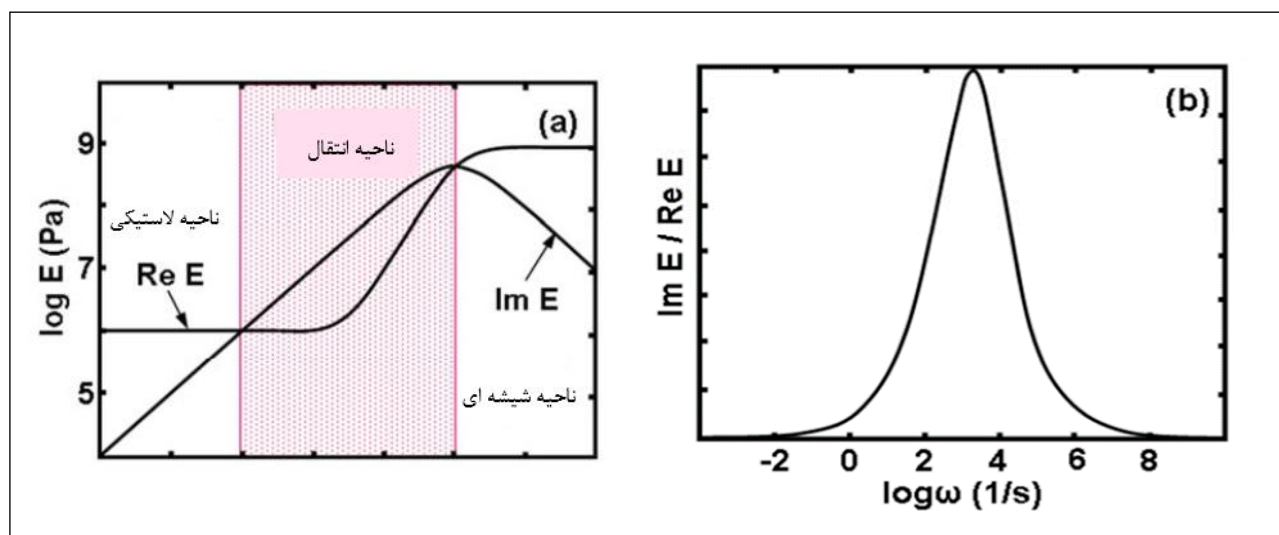
تنش و کرنش در یک فاز هستند یعنی واکنش یکی بلافاصله بعد از واکنش دیگری اتفاق می‌افتد. در مواد گرانو کروش بعد از تاخیر فاز ۹۰ درجه‌ای تنش به وقوع می‌پیوندد. مواد گرانو کروش رفتار مابین این دو مواد (مقداری تاخیر در کرنش) را از خود نشان می‌دهند. برای نشان دادن رابطه بین تنش و کرنش نوسانی می‌توان از مجموعه مدول پویای استفاده کرد. بخش حقیقی و بخش موهومی هستند و هم‌چنین اتلاف تانژانت E_2/E_1 در شکل ۶ نشان داده شده است.

در بسامدهای کم مواد در ناحیه لاستیکی قرار می‌گیرند و

کرنش خطی با زمان مقاومت می‌کنند. هنگامی که تنش اعمالی از روی مواد کشسان برداشته می‌شود سریعاً به حالت اصلی خود باز می‌گردند. مواد گرانو کروش هر دوی این خواص و کرنش وابسته به زمان را دارند. تغییر شکل یک ماده اریخت (amorphous) مستلزم جابه‌جایی اتمی بر روی صفحات بلورشناختی خاص مانند فلزات بلوری نیست. شکل ۵ یک شبیه‌سازی از زنجیره‌های لاستیکی در حالت تحت کشش و بدون کشش را نشان می‌دهد. هنگامی که کرنش‌های نوسانی کوچک یک ماده که حاصل از تنش وارده به آن است اندازه‌گیری می‌شود برای مواد کشسان



شکل ۵- شبیه‌سازی زنجیره‌های لاستیکی که تحت کشش قرار گرفته‌اند و زنجیره‌هایی که تحت کشش نیستند. نقطه‌ها نمایان گر اتصالات عرضی هستند.



شکل ۶- (a) مدول گرانو کروش نوعی از مواد شبه کشسان $E(\omega) = E_1 + iE_2$ ، (b) اتلاف تانژانت E_2/E_1

برهم‌کنش روغن-لاستیک

برهم‌کنش روغن‌لاستیک و مقاومت حرارتی لاستیک‌ها تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد، عمر و اطمینان بخشی سامانه‌های آب‌بندی شده دارد. زمانی که لاستیک و روغن با یکدیگر در تماس هستند ممکن است لاستیک، روغن را جذب کند یا روغن اجزای حل‌پذیر لاستیک را استخراج کند و یا روغن با لاستیک واکنش دهد. درجه برهم‌کنش بین مواد به خصوص مواد غیرقطبی مانند بسیاری از بسپارها پارامتر حالیت (پارامتر Hildebrand) تعریف می‌شود و به صورت δ نشان می‌دهند. این پارامتر توسط تقسیم ریشه مربع انرژی داخلی تبخیر بر حجم مولی مشخص می‌شود و به عنوان چگالی انرژی هم‌چسبی (cohesion) شناخته می‌شود. مواد با مقدار مشابه δ احتمالاً امتزاج پذیر هستند. وجود گروه‌های جانبی قطبی در مازه زنجیر (backbone) یک لاستیک باعث افزایش مقاومت بسپار به روغن می‌شود. اتصالات عرضی درجه تورم بسپار را از طریق وجود نقاط گره (محدودیت‌ها) کنترل می‌کنند و میزان حلال جذب شده به بسپار را محدود می‌سازند.

لاستیک‌ها ممکن است به دلیل قرار گرفتن در معرض گرما تغییراتی تصاعدی در خواص فیزیکی خود نشان دهند. سه نوع تغییر مشاهده شده است: اتصالات عرضی اضافی که منجر به افزایش چگالی اتصالات عرضی و سختی می‌شود، بریدگی زنجیره که منجر به کاهش طول زنجیره و وزن مولکولی متوسط شده و نرم شدن لاستیک را به دنبال دارد، تشکیل گروه‌های قطبی یا دیگر گروه‌ها از طریق جابه‌جایی شیمیایی زنجیره بسپاری. شکل ۷ مقاومت گرمایی روغن و لاستیک‌های مختلف را نشان می‌دهد. لاستیک نیتریل (NBR) یک هم‌بسپار از اکریلونیتریل و بوتادین است و از یک کائوچو ارزان قیمت با خواص مکانیکی خوب برای کاربردهای آب‌بندی تهیه می‌شود. غلظت اکریلونیتریل در هم‌بسپار تاثیر قابل توجهی بر قطبیت، ولکانش و تورم در حلال‌های غیر قطبی دارد. بیش‌ترین مقدار اکریلونیتریل در سوخت‌های موتور، روغن‌ها، چربی‌ها و غیره برای پایین آوردن میزان تورم استفاده

مقدار به نسبت کوچک و ثابتی دارد. در بسامدهای بسیار زیاد (ناحیه شیشه‌ای) ماده بسیار سفت می‌شود و بازهم میزان تقریباً ثابت است اما مقدار بسیار بزرگ‌تری (معمولاً به میزان بزرگی سه تا چهار مرتبه) نسبت به ناحیه لاستیکی دارد. در محدوده بسامدهای متوسط (ناحیه انتقال) اتلاف تانژانت بسیار زیاد است. افزایش دما طیف گرانش‌کشان را به بسامدهای بالاتر انتقال می‌دهد.

وادادگی آب‌بندهای لاستیکی

معمولاً برخی از عوامل باعث ایجاد وادادگی در آب‌بندها می‌شوند. شایع‌ترین عوامل عبارتند از: طراحی، اندازه، برهم‌کنش روغن‌لاستیک، سایش، شرایط محیطی، نصب و شرایط بارگذاری. بسیاری از این وادادگی‌ها مربوط به مسائل اصطکاک‌شناختی می‌باشد. گرمایش اصطکاک می‌تواند باعث افزایش دما و تسریع تخریب شیمیایی یا حرارتی آب‌بندهای لاستیکی شود. درجه حرارت بالا می‌تواند سختی آب‌بندهای لاستیکی را کاهش دهد که در نتیجه ممکن است باعث انواع دیگر وادادگی مانند وادادگی حلزونی (spiral failure)، تجزیه انفجاری و بیرون‌زدگی شود. غیریکنواختی اصطکاک ممکن است سبب پیچ خوردن شدن حلقه O شکل و وادادگی حلزونی بشود. اصطکاک غیریکنواخت ممکن است بر اثر لقی زیاد به همراه بارهای جانبی، ناهم‌سویی اجزا، پرداخت نایکنواخت سطح یا روانکاری ناکافی ایجاد شود.

اصطکاک‌شناسی لاستیک‌ها

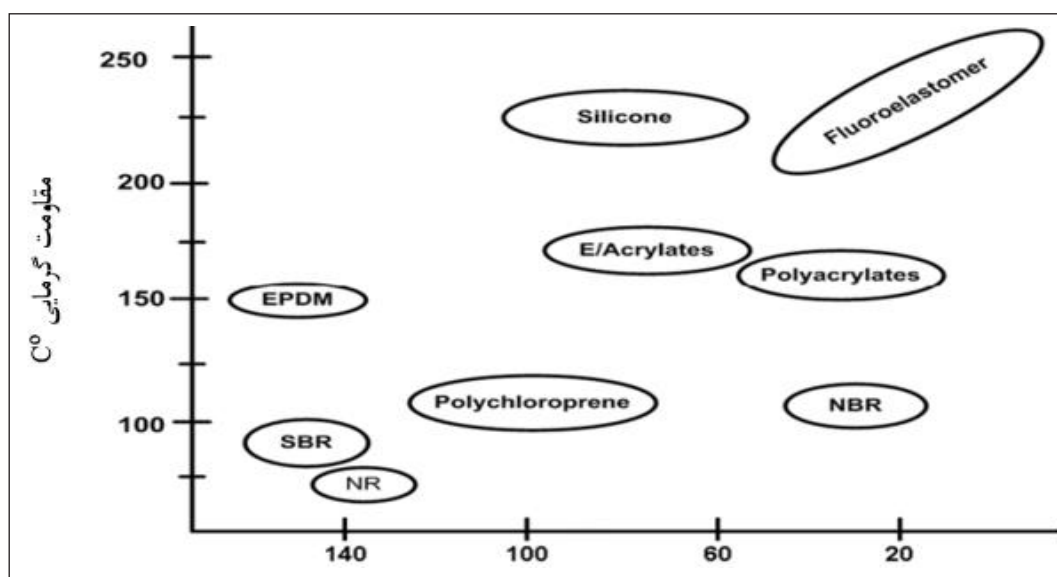
اصطکاک‌شناسی علم و فناوری برهم‌کنش سطوح در حال حرکت می‌باشد، که شامل مطالعه و کاربرد اصول اصطکاک، رفتگی و روانکاری است. بسیاری از لاستیک‌ها مانند آب‌بندها، تایر خودرو، برف پاک‌کن شیشه جلو خودرو، کمربندها و غیره با دیگر سطوح در حال حرکت برهم‌کنش دارند و با توجه به خواص ویژه لاستیک‌ها مطالعات تحقیقاتی مربوط به ویژگی‌های اصطکاک‌شناسی آنها کار مهمی در علم و فناوری است.

اطمینان از سازگاری معمولاً دو یا سه نوع نرم‌کننده در آمیزه‌های NBR استفاده می‌شود. برای NBR های حاوی مقادیر زیاد ACN، نرم‌کننده‌های قطبی توصیه می‌شوند.

لاستیک نیتریل هیدروژن‌دار شده (HNBR) توسط یاریگر (کاتالیزگر) هیدروژن‌دار از لاستیک نیتریل تولید می‌شود. مواد HNBR در مقایسه با NBRها در برابر پاداکسندها (antioxidant) و حملات گوگردی در دماهای بالا مقاوم‌ترند و انعطاف‌پذیری و چقرمگی (toughness) NBRها را با دما و مقاومت شیمیایی آنها را بهبود بخشیدند. HNBR و NBRها را می‌توان با بسیاری از نرم‌کننده‌ها ترکیب کرد. برای آمیزه‌های HNBR نیز دوده پرکننده اصلی است. نرم‌کننده‌های مورد استفاده با HNBR نباید فرار باشند چون از مقاومت گرمایی کلی این آمیزه می‌کاهند.

لاستیک اکریلیک (ACM) یک نوع لاستیک حاوی اکریلونیتریل است. این هم‌بسیار از دو جزء اصلی شامل ماز زنجیر (۹۵-۹۹٪) و بخش واکنشگر پخت (۱-۵٪) تشکیل می‌شود. از ویژگی برجسته لاستیک ACM مقاومت آن به روغن داغ است. مقاومت گرمایی،

می‌شود. دوده پرکننده اصلی برای آمیزه‌های NBR است و بهبود خواص آمیزه‌ها را در پی دارد. که این خواص شامل استحکام کششی و پارگی، مقاومت سایشی، مقاومت شیمیایی، جهندگی، مانایی فشاری کم و خواص خوب فرآیندی می‌شود. انواع اصلی پرکننده‌های غیر دوده‌ای که در لاستیک نیتریل استفاده می‌شوند عبارتند از: سیلیس، سیلیکات، کائولن، کربنات کلسیم، سولفات باریم، تیتانیوم دی‌اکسید، آلومینیوم تری‌اکسید، آنتیمون تری‌اکسید، منیزیم هیدروکسید، روی اکسید. با توجه به اینکه لاستیک نیتریل قطبی است باید نرم‌کننده قطبی با این لاستیک مورد استفاده قرار گیرد. روغن‌های آروماتیک بسیاری برای کاهش هزینه در مقادیر محدود با NBR دارای اکریلونیتریل (ACN) کمتر از ۲۸٪ مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همان میزان که ACN در لاستیک نیتریل افزایش می‌یابد قطبیت لاستیک نیز افزایش یافته و میزان سازگاری با نرم‌کننده کمتر می‌شود. بنابراین فقط مقادیر کمتری از روغن را می‌توان با لاستیک مخلوط کرد که منجر به تراوش یا خروج آن از سطح قطعه ولکانیده نشود. برای



شکل ۷- مقاومت روغن (درصد تورم در ASTM oil #3)

(Hysteretic friction) (شکل ۸) نتیجه از دست دادن انرژی بر اثر میرایش داخلی درون جسم گرانوگشسان است. بخش همچسبی یا پارگی اصطکاک در واقع همان بخش رفتگی است که منجر به از دست رفتن بخشی از ماده می‌شود و بخش گرانو اصطکاک نیز نیروی غزکی گرانو (viscous drag) در شرایط خیس است.

بیشتر متون فقط دو بخش برای اجزای اصطکاک مطرح کرده‌اند زیرا جزء تغییرشکل می‌تواند هر دو مولفه پسماند و پارگی را نشان دهد و جزء گرانو اصطکاک می‌تواند زیرمجموعه‌ای از مولفه چسبش باشد. مطالعات اخیر تنها با یک فرض ساده استقلال اجزای چسبش و تغییرشکل در اصطکاک را نشان می‌دهند. اگر فرض شود که نیروی چسبندگی در واحد سطح در طول هر تغییر شکل باید ثابت باشد و در حالی که می‌دانیم انرژی آزاد سطحی تابعی از هردو انرژی داخلی و آنتروپی است پس اگر انرژی داخلی یا آنتروپی تغییر کند تغییرشکل توده را نیز به دنبال دارد.

بخش‌های چسبش و پسماند اصطکاک به دما، سرعت سرش (sliding)، هندسه و تمیزی سطوح اتصال بستگی دارند. بخش چسبش زمانی مورد توجه است که لاستیک بر روی سطح بسیار تمیز، خشک و صاف سر می‌خورد. هم‌چنین می‌تواند در بارهای کم حتی در شرایط روانکاری شده به دلیل اهمیت نیروهای جاذب و اندروالسی در پیوندهای موقتی بین سطوح در مقایسه با بار عمودی قابل توجه باشد.

مطالعات قبلی بر روی اصطکاک لاستیک عمدتاً بر روی بخش پسماند که مهم‌ترین بخش در کاربردهای حقیقی می‌باشد متمرکز شده است. نظریه‌ای در مورد اتلاف انرژی در سرش لاستیک روی یک سطح سخت توسط پرسن ارائه شده است. اصطکاک پسماندی لاستیک در هنگام سر خوردن بر روی یک سطح سخت به نسبت دامنه بر طول موج ناهمواری سطح بستگی دارد. اگر این نسبت ثابت باشد، احتمالاً ناهمواری‌های سطح با مقادیر مختلف تاثیر یکسانی بر نیروی اصطکاکی دارند.

هنگامی که لاستیک در برابر یک سطح سخت و ناهموار با

مقاومت در برابر هوا، ازون و پیرش (ageing) طبیعی آن از NBRها بیشتر است. اما مقاومت آن در برابر رفتگی و تورم روغن کم است. پرکننده‌هایی که در ACM مورد استفاده قرار می‌گیرند باید خنثی یا بازی باشند تا از دخالت در واکنش ولکانش جلوگیری شود. برای بهبود خواص مکانیکی در ACM از پرکننده‌های سیلیکات و دوده فعال استفاده می‌شود. هم‌چنین از ترکیب سیلیس با آلومینیم سیلیکات یا رس‌های اصلاح شده با مواد آلی نیز توصیه می‌شود. نرم‌کننده‌ها معمولاً در آمیزه‌های ACM استفاده نمی‌شوند اما امکان دارد بعضی از نرم‌کننده‌ها با میزان فراریت کم برای بهبود انعطاف‌پذیری در دماهای پایین مورد استفاده قرار بگیرد.

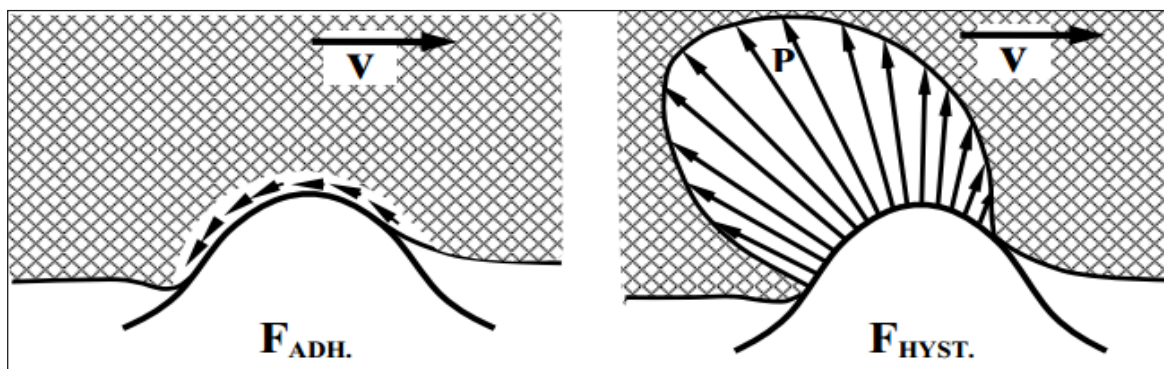
به طور معمول لاستیک‌های فلوئور در محیط‌های سخت که دیگر لاستیک‌ها و می‌دهند مورد استفاده قرار می‌گیرند. از دو ویژگی اصلی لاستیک‌های فلوئور مقاومت شیمیایی و گرمایی است که برای کاربردهای آب‌بندی مورد توجه قرار می‌گیرد. FKM نامی است که برای خانواده بزرگ لاستیک‌های فلوئور حاوی تک‌پار وینیلیدین فلوئورید انتخاب شده است. لاستیک‌های فلوئور از لاستیک‌های اکریلیک و نیتریل گران‌تر هستند. برای فراهم کردن قابلیت فراورش خوب، سختی مطلوب و کاهش هزینه‌های آمیزه از پرکننده‌های معدنی و دوده‌های غیر تقویت‌کننده استفاده می‌شود. نرم‌کننده‌های معمولی مانند نرم‌کننده‌های استری با FKM سازگار نیستند. برای بهبود قابلیت پردازش لاستیک‌های فلوئور از آمیزه‌های ویژه (به خصوص بسپارهایی با وزن مولکولی کم) استفاده می‌شود.

اصطکاک

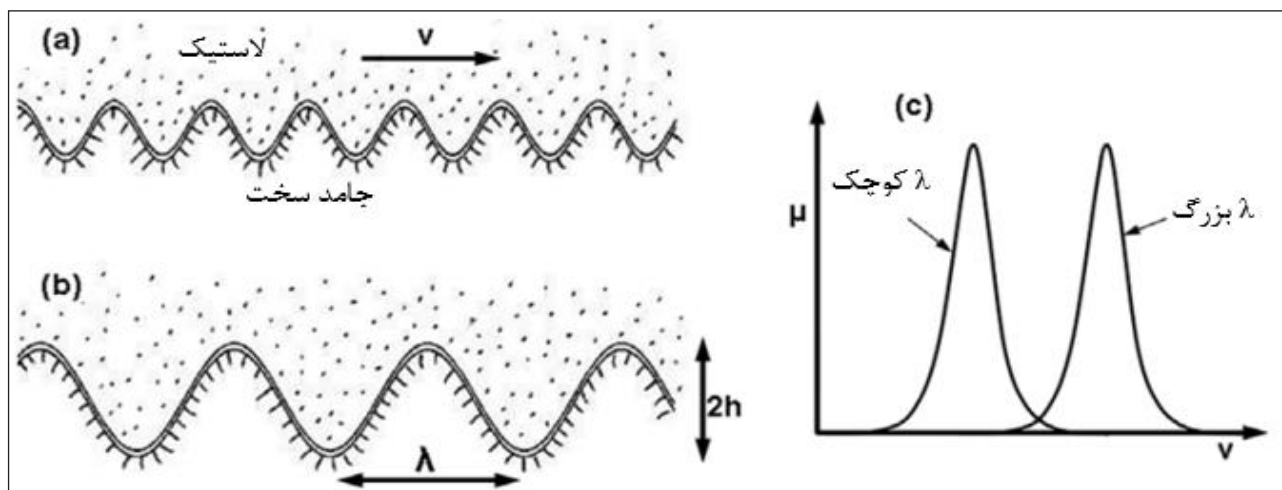
ضریب اصطکاک سطح لاستیک روی یک سطح سخت را می‌توان با توجه به عوامل موثر بر آن شامل بخش‌های چسبش (adhesion)، تغییرشکل (پسماند) گرانو و هم‌چسبی (cohesion) (پارگی) بیان کرد. به طور کلی چسبش (شکل ۸) به عنوان ساخت و شکست اتصالات در یک سطح مولکولی شناخته می‌شود. پسماند اصطکاکی

مختلف ناهمواری سطح در شکل ۹ شبیه‌سازی شده است. هنگامی که لاستیک روی یک سطح سخت سر می‌خورد گرمایش اصطکاکی باعث افزایش دما می‌شود و در نتیجه طیف گرانش و کشسان به بسامدهای بالاتر انتقال پیدا می‌کند. از آنجایی که در بیشتر کاربردها بسامدهای زیر ایجاد آشفستگی می‌کنند (جایی که $|\text{Im } E(\omega)|/|E(\omega)|$ بیشترین میزان است) افزایش دما (به واسطه گرمای اصطکاکی) باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. هنگامی که یک لاستیک نرم بر یک سطح سخت سر می‌خورد

ناهمواری‌هایی به طول λ سر می‌خورد در معرض نیروهای نوسانی با بسامد قرار می‌گیرد. از آنجایی که یک سطح واقعی دارای ناهمواری‌هایی با توزیع گسترده‌ای از طول‌های مختلف است. سهم ناهمواری سطح با میزان طول λ و ضریب اصطکاک μ زمانی به بیشترین میزان خود می‌رسد که برقرار باشد این در جایی است که بسامد در $(\text{Im } E(\omega)/|E(\omega)|)$ به بیشترین میزان خود می‌رسد. این نقطه در ناحیه انتقال بین ناحیه لاستیکی (بسامدهای کم) و ناحیه شیشه‌ای (بسامدهای زیاد) قرار دارد. سهم میزان طول‌های



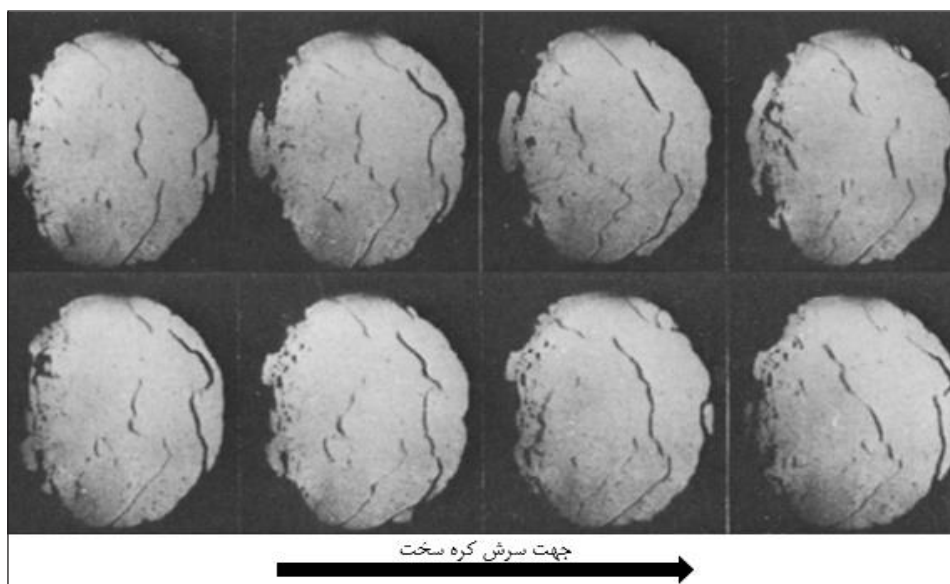
شکل ۸- اجزای چسبش و پسماند اصطکاک لاستیک‌ها



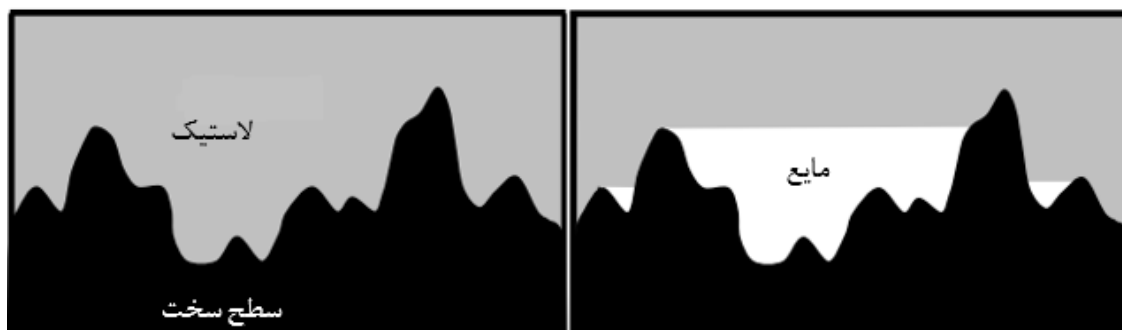
شکل ۹: حرکت لاستیک روی یک سطح سخت موج‌دار. مقدار سهم برای اصطکاک بر اثر میرایش (damping) داخلی لاستیک در (a) و (b) مشابه است زیرا نسبت بین دامنه و طول موج یکسان است. (c) شبیه‌سازی منحنی‌های برای پروفایل ناهمواری‌های (a) و (b) می‌باشد.

کروی بر روی سطح لاستیک را نشان می‌دهد. روانکار، سطح تماس واقعی بین لاستیک و سطح سخت را کاهش می‌دهد در نتیجه موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. حضور مایع بین لاستیک و لایه سخت نه تنها باعث کاهش چسبش می‌شود بلکه بخشی از جزء پسماند اصطکاک را نیز کاهش می‌دهد. در یک سطح روانکاری شده فرورفتگی‌های سطح پر از مایع شده و به طور موثری سطح را هموار کرده و منافذ را می‌بندد (شکل ۱۱). صافی سطح، تغییر شکل گرانشی ناشی از ناهمواری سطح را کاهش می‌دهد و باعث کاهش اصطکاک لاستیک می‌شود.

یا برعکس یک سرنده سخت بر روی یک سطح لاستیکی نرم سر می‌خورد، یک حرکت نسبی بین این دو عضو تحت اصطکاک به دلیل موج‌های جدایشی (waves of detachment) در سطح تماس دو عضو از جلو به عقب دیده می‌شود. این امواج که حرکتی بسیار سریع‌تر از دو جسم در سرش دارند به نام محقق که اولین بار آن‌ها را توصیف کرد امواج شالاماک نامیده شدند. امواج شالاماک در یک سرعت سرشی بحرانی ظاهر می‌شوند که مقدار آن بستگی به خواص چسبندگی فصل مشترک، مشخصات هندسه محل تماس، خواص کشسانی مواد شبه‌لاستیکی، بار عمودی و دما دارد. شکل ۱۰ امواج شالاماک تولید شده به وسیله یک سرنده



شکل ۱۰- امواج شالاماک که توسط یک کره سخت با سرعت سرشی 0.43 mm/s روی سطح لاستیکی ایجاد شده است (۸ عکس در فواصل 1.32 s).



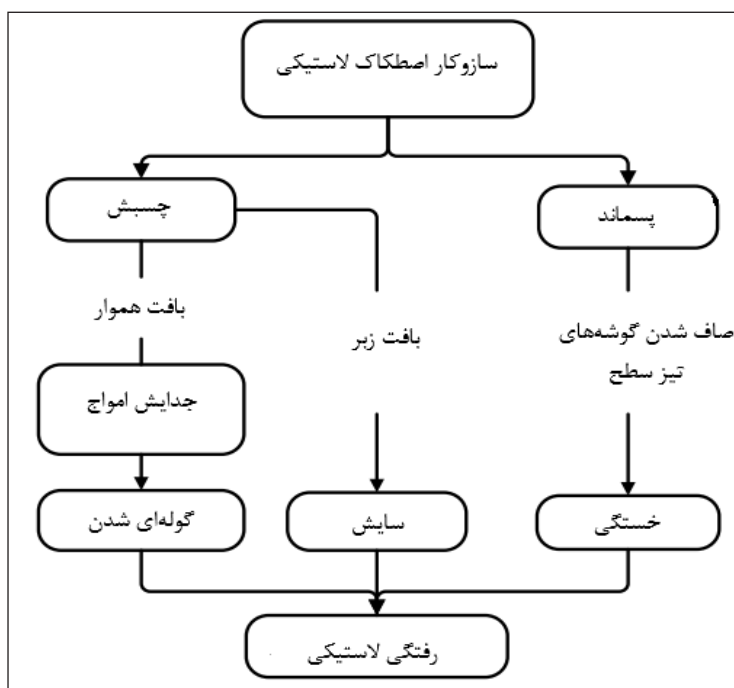
شکل ۱۱- هموار شدن سطح در حضور روان‌کننده

رفتگی (wear)

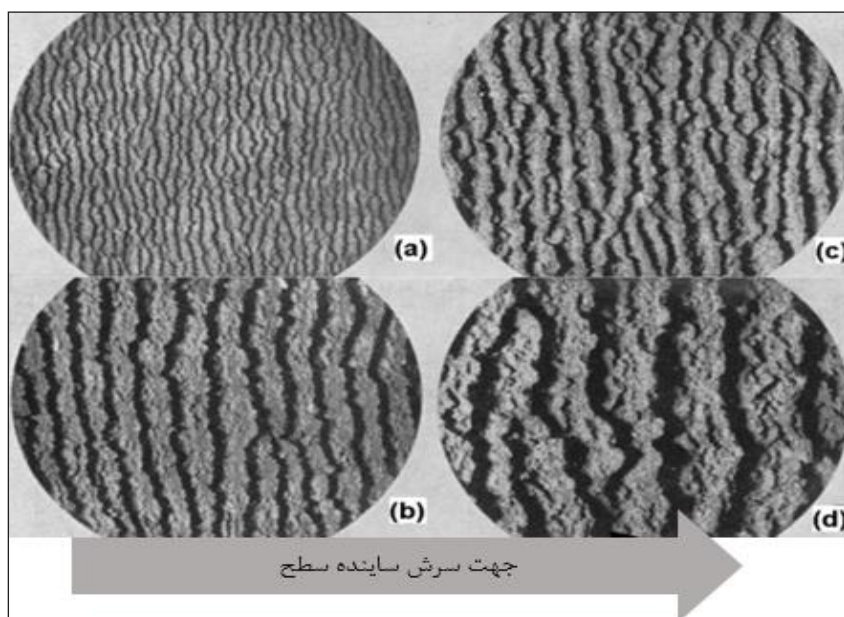
رفتگی لاستیک‌ها را نشان می‌دهد.

در عمل ترکیبی از سه شکل رفتگی اتفاق می‌افتد و مشخص کردن سهم هر یک از آنان در طول رفتگی مشکل است. هنگامی که لاستیک بدون تغییر در جهت سرش ساییده می‌شود مجموعه‌ای از برآمدگی‌های موازی روی نمونه و در جهت عمود بر جهت حرکت ایجاد می‌شود. که "الگوهای سایش" نامیده شده‌اند. شدت آن‌ها با افزایش ناهمواری مسیر و کاهش سفتی آمیزه افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ چند نوع از سطح لاستیک طبیعی ساییده شده را نشان می‌دهد. سطوح لاستیک ساییده شده توسط رفتگی خستگی علائم حفره ماندنی را نشان می‌دهند در حالی که سطوح لاستیک سخت‌تر در برابر ناهمواری‌های تیز، خراش‌هایی موازی با جهت سرش را نشان می‌دهند. خراش‌های موازی با جهت سرش، بر روی سطح لاستیک‌های ساییده شده در نقاط تماس با ناهمواری‌های تیز رخ می‌دهد. شکل ۱۴ نوعی از سطح ساییده شده لاستیک نیتریل هیدروژن دار شده را نشان می‌دهد که توسط خراش‌های موازی با جهت سرش مشخص شده است.

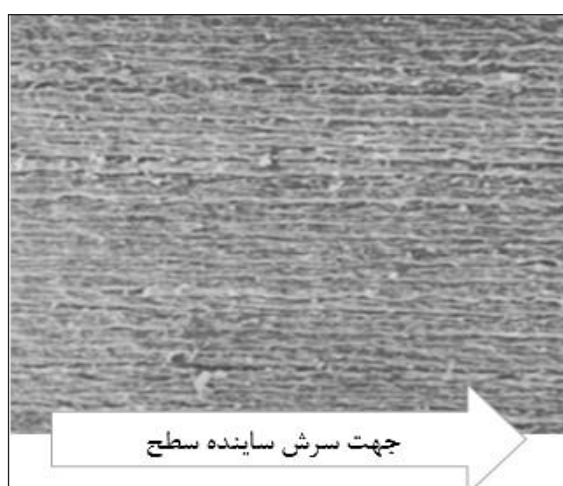
هنگامی که یک لاستیک بر روی یک سطح سخت سر می‌خورد سه سازوکار متفاوت از رفتگی می‌تواند رخ دهد. در طول سرش بر روی سطح سخت با بافت تیز به علت پارگی سطح سرش لاستیک، رفتگی سایشی اتفاق می‌افتد. رفتگی خستگی یکی دیگر از سازوکارهای رفتگی می‌باشد که هنگام سرش سطح لاستیک روی برآمدگی‌های لایه سخت اتفاق می‌افتد. هنگامی که یک لاستیک بسیار کشسان روی یک سطح هموار سر می‌خورد سطح لاستیک گوله‌ای می‌شود (roll formation). در این نوع رفتگی نیروی اصطکاک بالا، طرح روی لاستیک و رویه‌ها را می‌برد و سپس زبانه در طول جهت سرش می‌چرخد. مقدار تنش برشی بحرانی برای هر لاستیک این گونه تعریف می‌شود که اگر تنش برشی از تنش برشی بحرانی بیش‌تر شود گوله‌ای شدن رخ می‌دهد. در تنش‌های برشی کمتر از مقدار بحرانی رفتگی عمدتاً به دلیل خستگی است. بنابراین ضریب اصطکاک یکی از مهم‌ترین خواص کنترل‌کننده لاستیک در نوع رفتگی است. شکل ۱۲ نموداری از سازوکارهای اصطکاک و



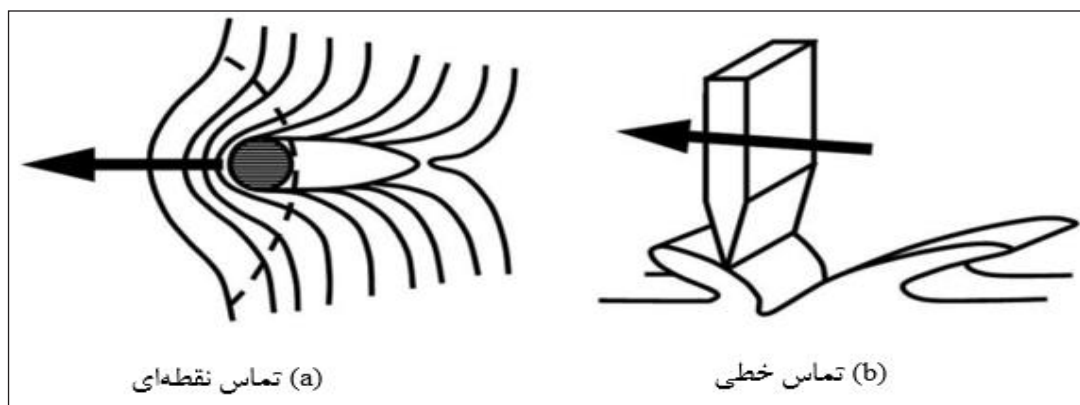
شکل ۱۲- نمودار شبیه‌سازی شده از سازوکارهای اصطکاک و رفتگی در لاستیک‌ها



شکل ۱۳- الگوهای سایش بر روی دو لاستیک طبیعی متفاوت پر شده با دوده (a) و (c) لاستیک سخت، (b) و (d) لاستیک نرم، (a) و (b) مسیر سایشی ریز، (b) و (d) مسیر سایشی درشت



شکل ۱۴- خراش روی سطح ساییده شده لاستیک نیتریل هیدروژن‌دار در دمای ۲۵°C.



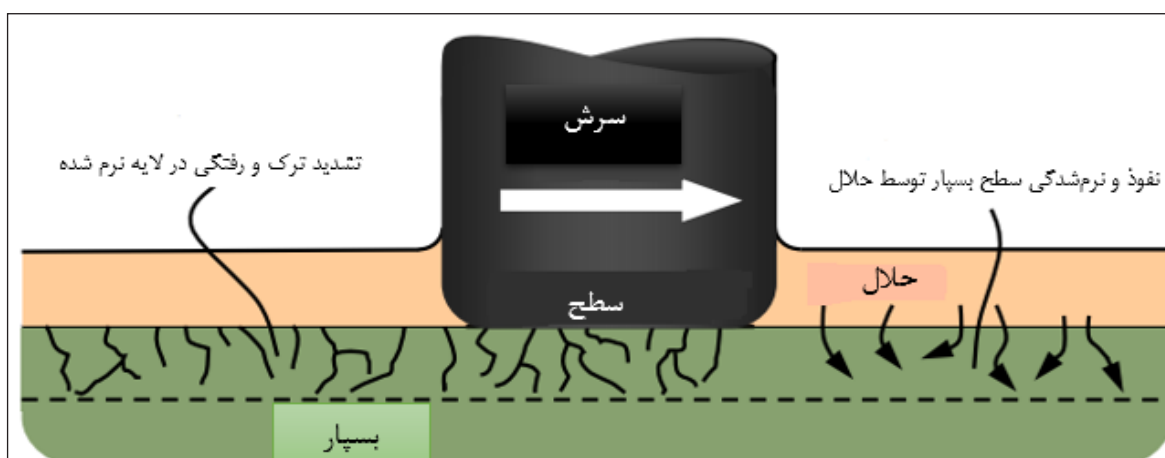
شکل ۱۵- سازوکار تشکیل خراش و برآمدگی روی سطح سرش لاستیک؛ (a) تشکیل خراش و (b) تشکیل برآمدگی

آلی محلول هستند و می‌توانند یک اثر هم‌افزا بین حلال خورنده و بسیار داشته باشند که باعث رفتگی قابل توجهی شوند. اگر حلال بتواند به سطح بسیار نفوذ کند اثر مخربی روی رفتار بسیار خواهد داشت و منجر به رفتگی سریع در اثر ترک‌زایی سریع می‌گردد که به دلیل تضعیف بسیار توسط حلال در تماس با سطح مقابل است. این به صورت شبیه‌سازی شده در شکل ۱۶ نشان داده شده است. باور بر این است هنگامی که پارامتر حلالیت بسیار و حلال مشابه باشد آهنگ رفتگی به حداکثر میزان خود می‌رسد.

موهر و همکارانش تاثیر روانکار بر روی سایش لاستیک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که وقتی یک روانکار هنگام سایش لاستیک توسط تیغه در تماس خطی اعمال می‌شود الگوی بسیار ریزی توسعه می‌یابد و آهنگ سایش بسیار پایین است اما نیروی افقی روی تیغه به طور چشمگیری کاهش نمی‌یابد. با این حال هنگامی که یک ساینده دارای لبه ضخیم بر روی سطح لاستیک سر می‌خورد نیروی افقی در حضور یک روانکار به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. چاندرسکان و بچلر اصطکاک و رفتگی به واسطه سرش لاستیک بیوتیل بر روی کاغذ ساینده به عنوان تابعی از دما و نیرو را مطالعه کردند. آن‌ها آزمایش‌های سرش تک‌جهته در حضور روانکار و شرایط خشک را انجام دادند و گزارش کردند که ضریب اصطکاک در حضور روانکار کاهش می‌یابد اما به علت تخریب شیمیایی لاستیک رفتگی سرعت می‌گیرد.

شالاماک و گروهش دریافتند که آهنگ رفتگی خطی روی یک مسیر تیز مانند کاغذ ساینده همانند نتیجه وادادگی کششی با نسبت اتلاف انرژی اصطکاکی به چگالی انرژی در شکست متناسب است. سایش سطوح لاستیکی در تماس خطی به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است اما بیشتر مطالعات قبلی بر روی سایش خشک لاستیک متمرکز بوده است. سائرن و توماس سایش سطح لاستیک توسط یک تیغه تیز در تماس خطی مورد مطالعه قرار دادند و یک نظریه‌ای ارائه دادند که رابطه بین آهنگ رفتگی و نیروی اصطکاکی و همچنین مشخصات رشد ترک‌های لاستیک را توصیف کند. آن‌ها همچنین بیان کردند که فاصله الگوها به نیروی ساینده و دمای آزمایش بستگی دارد. جانگ و یانگ یک معادله نظری از رفتگی سایشی لاستیک در تماس خطی با توجه به دیدگاه انرژی بر اساس نتایج تجربی توصیف کردند.

طبقه‌بندی دیگری، رفتگی لاستیک‌ها را به عنوان نتیجه دو فرآیند معرفی می‌کند: گسیختگی مکانیکی موضعی (پارگی) و تخریب مولکولی (رفتگی تخریبی smearing)). روغن حاصل فرایند تخریب که در طول رفتگی تخریبی شکل می‌گیرد از پاره شدن لایه زیرین لاستیک محافظت می‌کند و باعث کاهش آهنگ رفتگی می‌شود. آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهند که کاهش آهنگ رفتگی در طول رفتگی تخریبی از طریق اضافه کردن پاداکسنده‌ها ممکن است. بسپارها در بسیاری از مایعات



شکل ۱۶: هم‌افزایی بین رفتگی بسیار و آسیب توسط یک حلال

مراجع

Mofidi, Mohammad. "Tribology of elastomeric seal materials." PhD diss., Luleå tekniska universitet, 2009.

Tribology of elastomeric seal materials

G.Zolfaghari fard^{1,*}, A. Abbasian²

1. Masters student. Department of Polymer Engineering, Faculty of Petroleum and Chemical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Ph.D. Assistant Professor. Faculty Member of Islamic Azad University, Science and Research Branch, Polymer Engineering Department, tehran, iran

*Corresponding author Email: golrokh.zolfaghari@srbiau.az.ir

Abstract: Sealants prohibit leakage of fluids, or gases, and entrance of dirt and pollution of the instrument. Sealants are divided into two types of dynamic and static. Depending on the application conditions, they can be produced from metals, flexible plastics (plastomer), elastomer, and composite. elastomers due to their specific characteristics are the most applicable material in this field. Some common reasons of failure of sealants are: design, size, interaction of elastomer-oil, abrasion, environmental conditions and loading. Most of these failures are related to tribological reasons. The heat of friction can result in an increase in temperature and acceleration of chemical and heat degradation of the elastomer sealants. On the other hand, high temperature can reduce hardness of elastomer sealants and consequently their failure. Tribology is the science and technology of interaction of moving surfaces and interfaces and includes study and application of principles of friction, wear and lubrication. Friction coefficient of the surface of elastomer can be categorized based on affecting parameters, which include adhesion, deformation(hysteresis), viscose and cohesion. Friction coefficient is one of main controlling parameters of wear of elastomer properties. wear occurs due to three reasons of fatigue, abrasion, and roll formation. In action, all these three reasons occurs and finding their relative share during wear is difficult to find. Characterization of tribology and mechanism of wear of elastomer sealants has a critical role in determining performance and service time and also give a deeper insight into these behaviors and help the designer in selecting appropriate materials for sealants.

Keywords: elastomeric sealants, seals failure, tribological, wear