

طراحی، ساخت و ارزیابی دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک

مهدی رزاقی کاشانی*، رسول اسمعیلی نیسیانی

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی شیمی، گروه مهندسی پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳

دریافت: ۹۰/۲/۶، پذیرش: ۹۰/۵/۹

چکیده

تعیین ضریب اصطکاک لاستیک با سطوح دیگر از عوامل کلیدی در مطالعه برهم‌کنش قطعات لاستیکی با سطوح ناهموار (در ابعاد میکرومتر تا میلی متر) مانند برهم‌کنش لاستیک - جاده است. ضریب اصطکاک آمیزه‌های لاستیکی با عواملی هم‌چون خواص گرانش‌کشسانی آمیزه، خواص ناهمواری سطح و عوامل فرایندی مانند فشار اسمی و سرعت لغزش در ارتباط است. به دلیل نیاز مبرم به اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک روی سطوح مختلف و تعیین اثر عوامل ذکر شده، دستگاهی طراحی و ساخته شد که قابلیت تغییر پیوسته فشار اسمی و سرعت لغزش را دارد. آمیزه رویه تأیر سواری، به عنوان یکی از پرکاربردترین آمیزه‌ها در بحث اصطکاک و سایش لاستیک، برای ارزیابی دستگاه مورد نظر انتخاب شد. محدوده خواص گرانش‌کشسانی این آمیزه با تغییر ترکیب درصد لاستیک‌های استیرن - بوتادی‌ان (SBR) و بوتادی‌ان (BR) معین شد. هم‌چنین، اثر ناهمواری سطوح با انتخاب کاغذهای سیلیکون کاربرد با زبری متفاوت بررسی شد. بررسی‌های آماری نشان داد، دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک دقت زیادی دارد و بررسی اثر این عوامل را بر ضریب اصطکاک لاستیک میسر می‌سازد. افزایش فشار اسمی و سرعت لغزش به ترتیب باعث کاهش و عبور از بیشینه در ضریب اصطکاک شد. در ضمن، ضریب اتلاف آمیزه و عدم تقارن توزیع ناهمواری سطح بیشترین اثر را بر تغییرات ضریب اصطکاک لاستیک دارد.

واژه‌های کلیدی

ضریب اصطکاک لاستیک،
خواص گرانش‌کشسانی،
فشار اسمی تماس،
سرعت لغزش،
ناهمواری سطح

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

مقدمه

اصطکاک پدیده‌ای است که در مرز بین جامدات، مایعات و گازها و هم‌چنین در درون آنها رخ می‌دهد. لئوناردو داوینچی در اواخر قرن پانزدهم، اولین نظریه را برای تبیین اصطکاک در جامدات بیان کرد. پس از آن تعاریف زیادی از اصطکاک بیان شد. اصطکاک در دانشنامه تریبولوژی به شکل نیروی مقاوم مماسی، با مرز معلوم بین دو جسم که تحت نیروی خارجی حرکت یا تمایل به حرکت نسبی دارند، تعریف می‌شود [۱].

Zhang و همکاران اصطکاک را اثر تبدیل انرژی بیان کرده‌اند [۱]. اصطکاک به طور عمده اثر تبدیل انرژی مکانیکی به گرمایی بین دو جسمی است که تحت نیروی خارجی نسبت به هم حرکت دارند. بدیهی است، این انرژی از نیروی مقاومت تماسی با نام نیروی اصطکاک ناشی می‌شود که یک پدیده بین سطحی است. کارکرد اصطکاک همیشه به گونه‌ای است که از لغزیدن سطوح مجاور نسبت به یک دیگر جلوگیری می‌کند. نیروی اصطکاک با سطوحی که نسبت به هم می‌لغزند، موازی است. جهت نیروی اصطکاک ممکن است، در جهت حرکت یا خلاف آن باشد. از اولین معادلاتی که درباره اصطکاک ارائه شده، قانون کولمب است [۲]. در این معادله نیروی اصطکاک در جهت خلاف حرکت و متناسب با نیروی عمودی است. به منظور ایجاد تساوی از ثابتی استفاده می‌شود که به ضریب اصطکاک موسوم است. در این معادله ضریب اصطکاک از مساحت سطح تماس و سرعت بین دو سطح مستقل است.

لاستیک‌ها چندان از معادله کولمب پیروی نمی‌کنند و ضریب اصطکاک در آنها عامل متغیری است که تابعی از مساحت واقعی سطح تماس (تابعی از ناهمواری سطح و بار عمودی)، خواص گرانشی و کشسانی آمیزه لاستیکی و سرعت لغزش است [۲]. به طور کلی، نیروی اصطکاک بین لاستیک و سطوح ناهموار از دو جزء تشکیل شده است که با عنوان نیروی چسبندگی و نیروی انرژی اتلاف بیان می‌شود [۳]. جزء چسبندگی تنها در سطوح بسیار تمیز و با ناهمواری‌های بسیار ریز دارای اهمیت است و در کاربردهای عملی مانند اصطکاک آمیزه رویه تایر روی سطوح ناهموار و خیس جاده قابل صرف نظر است [۳].

جزء اتلافی نتیجه اصطکاک بین مولکولی در توده لاستیک در ضخامت کمی از سطح تماس است. این ضخامت متاثر از اندازه ناهمواری‌های سطح مقابل است. مثلاً درباره سطح جاده ابعاد ناهمواری از مقیاس میکرومتر تا میلی‌متر مد نظر است [۳]. در طول لغزش لاستیک روی ناهمواری‌های سطح، یک نیروی نوسانی با محدوده بسامد زیاد (حاصل تقسیم سرعت

لغزش بر اندازه ناهمواری‌ها) ولی کرنش کوچک به وسیله ناهمواری‌های سطح مقابل روی سطح لاستیک اعمال می‌شود که منجر به تغییر شکل نوسانی در توده سطحی لاستیک و در نتیجه اتلاف انرژی به دلیل پسماند گرانشی در این ناحیه می‌شود. بنابراین، اصطکاک به خواص گرانشی و کشسانی وابسته است. از جمله این خواص مهم می‌توان به مدول ذخیره، ضریب اتلاف و دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) اشاره کرد. وابستگی ضریب اصطکاک لاستیک به خواص گرانشی و کشسانی آمیزه لاستیکی برای اولین بار توسط Grosch مطرح و اثبات شد [۴].

اثر ضریب اتلاف و مدول ذخیره بر تغییرات ضریب اصطکاک لاستیک توسط Amino و همکاران نیز مشاهده شده است [۵]. در مطالعات دیگری، نشان داده شده است که با تغییر Tg (خواص گرانشی و کشسانی آمیزه لاستیک) ضریب اصطکاک پایا به شکل معناداری تغییر می‌یابد [۶-۸]. از موارد دیگری که بر تغییرات ضریب اصطکاک مؤثر است، ناهمواری سطح مقابل است. به منظور بررسی اثر خواص ناهمواری بر ضریب اصطکاک از دو رویکرد برخال (fractal) و روش آماری استفاده شده است [۹-۱۱]. هم‌چنین مطالعات گذشته به خوبی نشان می‌دهد، ضریب اصطکاک آمیزه‌های لاستیکی تابع عوامل خارجی مثل فشار و سرعت است. این مطالعات نشان می‌دهد، ضریب اصطکاک با افزایش فشار به شکل توانی کاهش می‌یابد [۱۲، ۱۳].

اصطکاک و کشانش (traction) تایر روی سطح جاده نقش عمده‌ای در ایمنی خودروها و سرنشینان آن دارد. ایمنی ترمزگیری در ارتباط مستقیم با برهم‌کنش تایر-جاده است. هم‌چنین، طراحی سامانه‌های ایمن ترمزگیری براساس همین برهم‌کنش انجام می‌شود. مطالعه برهم‌کنش لاستیک با سطح ساینده و اندازه‌گیری خواصی هم‌چون ضریب اصطکاک و تعیین عوامل مؤثر بر آن می‌تواند نقش بسزایی در بهینه‌سازی آمیزه‌های لاستیکی رویه تایر و روسازی سطح جاده ایفا کند.

دو نوع ضریب اصطکاک برای مواد مطرح می‌شود. نوع اول ضریب اصطکاک ایستاست و مربوط به زمانی است که دو سطح حرکتی را روی یک دیگر آغاز می‌کنند. دیگری ضریب اصطکاک پایاست و به حالتی مربوط است که لغزش دو جسم به شکل پایا روی یک دیگر آغاز شده است. شواهد تجربی نشان می‌دهد، ضریب اصطکاک ایستا برابر یا بزرگ‌تر از ضریب اصطکاک پایاست [۱۴]. ناحیه اصطکاک پایا برای پلیمر به طور گسترده مطالعه شده، اما اصطکاک ایستا کمتر بررسی شده است. علت این امر نیاز به داده‌برداری بسیار دقیق و سریع برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ایستا در کسری از ثانیه است.

تجربی

مواد، دستگاه‌ها و روش‌ها

هفت آمیزه لاستیکی بر پایه لاستیک استیرن - بوتادیان و لاستیک بوتادیان طبق جدول ۱ ساخته شد. از لاستیک استیرن - بوتادیان نوع ۱۵۰۲ پتروشیمی بندر امام (SBR-1502) با ۲۲/۵-۲۴/۵ درصد استیرن و چگالی 0.94 g/cm^3 و لاستیک بوتادیان محصول پتروشیمی اراک با ۹۶٪ سیس و چگالی 0.91 g/cm^3 استفاده شد. برای پخت از سامانه پخت گوگردی استفاده شد. مدت زمان پخت به کمک آزمون رئومتر به وسیله دستگاه ODR2000 ساخت شرکت Monsanto کشور انگلیس مطابق استاندارد ASTM D2084 در دمای 160°C معین شد. پس از تعیین زمان پخت بهینه، ورق‌های لاستیکی با ضخامت ۲ mm برای آزمون کشش یک طرفی و آزمون دینامیکی مکانیکی - گرمایی (DMTA) در دمای 160°C پخت شد. آزمون مقاومت کششی با استفاده از دستگاه Instron 5565 ساخت کشور آمریکا مطابق استاندارد ASTM D412 برای سه نمونه تکرار شد و مقادیر میانگین و انحراف معیار محاسبه شد. آزمون دینامیکی مکانیکی - گرمایی به وسیله دستگاه Triton 2000 ساخت شرکت Triton کشور انگلستان با استاندارد ISO/IEC 17025 انجام شد. این آزمون در بسامد ۱ Hz و کرنش ۰/۰۰۵، در محدوده دمایی $120-120^\circ\text{C}$ تا 120°C با سرعت گرمادهی $5^\circ\text{C}/\text{min}$ انجام شد. به منظور بررسی خواص اصطکاک، دستگاهی طراحی و ساخته شد که بتواند ضریب اصطکاک آمیزه‌های مورد نظر را روی سطوح مختلف در فشار اسمی و سرعت‌های مختلف لغزش اندازه‌گیری کند. جزییات این دستگاه در بخش بعدی به طور مفصل توضیح داده شده است.

لازمه اندازه‌گیری اصطکاک بین دو سطح در حال تماس، ایجاد حرکت نسبی بین دو سطح و وجود ساز و کاری است که بتواند نیروی اصطکاک ناشی از این حرکت را اندازه‌گیری کند [۱۴]. برخلاف اندازه‌گیری سایش لاستیک، استاندارد بین‌المللی خاصی برای اندازه‌گیری اصطکاک لاستیک‌ها وجود ندارد. شاید تنها استاندارد موجود BS ISO 15113 یا BS 903 Part A 61 باشد که مربوط به آونگ انگلیسی است و معیاری از ضریب اصطکاک را به دست می‌دهد [۱۵].

مطالعات Pan و همکاران یا Omata بیشتر با استفاده از این دستگاه بوده است [۸-۶]. پژوهشگران مختلف دستگاه‌های متفاوتی را برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک و مطالعات خود در این زمینه ابداع کرده‌اند [۱۵]. سایر مطالعات پیشین نیز بیشتر با دستگاه‌هایی بود که ساز و کار حرکت آنها تفاوت زیادی با وضعیت تماس تایلر با سطح جاده دارد. به طور مثال، مطالعات Chang روی اصطکاک بیشتر با اندازه‌گیری ضریب اصطکاک حرکت میله روی صفحه (pin-on-disk) بوده است [۱۱].

در این مقاله، اهمیت معرفی دستگاه جدید برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک بررسی شده است. برخورداری از این دستگاه اجازه بررسی عوامل مؤثر بر ضریب اصطکاک لاستیک را فراهم ساخت. وابستگی این ضریب به فشار اسمی، سرعت لغزش و خواص گرانش و کشسانی آمیزه نشان داده شد. اثر ناهمواری سطح بر ضریب اصطکاک لاستیک با معرفی مؤثرترین پارامتر ناهمواری توضیح داده شد. دستگاه مورد نظر و مطالعات حاضر می‌تواند در طراحی قطعات لاستیکی در کاربردهای تریبولوژیکی و طراحی سطوح درگیر با این قطعات به کار گرفته شود.

جدول ۱- اجزای آمیزه‌های لاستیکی.

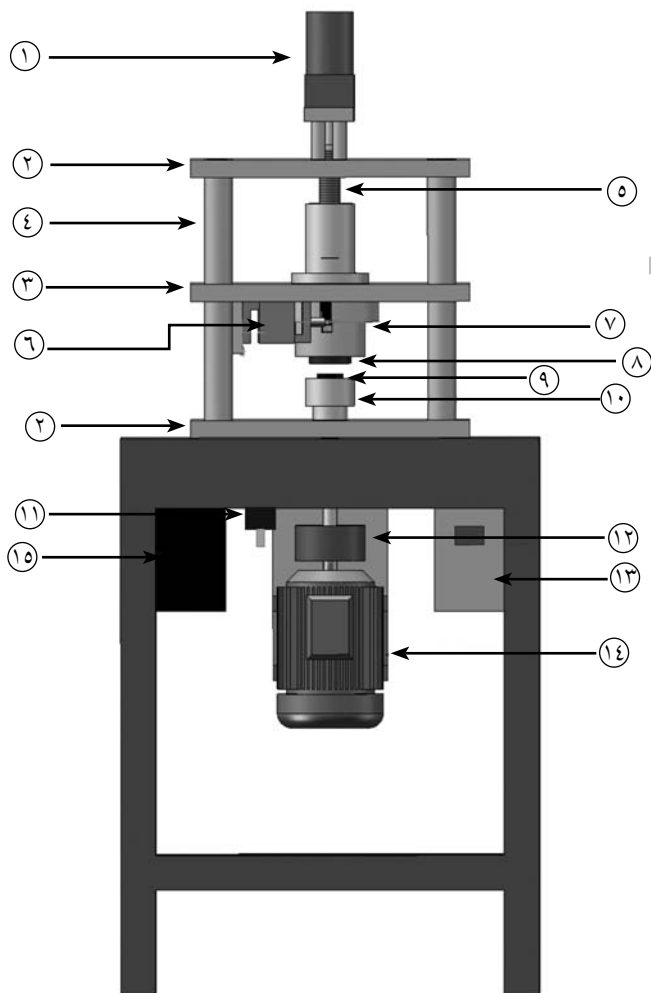
Q	P	O	N	M	L	K	مواد (قسمت به ازای ۱۰۰ قسمت لاستیک)
۱۰۰	۸۰	۶۰	۵۰	۲۰	۲۰	۰	لاستیک استیرن - بوتادیان
۰	۲۰	۴۰	۵۰	۶۰	۸۰	۱۰۰	لاستیک بوتادیان
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	دوده
۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	روغن آروماتیک
۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	گوگرد
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	استئاریک اسید
۳	۳	۳	۳	۳	۳	۳	روی اکسید
۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	TBBS (g)
۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	TMTD (g)

مواد با ناپایداری سطحی و در نتیجه مشکلات در اندازه‌گیری با ابزار دقیق روبروست. بنابراین، به منظور ایجاد پایداری در اندازه‌گیری نیروهای عمودی و گشتاور اصطکاکی، در طراحی دستگاه از چهار میله راهنما، سه صفحه سنگین فولادی سنگ خورده و دقت‌های در حد $0.1/0.1$ mm (H7) استفاده شد تا در حد امکان لرزش‌های مکانیکی کاهش یابد. در ضمن، استفاده از کنترل الکترونیکی بسیار دقیق و سریع، داده‌برداری دقیق دستگاه را تضمین می‌کند.

اجزا و عملکرد دستگاه

شکل ۱ طراحی از دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد، اجزای این دستگاه به شرح زیر است:

- ۱: موتور DC که برای جابه‌جایی صفحه متحرک (قطعه ۳) استفاده می‌شود. برای دقت بار اعمالی از گیربکس استفاده شد.
- ۲: صفحات فلزی سنگ خورده ثابت،



شکل ۱- طراحی از دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک.

انواع کاغذ سمباده از جنس سیلیکون کاربید با زبری‌های مختلف ($P60$ تا $P1000$) به عنوان سطح مقابل انتخاب و نیم رخ ناهمواری سطح آنها به وسیله دستگاه Surtronic +3 ساخت شرکت Taylor Hobson کشور انگلستان اندازه‌گیری و پارامترهای ناهمواری آنها محاسبه شدند.

طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک

اصول طراحی دستگاه مورد نظر

ساز و کار برهم‌کنش پلیمر با سطح مقابل از نوع برهم‌کنش لغزشی به عنوان ساز و کار غالب در تماس قطعات پلیمری انتخاب شد. نوع لغزش می‌تواند از نوع حرکت خطی یا دورانی باشد که در این دستگاه حرکت دورانی یک حلقه لاستیکی (قطر داخلی $24/7$ mm و قطر خارجی 37 mm) روی یک صفحه ساینده طراحی شد. در سطوح ناپیوسته در جهت حرکت، فشار تماس در لبه پیش رو شدت افزایش یافته به طوری که درگیری این لبه با سطح مقابل بسیار زیاد شده و توزیع فشار در جهت حرکت بسیارغیریکنواخت خواهد بود. به منظور حذف اثر لبه از یک حلقه پوسته در جهت حرکت استفاده شد.

حرکت دورانی نیز برای افزایش مسافت اندازه‌گیری انتخاب شد. محدوده فشار اسمی تماس بر اساس توزیع معمول فشار در سطح تماس قطعات لاستیکی معین شد [۱۶]. متوسط فشار تماس برای تایرهای سواری حدود 0.5 MPa و باری حدود 0.9 MPa است. محدوده فشار دستگاه از 0.1 تا $1/25$ MPa طراحی شد. ساختار دستگاه قابلیت اعمال بار عمودی تا 200 kg را دارد، اما حداکثر قدرت نیروسنج (لودسل الکترونیکی) به کار رفته در دستگاه 100 kg است که با توجه به سطح تماس 596 mm² بین حلقه لاستیکی و سطح مقابل، محدوده فشار اسمی مورد نظر تأمین می‌شود. با تغییر نیروسنج دستگاه می‌توان محدوده فشار مورد نظر را تغییر داد. نسبت لغزش در تایر برابر نسبت سرعت نسبی تایر و جاده به سرعت خطی خودرو است که با درصد بیان می‌شود.

سرعت لغزش حاصل ضرب نسبت لغزش در سرعت خودرو است. به طور مثال نسبت لغزش تایر در حالت کشانش یا ترمزگیری ضعیف، درصد کمی از سرعت خطی خودروست. این در حالی است که نسبت لغزش در وضعیت ترمزگیری کامل یا سریدن روی جاده برابر صددرصد است و سرعت لغزش برابر سرعت خطی خودروست. محدوده سرعت لغزش نیز بر اساس تجارب موجود در مقدار لغزش تایر بر سطح جاده در حد 1 تا 1000 mm/s انتخاب شد [۱۶]. این محدوده فقط با تغییر دور موتور اصلی (AC) دستگاه قابل دستیابی است. نیروی اصطکاک هم چون سایر خواص سطحی

۳: صفحه فلزی سنگ خورده متحرک،

۴: چهار عدد میله راهنما،

۵: پیچ متصل به موتور DC برای جابه‌جا کردن صفحه متحرک و اعمال بار عمودی،

۶: نیروسنج افقی نوع S برای اندازه‌گیری نیروی گشتاور،

۷: سامانه اندازه‌گیری نیروی عمودی و گشتاور چرخشی. این بخش شامل تعداد زیادی قطعه و طراحی پیچیده‌ای است که بار اعمالی را به نیروسنج عمودی منتقل کرده و با ساز و کار چرخان خود نیروی گشتاور را نیز به نیروسنج افقی وارد می‌کند. همه این ساز و کار به وسیله یک جام به زیر صفحه متحرک (قطعه ۳) متصل می‌شود.

۸: صفحه نگه‌دارنده سطح ناهموار (ساینده)،

۹: سطح خارجی نمونه لاستیکی،

۱۰: محور چرخاننده قطعه لاستیکی،

۱۱: برد الکترونیکی، که کلیه داده‌های قطعات ابزار دقیق در آن پردازش می‌شود و ارتباط بین رایانه و دستگاه را برقرار می‌کند.

۱۲: کلاچ برای کاهش زمان مورد نیاز برای رسیدن به سرعت چرخشی مورد نظر،

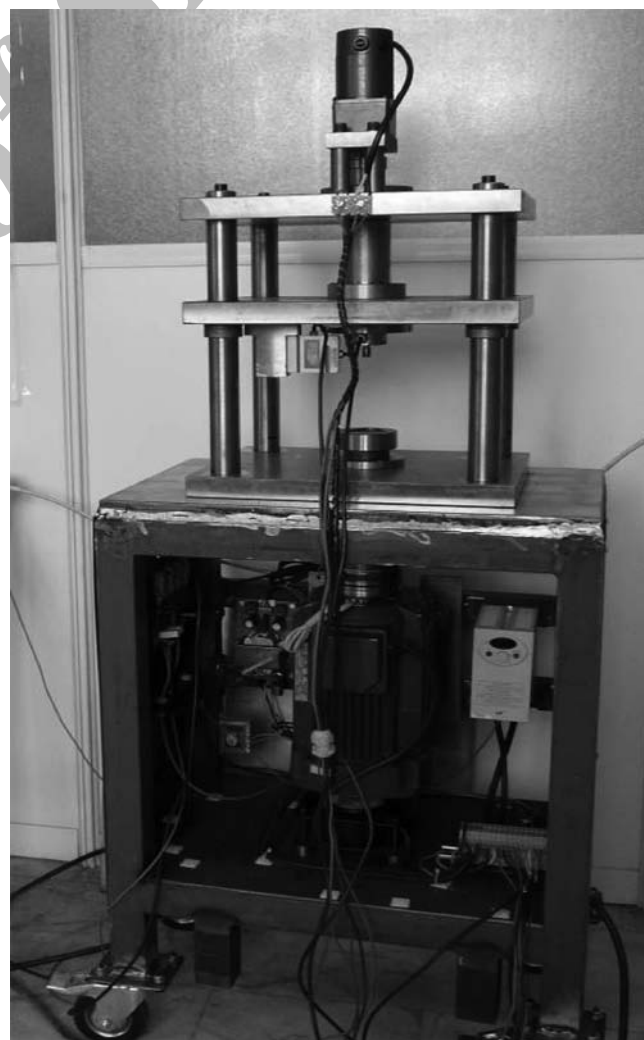
۱۳: مبدل که با تغییر بسامد تغییر سرعت موتور را ایجاد می‌کند و

۱۴: موتور AC با سرعت اسمی مشخص که برای چرخش نمونه لاستیکی استفاده می‌شود.

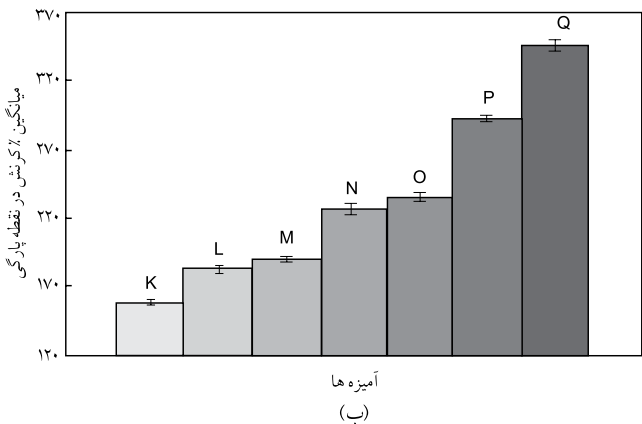
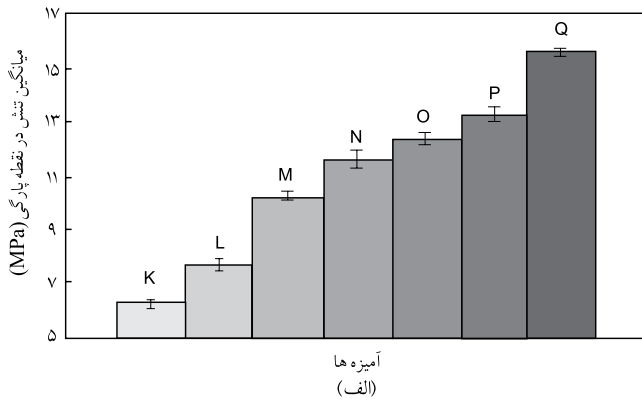
شکل ۲ تصویری از دستگاه استفاده شده را در آزمایشگاه فیزیک و مکانیک پلیمرها در دانشگاه تربیت مدرس نشان می‌دهد. حرکت صفحه متحرک (۳) روی میله‌های راهنما (۴)، تماس لاستیک (۹) با سطح ساینده (۸) و اعمال بار عمودی را بدون هرگونه ناپایداری و لرزش به وسیله موتور DC (۱) در بالای صفحه ثابت (۲) بالایی تأمین می‌کند. نیروی عمودی به وسیله نیروسنج عمودی (داخل ۷) اندازه‌گیری و به کمک حلقه کنترل الکترونیکی به وسیله رایانه تثبیت می‌شود. موتور AC (۱۴) در زیر صفحه ثابت (۲) پایینی تعبیه شده است که حرکت چرخشی نمونه لاستیکی را از راه کلاچ (۱۲)، کوپلینگ‌ها و محور مربوط (۱۰) ایجاد می‌کند. حلقه کنترل الکترونیکی سرعت چرخشی ثابت نمونه را از راه رایانه تضمین می‌کند. سرعت چرخش از راه یک مبدل (۱۳) به وسیله رایانه کنترل می‌شود. نیروی گشتاور اعمال شده به سطح ساینده (۸) با ساز و کاری پیچیده (۷) به نیروسنج افقی (۶) وارد و اندازه‌گیری می‌شود. انتقال اطلاعات رقمی از راه برد الکترونیکی (۱۱) به رایانه انجام می‌شود. این برد الکترونیکی قادر است، ۱۴۰ داده در ثانیه را بین دستگاه و رایانه منتقل کند. رایانه نیروی عمودی و سرعت چرخش را به شکل اطلاعات ورودی دریافت و کنترل می‌کند. سپس با اندازه‌گیری نیروی گشتاور و تقسیم این نیرو بر نیروی عمودی ضریب اصطکاک را محاسبه، ثبت و رسم می‌کند. ضریب اصطکاک در سرعت و فشار معین در کسری از ثانیه حاصل می‌شود. این سرعت زیاد داده‌برداری امکان تفکیک ضریب اصطکاک ایستا و پایا را خواهد داد.

خروجی از دستگاه و محاسبه ضریب اصطکاک

نیروی گشتاور اندازه‌گیری شده در هر لحظه (یا مسافت طی شده) به رایانه مربوط منتقل شده و با تقسیم بر نیروی عمودی اعمالی، ضریب اصطکاک محاسبه می‌شود. منحنی ضریب اصطکاک نمونه لاستیکی در فشار و سرعت چرخش معین در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، ضرایب اصطکاک ایستا، گذرا و پایا به دلیل دقت و سرعت داده‌برداری دستگاه از یک دیگر تفکیک شده و ترسیم می‌شوند. سایر اطلاعات حاصل از این منحنی، شیب ناحیه

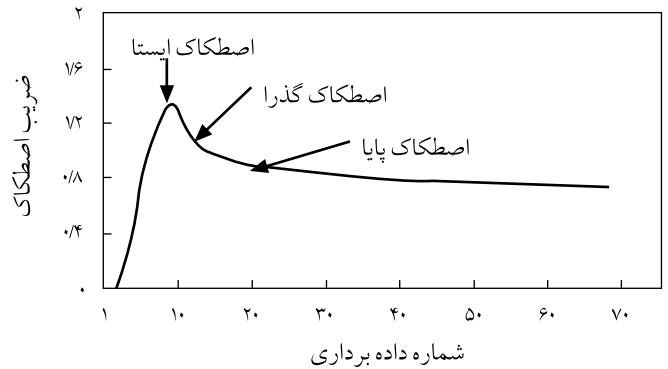


شکل ۲- دستگاه استفاده شده برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک.



شکل ۴- نمودارهای میانگین: (الف) تنش و (ب) کرنش در نقطه پارگی برای آمیژه‌ها.

شکل دیده می‌شود، در تمام آمیژه‌ها ضریب اتلاف بر حسب دما تنها دارای یک نقطه بیشینه است. به این معنا که دو نوع لاستیک مزبور با یک دیگر امتزاج‌پذیر بوده و توزیع آنها در آمیژه‌ها کاملاً یکنواخت است [۱۷]. افزایش دمای انتقال شیشه‌ای به دلیل بالاتر بودن این دما برای لاستیک استیرن - بوتادی‌ان و افزایش بیشینه ضریب اتلاف نیز به دلیل اتلاف مولکولی بیشتر این لاستیک نسبت به لاستیک پلی‌بوتادی‌ان توضیح داده می‌شود. نکته حایز اهمیت دست‌یابی به محدوده وسیع و منظمی از خواص گرانش‌کشسانی در آمیژه‌ها با تغییر ترکیب درصد دو لاستیک در آمیژه است. این امر امکان بررسی اثر تغییرات خواص گرانش‌کشسانی بر خواص اصطکاک‌های آمیژه‌های لاستیکی را به طور نظام مند فراهم خواهد کرد. شایان ذکر است، با توجه به بسامد زیاد بارگذاری سطح تایر (محدوده ۱۰۰ kHz تا ۱ MHz) و دمای سرویس تایر (۷۰ تا ۱۰۰°C)، در صنعت تایر مرسوم است که شرایط معادل برای بررسی رفتار گرانش‌کشسانی آمیژه رویه تایر در ارتباط با اصطکاک با استفاده از اصل برهم‌نهد زمان در ناحیه لاستیکی استفاده شود. شرایط معادل بسامد ۱ Hz و دمای ۲۰- تا ۵°C در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. به طور مثال، ضریب اتلاف در



شکل ۳- نمونه منحنی ضریب اصطکاک خروجی از دستگاه.

صعودی که متناسب با مدول برشی نمونه لاستیکی، شکل تغییرات ضریب اصطکاک در ناحیه گذرا و تغییرات ضریب اصطکاک در ناحیه پایاست که معرف تغییرات ضریب اصطکاک نمونه در اثر ایجاد گرما و سایش است.

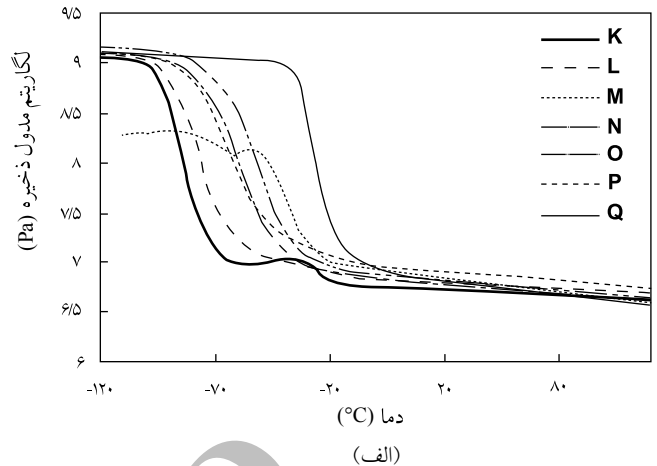
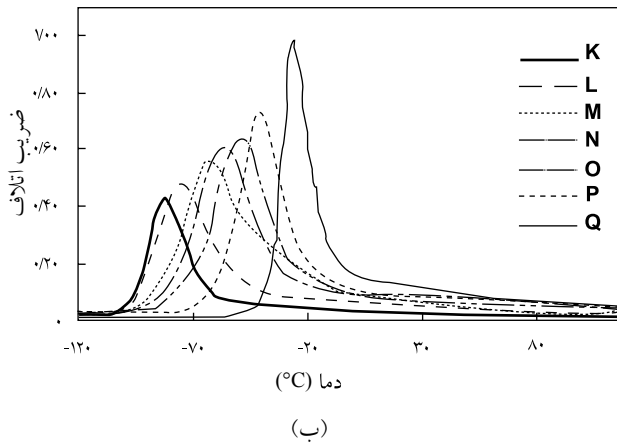
نتایج و بحث

خواص کششی آمیژه‌های لاستیکی

در شکل ۴ - الف و ب میانگین تنش و درصد از یاد طول تا پارگی و محدوده خطا برای تمام آمیژه‌های مورد استفاده رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار لاستیک استیرن-بوتادی‌ان از نمونه K تا Q استحکام کششی آمیژه به تدریج افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار لاستیک استیرن-بوتادی‌ان، به دلیل استحکام کششی بیشتر این لاستیک نسبت به لاستیک پلی‌بوتادی‌ان، استحکام کششی آمیژه افزایش می‌یابد. درصد ازدیاد طول تا پارگی نیز روند مشابهی را با افزایش لاستیک استیرن-بوتادی‌ان در آمیژه نشان می‌دهد. با تغییر ترکیب درصد دو نوع لاستیک در آمیژه، تغییر تدریجی مناسبی در خواص مکانیکی حاصل شده است.

خواص دینامیکی مکانیکی - گرمایی آمیژه‌های لاستیکی

در شکل ۵ - الف و ب منحنی‌های مدول ذخیره و ضریب اتلاف نمونه‌های لاستیکی بر حسب دما رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار لاستیک استیرن - بوتادی‌ان در آمیژه مدول ذخیره افزایش می‌یابد که این امر به دلیل بیشتر بودن مدول این لاستیک نسبت به لاستیک پلی‌بوتادی‌ان است. هم‌چنین، دمای انتقال شیشه‌ای و بیشینه ضریب اتلاف نمونه‌ها نیز با افزایش مقدار لاستیک استیرن - بوتادی‌ان به طور منظم افزایش می‌یابد. همان‌طور که از این



شکل ۵- تغییرات: (الف) مدول ذخیره و (ب) ضریب اتلاف آمیزه‌ها بر حسب دما.

برای نمونه‌های مختلف کاغذ سمباده است. به طور مثال، پارامتر R_p که معیار عمق ناهمواری‌ها از خط مبناست، دارای تغییراتی حدود مقدار ۳ تا ۱۰ است.

بسامد ۱ Hz و این محدوده دمایی به عنوان معیاری برای مقایسه اصطکاک آمیزه‌های لاستیکی به کار می‌رود.

ضریب اصطکاک نمونه‌های لاستیکی

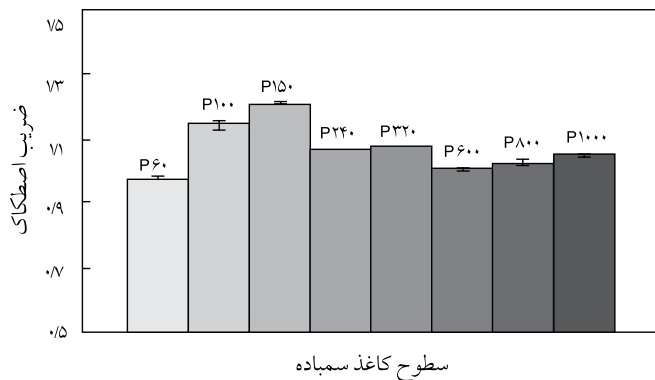
به منظور مشخص شدن اثر خواص گرانبه‌کشی‌سانی و ناهمواری سطح بر ضریب اصطکاک در فشار اسمی و سرعت لغزش معین از مجموعه آزمایش و تحلیل آماری استفاده شد. بنابراین، ضریب اصطکاک برای نمونه آمیزه‌های لاستیکی روی کلیه سطوح کاغذ سمباده در سرعت ۱۰۰ rpm و نیروی عمودی ۲۰ kg با ۵ مرتبه تکرار اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری نیم‌رخ ناهمواری سطوح کاغذ سمباده و محاسبه پارامترهای ناهمواری سطح

ابتدا نیم‌رخ ناهمواری سطوح کاغذ سمباده با دستگاه زبری سنج سوزنی اندازه‌گیری و سپس پارامترهای بسیاری که معرف مشخصه‌های مختلفی از ناهمواری سطح است، محاسبه شد. جدول ۲ پارامترهای محاسبه شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نتایج نیز گویای محدوده نسبتاً وسیعی از اندازه پارامترهای سطح

جدول ۲- نتایج اندازه‌گیری ناهمواری سطوح کاغذ سیلیکون کاربید.

کاغذ سیلیکون کاربید											پارامترهای ناهمواری
P۶۰	P۸۰	P۱۰۰	P۱۲۰	P۱۵۰	P۲۲۰	P۲۴۰	P۳۲۰	P۶۰۰	P۸۰۰	P۱۰۰۰	
۱۰/۱	۹/۲۹	۱۰/۱	۹/۶۷	۹/۰۱	۸/۴۹	۸/۷۳	۸/۹۱	۴/۷۲	۴/۹۵	۳/۴۲	R_a (μm)
۱۲/۴	۱۱/۱	۱۲/۱	۱۱/۷	۱۰/۸	۱۰/۱	۱۰/۴	۱۰/۸	۵/۸۲	۶/۱۰	۴/۲۳	R_q (μm)
-۰/۲۵۹	۰/۱۲۷	۰/۳۸۴	۰/۴۳۶	۰/۴۵۲	۰/۲۸۹	-۰/۰۳۷۲	-۰/۰۰۷۸	-۰/۱۷۲	-۰/۰۷۷۸	-۰/۰۴۱۷	R_{sk} (μm)
۴/۵۶	۶/۳۳	۴/۹۲	۴/۴۹	۳/۹۹	۲/۹۸	۳/۱۷	۳/۲۲	۳/۵۲	۲/۹۵	۴/۵۴	R_{ku} (μm)
۴۵/۶	۳۹/۲	۴۲/۴	۴۱/۷	۳۸/۱	۳۵/۶	۳۸/۸	۴۲/۵	۲۵/۱	۲۶/۳	۱۸/۵	R_z (μm)
۲۳	۲۳/۲	۲۳/۲	۲۷/۲	۲۶/۳	۲۴/۷	۲۵/۵	۲۶/۴	۱۶/۶	۱۷/۸	۱۲/۸	R_{3z} (μm)
۸۱	۸۶/۶	۹۱/۳	۷۴/۹	۶۷/۷	۵۲/۸	۶۴/۵	۶۱/۴	۳۷/۶	۳۷/۴	۳۱/۳	R_{max} (μm)
۸۱	۸۶/۶	۹۱/۳	۷۴/۹	۶۷/۷	۵۲/۸	۶۴/۵	۶۱/۴	۳۷/۶	۳۷/۴	۳۱/۳	R_y (μm)
۲۱/۲	۱۹/۳	۲۳/۳	۲۳/۱	۲۱/۳	۱۹/۷	۱۸/۹	۲۰/۵	۱۱/۹	۱۲/۷	۸/۸	R_p (μm)
۲۴/۳	۱۹/۹	۱۹/۱	۱۸/۶	۱۶/۷	۱۵/۹	۱۹/۹	۲۱/۹	۱۳/۱	۱۳/۶	۹/۷۳	R_v (μm)
۹۴/۲	۸۹/۱	۹۱/۹	۸۳/۹	۷۳	۵۶/۳	۶۵/۸	۶۸/۲	۴۲/۷	۳۹/۳	۳۴	R_t (μm)



شکل ۷- میانگین ضریب اصطکاک جنبشی برای آمیزه O در نیروی عمودی ۲۰ kg و سرعت چرخش ۱۰۰ rpm به همراه خطای تکرار برای سطوح مختلف.

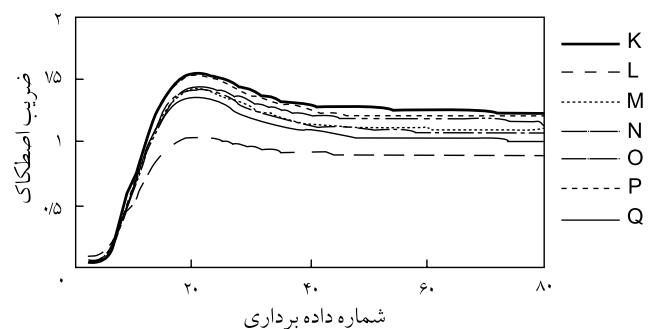
در نیروی عمودی ۲۰ kg و سرعت ۱۰۰ rpm حاصل شده است. از شکل ۷ مشخص است، با تغییر سطح، مقدار ضریب اصطکاک تغییر می‌یابد. سطح P150 بیشترین و سطح P60 کمترین ضریب اصطکاک را نشان می‌دهند. به منظور پی بردن به اثر مؤثرترین عامل سطح بر تغییرات ضریب اصطکاک، از محاسبه آماری ضریب تناظر بین تعدادی از پارامترهای ناهمواری سطح و ضرایب اصطکاک برای آمیزه‌های مختلف استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین ضریب تناظر برای ضرایب اصطکاک و پارامتر تقارن توزیع ارتفاع ناهمواری یا R_{sk} حاصل شده است. به عبارت دیگر، ضرایب اصطکاک بیشترین همبستگی را با ممان سوم نیم رخ ناهمواری سطح دارد و مقدار عدم تقارن در ناهمواری سطح مؤثرترین عامل بر تغییرات ضریب اصطکاک آمیزه‌های لاستیکی است. مقادیر مثبت نشان از تیزی قله‌های ناهمواری و سطح تماس واقعی کمتر و مقادیر منفی آن نشان از شکستگی قله و سطح تماس واقعی بالاتر با لاستیک را دارد. مقادیر نزدیک به صفر نیز توزیع نرمال را برای سطحی با ناهمواری اتفاقی نشان می‌دهد.

در شکل ۸ میانگین ضریب اصطکاک برای آمیزه O بر حسب نیروی عمودی مختلف رسم شده است. این نتایج از انجام آزمون ضریب اصطکاک روی سطح کاغذ سمباده با اندازه مش P150 در سرعت ۲۰۰ rpm حاصل شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش نیروی عمودی ضریب اصطکاک آمیزه به شدت افت می‌یابد که به دلیل تغییرات سطح تماس واقعی بین لاستیک و سطح ناهموار در اثر افزایش فشار اسمی توضیح داده می‌شود [۳].

در شکل ۹ میانگین ضریب اصطکاک جنبشی آمیزه O بر حسب سرعت روی سطح کاغذ سمباده با اندازه مش P150 در نیروی عمودی ثابت ۳۰ kg رسم شده است. همان‌طور که از این منحنی

برای پی بردن به اثر فشار اسمی و سرعت لغزش، ضریب اصطکاک آمیزه O روی سطح کاغذ سمباده با اندازه مش P150 در سرعت‌های ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۵۰ و ۷۰۰ rpm و نیروی عمودی ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ kg برای آمیزه‌ها با ۵ مرتبه تکرار ارزیابی شد. با رسم نمودارهای انتخابی اثر هر یک از عوامل تغییر خواص گرانووکشسانی (ناشی از آمیزه کاری)، پارامترهای ناهمواری سطح، فشار و سرعت ضریب اصطکاک جنبشی مشخص شد. سپس، تمام داده‌ها ناشی از این اندازه‌گیری‌ها، به کمک تحلیل آماری ارزیابی شد. شکل ۶ منحنی ضریب اصطکاک آمیزه‌ها را روی کاغذ سمباده با اندازه مش P150 (در نیروی عمودی ثابت ۲۰ kg و سرعت چرخش ۱۰۰ rpm) بر حسب شماره داده‌برداری (مسافت طی شده یا زمان انجام آزمون) نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، منحنی ضریب اصطکاک دارای مقداری بیشینه (ضریب اصطکاک ایستا) است و پس از آن به مقداری نسبتاً ثابت (ضریب اصطکاک پایا) می‌رسد. با توجه به دقت زیاد دستگاه در داده‌برداری، نیروی اصطکاک پیش از لغزش، در لحظه شروع لغزش (اصطکاک ایستا) و پس از شروع لغزش (اصطکاک پایا) کاملاً از یک دیگر تفکیک‌پذیر هستند. همان‌طور که از این شکل مشخص است، با افزایش درصد لاستیک استیرن - بوتادی‌ان در آمیزه‌ها ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. از آن جا که ضریب اصطکاک لاستیک با انرژی اتلاف در لاستیک مرتبط است، این پدیده با افزایش بیشینه ضریب اتلاف در آزمون دینامیکی - مکانیکی - گرمایی در اثر افزایش درصد لاستیک استیرن - بوتادی‌ان مطابقت خوبی دارد.

در شکل ۷ میانگین ضریب اصطکاک جنبشی (ضریب اصطکاک هر آزمون خود میانگین این ضریب در ناحیه اصطکاک پایاست) به همراه خطای تکرار برای سطوح ناهموار مختلف، برای آمیزه O رسم شده است. این دو منحنی از نتایج آزمون اندازه‌گیری ضریب اصطکاک



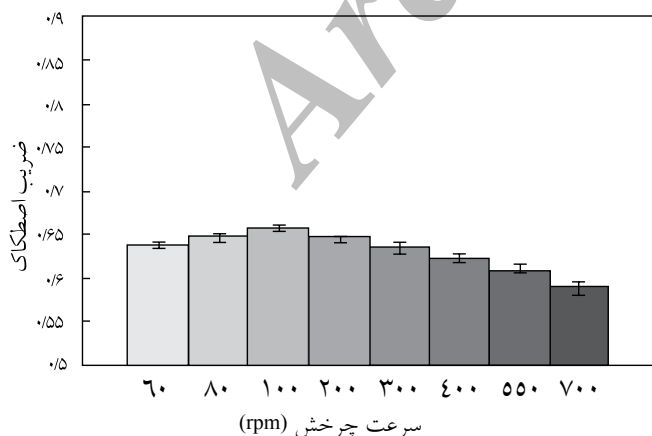
شکل ۶- نمونه‌ای از منحنی‌های ضریب اصطکاک برای آمیزه‌های لاستیکی روی سطح کاغذ سمباده P150 در نیروی عمودی ۲۰ kg و سرعت چرخش ۱۰۰ rpm.

جدول ۳- نتایج ضرایب تناظر بین پارامترهای ناهمواری سطح و ضریب اصطکاک برای آمیزه های مختلف.

آمیزه	R_t (μm)	R_v (μm)	R_p (μm)	R_y (μm)	R_{max} (μm)	R_{3z} (μm)	R_z (μm)	R_{ku} (μm)	R_{sk} (μm)	R_q (μm)	R_a (μm)
K	۰/۱۵۵	۰/۲۸۹	۰/۱۲۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۲۷۷	۰/۰۷۷	۰/۲۲۶	۰/۷۹۵	۰/۰۲۱	۰/۰۰۹
L	۰/۱۱۳	۰/۰۹۲	۰/۳۵۰	۰/۱۸۹	۰/۱۸۹	۰/۴۴۲	۰/۱۴۵	۰/۰۱۱	۰/۸۹۶	۰/۲۱۳	۰/۲۳۷
M	۰/۱۹۱	۰/۰۱۹	۰/۴۲۴	۰/۲۹۲	۰/۲۹۲	۰/۴۹۹	۰/۲۱۹	۰/۰۴۵	۰/۹۲۶	۰/۲۹۶	۰/۳۲۳
N	۰/۳۵۸	۰/۰۸۶	۰/۵۴۹	۰/۴۶۱	۰/۴۶۱	۰/۵۳۹	۰/۳۳۹	۰/۲۰۶	۰/۹۶۷	۰/۴۲۴	۰/۴۴۹
O	۰/۲۸۹	۰/۰۰۶	۰/۴۸۶	۰/۳۸۳	۰/۳۸۳	۰/۵۰۰	۰/۲۶۵	۰/۱۷۴	۰/۹۷۵	۰/۳۵۷	۰/۳۸۲
P	۰/۳۹۲	۰/۱۸۵	۰/۶۰۰	۰/۴۵۷	۰/۴۵۷	۰/۶۱۴	۰/۴۱۷	۰/۱۴۱	۰/۹۰۶	۰/۴۷۴	۰/۴۹۳
Q	۰/۴۳۵	۰/۱۹۱	۰/۶۲۹	۰/۵۲۳	۰/۵۲۳	۰/۶۲۳	۰/۴۳۵	۰/۱۹۵	۰/۹۵۱	۰/۵۱۰	۰/۵۳۲

ضریب اصطکاک تغییر می کند. از طرف دیگر، در تکرار اندازه گیری در شرایط ثابت نیز تغییراتی مشاهده می شود. بنابراین، از تحلیل های آماری واریانس برای بررسی دقیق تر عوامل مؤثر بر تغییر اصطکاک استفاده شد.

نتایج تحلیل واریانس برای نوع آمیزه و سطح ناهموار در جدول ۴ نشان داده شده است. عدد F (نسبت واریانس دو آزمایش) برای تغییر خواص گرانشی و کشسانی نمونه لاستیکی و عدد F برای تغییر سطح ناهموار بسیار بزرگ تر از مقدار بحرانی آن (F_{crit}) در درجه آزادی مربوط و محدوده اطمینان ۹۹٪ ($\alpha=0.01$) است. این طور استنباط می شود که اثر تغییر خواص گرانشی و کشسانی و سطح بر تغییرات ضریب اصطکاک بسیار مؤثر بوده است. نتایج این جدول حاکی از آن است، اثر تغییر خواص گرانشی و کشسانی و سطح ناهموار بر تغییرات ضریب اصطکاک بسیار مؤثر است و مقدار بسیار کوچک عدد P حاکی از ناچیز بودن خطای تکرار است.



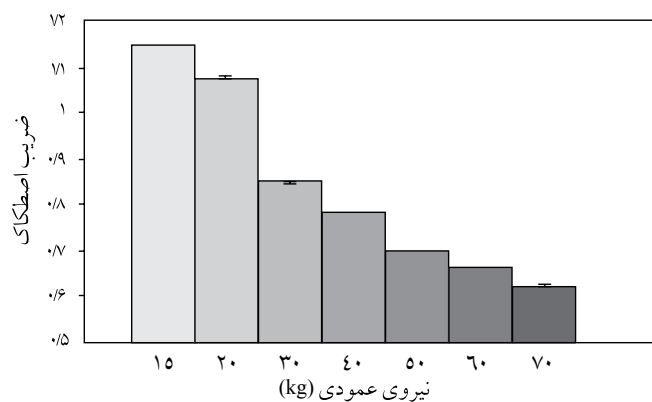
شکل ۹- میانگین ضریب اصطکاک جنبشی به همراه خطای تکرار بر حسب تغییر سرعت برای آمیزه O، روی سطح کاغذ سمباده P150 و نیروی عمودی ۳۰ kg.

مشهود است، ضریب اصطکاک در سرعت ۱۰۰ rpm برای آمیزه لاستیکی دارای مقدار بیشینه است. مقدار بیشینه ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، به محدوده زمان آسودگی لاستیک، محدوده اندازه ناهمواری های سطح و دمای آزمون بستگی دارد [۳].

از شکل های ۶ تا ۹ مشاهده می شود، ضریب اصطکاک تابعی از تغییرات نوع آمیزه لاستیکی، سطح ناهموار، فشار اسمی (نیروی عمودی) و سرعت لغزش است. نکته دیگر که در این شکل ها مشاهده می شود، کوچک بودن خطاهای تکرار محاسبه شده برای هر آزمون به وسیله دستگاه طراحی شده است. به منظور شناسایی اثر هر یک از عوامل متغیر و تفکیک آن از خطای تکرار آزمایش از تحلیل واریانس استفاده شد.

تحلیل آماری داده های ضریب اصطکاک اندازه گیری شده

در بخش پیشین دیده شد، با تغییر عواملی هم چون خواص گرانشی، ناهمواری سطح، فشار اسمی و سرعت لغزش



شکل ۸- میانگین ضریب اصطکاک جنبشی به همراه خطای تکرار بر حسب تغییر نیروی عمودی برای آمیزه O، روی سطح کاغذ سمباده P150 با سرعت چرخش ۲۰۰ rpm.

جدول ۴- نتایج تحلیل واریانس برای آمیزه‌ها روی سطوح مختلف در سرعت چرخش ثابت ۱۰۰ rpm و نیروی عمودی ثابت ۲۰ kg.

F_{crit}	P-value	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منشاء تغییر
۲/۷۱۹۹۲	۰~	۴۱۲۲/۶۵	۰/۱۲۸۰۷	۷	۰/۸۹۶۵	سطح ناهموار
۲/۸۸۳۳۳	۰~	۶۰۲۰/۰۶	۰/۱۸۷۰۲	۶	۱/۱۲۲۱	نمونه لاستیکی
۱/۶۶۸۳۸	۰~	۶۱/۰۷۹۵	۰/۰۰۱۹	۴۲	۰/۰۷۹۶۹	برهم کنش

جدول ۵- نتایج تحلیل واریانس تعیین اثر فشار و سرعت بر ضریب اصطکاک برای آمیزه O روی سطح P150.

F_{crit}	P-value	F	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	منشاء تغییر
۲/۷۱۹۹۲۴	E۳,۹-۶	۵/۸۲۷۰۴۳	۰/۰۲۰۲۰۳	۷	۰/۱۴۱۴۱۹	سرعت لغزش
۲/۸۸۳۳۳۴	۰~	۵۰۲/۳۵۳۵	۱/۷۴۱۶۸۶	۶	۱۰/۴۵۰۱۲	فشار اسمی
۱/۶۶۸۳۸	۰/۱۰۲۸۴۵	۱/۳۲۲۹	۰/۰۰۴۵۸۷	۴۲	۰/۱۹۲۶۳۶	برهم کنش

ضریب اصطکاک لاستیک با افزایش فشار اسمی کاهش و با افزایش سرعت لغزش از مقداری بیشینه عبور می‌کند. افزون بر دو عامل فشار و سرعت، اثر خواص گرانروکشسانی و عوامل ناهمواری سطح مقابل بر ضریب اصطکاک لاستیک نیز به ترتیب با تغییر ترکیب درصد لاستیک‌های SBR و BR در آمیزه و استفاده از کاغذ سیلیکون کاربرد با زبری‌های متفاوت بررسی شد. نتایج نشان داد، تغییر در ترکیب درصد لاستیک‌ها محدوده وسیع و منظمی از خواص گرانروکشسانی را فراهم می‌کند و افزایش ضریب اتلاف در اثر افزایش مقدار لاستیک SBR موجب افزایش ضریب اصطکاک آمیزه لاستیکی می‌شود. هم چنین نشان داده شد، کاغذ سیلیکون کاربرد با زبری‌های متفاوت محدوده وسیعی از اندازه پارامترهای زبری سطح را پوشش می‌دهد و از میان این پارامترها، پارامتر R_{sk} که معرف عدم تقارن منحنی توزیع ارتفاع سطح است، بیشترین ضریب همبستگی را با ضریب اصطکاک لاستیک دارد و می‌تواند به عنوان معیاری در انتخاب سطح درگیر با قطعه لاستیکی به کار رود. از میان عوامل مورد مطالعه، سرعت لغزش در محدوده اندازه‌گیری شده اثر کمتری را بر تغییرات ضریب اصطکاک نشان داد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از آقایان کمال افشاری و عظیم پوربخشیان که در ساخت بخش‌های مکانیکی و الکترونیکی دستگاه ضریب اصطکاک همکاری بسیار داشته‌اند، کمال تشکر را دارند. در ضمن، از همکاری شرکت تولیدی ایران تایر در آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام برخی آزمایش‌ها قدردانی می‌شود.

از طرفی نتایج تحلیل واریانس اثر عوامل متغیر سرعت لغزش و فشار اسمی بر ضریب اصطکاک در جدول ۵ نشان داده شده است. از نتایج این جدول می‌توان ملاحظه کرد که مقدار F برای تغییرات فشار اسمی (نیروی عمودی) بسیار بزرگ‌تر از مقدار بحرانی در آن درجه آزادی و محدوده اطمینان ۹۹٪ بوده است. بنابراین، فشار اسمی نیز بر ایجاد تغییر در ضریب اصطکاک بسیار مؤثر است.

از سوی دیگر، مقایسه مقدار F برای تغییرات سرعت لغزش با مقدار بحرانی آن در درجه آزادی و محدوده اطمینان ۹۹٪، بیانگر آن است که تغییرات سرعت در محدوده اندازه‌گیری شده نیز بر ایجاد تغییرات در ضریب اصطکاک مؤثر است. تمام داده‌های تحلیل واریانس نشان می‌دهد، عواملی مانند خواص گرانروکشسانی، ناهمواری سطح و فشار اثر بسزایی بر تغییرات ضریب اصطکاک دارد، اما سرعت لغزش در محدوده اندازه‌گیری شده اثر نسبتاً کمتری بر تغییرات این ضریب دارد.

نتیجه‌گیری

به دلیل اهمیت اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک در مطالعه برهم کنش قطعات لاستیکی و سطوح ناهموار مانند برهم کنش تایر-جاده، دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک لاستیک طراحی و ساخته شد. این دستگاه امکان بررسی اثر عوامل فرایندی همچون فشار اسمی و سرعت لغزشی را فراهم کرده است. ارزیابی این دستگاه با استفاده از آمیزه لاستیکی رویه تایر نشان داد، دستگاه دقت خوبی را در اندازه‌گیری ضریب اصطکاک دارد و حساسیت مورد نیاز در بررسی عوامل مؤثر بر ضریب اصطکاک را فراهم می‌سازد. نتایج نشان داد،

مراجع

- Zhang S.W., *Tribology and Interface Engineering Series: Tribology of Elastomers*, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, 2004.
- Moore D.F., *The Friction and Lubrication of Elastomers*, 1st ed., Pergamon, London, 1972.
- Persson B.N.J., On the Theory of Rubber Friction, *Surf. Sci.*, **401**, 445-454, 1998.
- Grosch K.A., The Relation between the Friction and Visco-elastic Properties of Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, **37**, 386-404, 1964.
- Amino N. and Uchiyama Y., Relation between the Friction and Viscoelastic Properties of Rubber, *Tire Sci. Technol.*, **28**, 178-195, 2000.
- Omata N., Suga T., Furusawa H., Urabe S., Kondo T., and Ni Q.Q., Viscoelasticity Evaluation of Rubber by Surface Reflection of Supersonic Wave, *Ultrasonics*, **44**, 211-215, 2006.
- Pan X.D., Kelly E.D., and Hayes M.W., Bulk Viscoelastic Contribution to the Wet-Sliding Friction of Rubber Compounds, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **41**, 757-771, 2003.
- Pan X.D., Relationship between the Dynamic Softening Transition and Wet Sliding Friction of Elastomer Compounds, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **42**, 2467-2478, 2004.
- Pan X.D., Wet Sliding Friction of Elastomer Compounds on a Rough Surface under Varied Lubrication Conditions, *Wear*, **262**, 707-717, 2007.
- Kluppel M. and Heinrich G., Rubber Friction on Self-Affine Road Tracks, *Rubber Chem. Technol.*, **73**, 578-606, 2000.
- Chang W.R., The Effects of Surface Roughness and Contaminant on the Dynamic Friction of Porcelain Tile, *Appl. Ergonom.*, **32**, 173-184, 2001.
- Ergun M., Lyinam S., and Lyinam A.F., Prediction of Road Surface Friction Coefficient Using only Macro- and Microtexture Measurement, *J. Transport. Eng.*, **131**, 311-319, 2005.
- Schallamach A., Friction and Abrasion of Rubber, *Rubber Chem. Technol.*, **31**, 982-1014, 1959.
- Deladi E.L., Drooij M.B., and Gdevries E., Analytical and Experimental Investigation of the Static Friction Regime for Rubber-Rigid Ball Contact, *Surf. Int. Anal.*, **38**, 891-893, 2006.
- Brown R., *Physical Testing of Rubber*, 4th ed., Springer, USA, 219-244, 2006.
- Pottinger M.G., Contact Patch (Footprint) Phenomena, *Pneumatic Tires*, Gent A.N. and Walter J.D. (Eds.), National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, 231-287, 2005.
- Marzocca A.J., Cerveny S., and Mendez J.M., Some Considerations Concerning the Dynamic Mechanical Properties of Cured Styrene-butadiene Rubber/Polybutadiene Blends, *Polym. Int.*, **49**, 216-222, 2000.
- Gatti L., World Intellectual Property Organization PCT/US99/08838, 1999.