دانشکده: مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته: مهندسی پلیمر گرایش: صنایع پلیمر

عنوان پایان نامه:

بررسی اثر زبری سطح بر اصطکاک آمیزه‌های لاستیک با استفاده از مدل‌های موجود

نام دانشجو:

محمدرضا عرب بافرانی

استاد راهنما:

مهدی رزاقی کاشانی

اسفند ۱۳۹۰

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده مهندسی شیمی

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای محمد رضا عرب باقرانی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان بررسی اثر زبری سطح بر اصطکاک آمیزه های لاستیک حاوی سیلیکا با استفاده از مدلهای موجود در تاریخ ۱۳۹۰/۱۲/۲۲ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد پلیمر پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر مهدی رزاقی کاشانی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر محمد حسین نوید فامیلی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر احمد رضا بهرامیان	استادیار	
استاد ناظر	دکتر میر حمیدرضا قریشی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر احمد رضا بهرامیان	استادیار	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه/رساله مورد تأیید است

امضاء استاد راهنما:

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند.

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۶/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۶/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۸/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

دانشجوی رشته [illegible] ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۸

متقاضی [illegible] دانشکده [illegible] شناسه ملی شوم کلیه شرکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع ثبتی بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران خوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهد نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراضی را از خود سلب نمودم.

امضاء

تاریخ ۸۸/۵/۲۵

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته **مهندسی پلیمر** است که در سال **۱۳۹۰** در دانشکده **مهندسی شیمی** دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر**مهدی رزاقی کاشانی** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **محمدرضا عرب بافرانی** دانشجوی رشته**مهندسی پلیمر** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: **محمدرضا عرب بافرانی**

تاریخ و امضا: **۱۳۹۱/۳/۲۰**

دانشکده: مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته: مهندسی پلیمر گرایش: صنایع پلیمر

عنوان پایان نامه:

بررسی اثر زبری سطح بر اصطکاک آمیزه‌های لاستیک با استفاده از مدل‌های موجود

نام دانشجو:

محمدرضا عرب بافرانی

استاد راهنما:

مهدی رزاقی کاشانی

اسفند ۱۳۹۰

تقدیم به آستان مقدس حضرت ولی عصر عجل الله فرجه

با سپاس از

خداوند متعال بابت اعطای توفیق انجام این پروژه

جناب آقای دکتر رزاقی بابت همکاری‌های پدرانه و صمیمانه‌شان در پروژه

جناب آقای دکتر پورحسینی بابت همکاری در پیشبرد پروژه

دانشجویان پلیمر دانشگاه تربیت مدرس و دوستان گرانقدرم از خوابگاه

شهید باقری و دانشگاه امیرکبیر بابت همراهیشان

و در نهایت با تشکر از ...

پدرم، که به من ایستادگی و صبر آموخت

مادرم، که به من عشق و محبت آموخت

برادرم، که به من پشتکار و استقامت آموخت

چکیده

اصطکاک یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مشاهده شده در حرکت دو سطح بر روی یکدیگر می‌باشد. مهم‌ترین سازوکار اصطکاک در لاستیک‌ها، اتلاف انرژی ناشی از پسماند تنش است. در این سازوکار، زبری سطح ساینده اثر مهمی بر اصطکاک لاستیک دارد، چرا که با تغییر زبری عوامل بسیاری که در اصطکاک دخیل هستند تغییر می‌کنند. در این پژوهش تلاش شده است اثر زبری بر روی اصطکاک در آمیزه‌های لاستیکی مطالعه شود. برای مطالعه اثر زبری در اصطکاک دو رویکرد آماری و فیزیکی وجود دارد که معروف‌ترین مدل فیزیکی در این زمینه مدل هاینریش – کلوپال است. رویکرد بررسی اثر زبری در این پژوهش، از یک سو مطالعات تجربی و از سوی دیگر شبیه سازی مدل هاینریش- کلوپال بوده است. در فرآیند شبیه سازی مدل، اصلاحاتی در آن انجام شد و مدل ویسکوالاستیک مورد استفاده آن تغییر داده شد. در نهایت اثر زبری بر اصطکاک هم در روش تجربی و هم در روش مدل سازی بررسی گردید و نتایج این دو روش نیز هم‌خوانی داشتند. نوشتن برنامه رایانه‌ای مبتنی بر مدل‌های عددی چالش‌های خود را داشت که این مهم انجام پذیرفت. در این پژوهش زبری سطوح از روش تحلیل فرکتال محاسبه شد، که نشان داده شد تحلیل فرکتال قابلیت نشان دادن مشخصه‌های زبری سطح را دارد. اثر زبری بر اصطکاک آمیزه‌های لاستیکی در سطوح زبر شیشه و سنباده بررسی گردید که در نهایت با پیش بینی‌های مورد انتظار هم‌خوانی داشت و دیده شد اصطکاک لاستیک بستگی زیادی به زبری سطح دارد. با افزودن پرکننده از یک سو اصطکاک آمیزه تحت تأثیر قرار گرفته و از سوی دیگر توانمندی مدل برای نشان دادن ضریب اصطکاک کاهش یافت.

کلیدواژه: اصطکاک لاستیک، زبری، مدل هاینریش کلوپال، مدل سازی اصطکاک اتلافی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه.**

فهرست مطالب..... ز

فهرست شکل ها..... د

فهرست جداول..... ز

فصل ۱- مقدمه..... ۲

فصل ۲- نظری..... ۷

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ مبانی نظری ۸

۲-۲-۱ تریبولوژی چیست؟..... ۸

۲-۲-۱-۱ اصطکاک..... ۸

۲-۲-۲ تاریخچه اصطکاک در پلیمرها..... ۱۱

۲-۲-۳ سازوکارهای اصطکاک..... ۱۳

۲-۲-۳-۱ چسبندگی..... ۱۶

۲-۲-۳-۲ اصطکاک تغییر فرم..... ۱۷

۲-۲-۴ زبری و نقش آن در اصطکاک..... ۲۳

۲-۲-۴-۱ زبری چیست؟..... ۲۳

۲-۲-۴-۲ مؤلفه‌های آماری اندازه گیری زبری سطح: ۲۵

۲-۳ مرور مقالات ۲۸

۲-۳-۱ رویکردهای مختلف بررسی اثر زبری سطح..... ۲۸

۲-۳-۲ روش‌های آماری در طراحی آزمایش برای لاستیک..... ۲۹

۲-۳-۳ روش‌های مدل‌سازی فیزیکی برای بررسی اثر زبری سطح بر اصطکاک لاستیک..... ۳۲

۲-۳-۳-۱ ناهمواری تک قله‌ای..... ۳۲

۲-۳-۳-۲ ناهمواری چند قله‌ای با چینش منظم: به عنوان مثال یک موج سینوسی..... ۳۳

۲-۳-۳-۳ ناهمواری چند قله‌ای با چینش نامنظم(سطح واقعی)..... ۳۵

۲-۳-۴ مروری بر مقالات مبتنی بر روش تحلیل فرکتال برای پیش بینی اصطکاک پسماند..... ۴۰

۲-۴ سوالات تحقیق ۴۶

فصل ۳- مبانی مدل انتخابی..... ۴۸

۳-۱ مقدمه ۴۸

۳-۲ مبانی هاینریش-کلوپال در مدل پیشنهادی خود ۴۸

۳-۳ روش به دست آوردن معادله ضریب اصطکاک در مدل هاینریش- کلوپال: ۵۱
۴-۳ توصیف معادله هاینریش کلوپال برای ضریب اصطکاک ۵۵
فصل ۴- مواد و روش‌های آزمایش ۶۸
۱-۴ مقدمه ۶۸
۲-۴ ساختار حاکم بر پژوهش ۶۸
۳-۴ مواد ۷۰
۴-۳-۱ آمیزه لاستیکی ۷۰
۴-۳-۲ سطوح زبر ۷۱
۴-۴ دستگاه‌ها ۷۲
۴-۴-۱ تجهیزات مورد استفاده جهت تهیه آمیزه لاستیکی ۷۲
۴-۴-۲ دستگاه زبری سنج سطح (Profilometer) ۷۳
۴-۴-۳ دستگاه آنالیز دینامیکی مکانیکی (D M A) ۷۳
۴-۴-۴ دستگاه اصطکاک سنج ۷۴
۴-۴-۵ دستگاه زبر کردن سطوح ساینده ۷۴
۴-۵ روش‌های کار ۷۵
۴-۵-۱ آماده سازی سطوح زبر و نمونه‌های آمیزه ۷۵
۴-۵-۱-۱ آماده سازی سطوح زبر ساینده ۷۵
۴-۵-۱-۲ آماده سازی نمونه‌های آمیزه لاستیکی ۷۶
۴-۵-۲ محاسبه پارامترهای زبری سطح ۷۷
۴-۵-۲-۱ یافتن پروفایل سطح زبر توسط دستگاه زبری سنج سوزنی ۷۷
۴-۵-۲-۲ محاسبه پارامترهای سطح فرکتال توسط کد نوشته شده با متلب ۷۹
۴-۵-۳ خواص دینامیکی مکانیکی آمیزه لاستیکی ۷۹
۴-۵-۳-۱ آزمون DMA و یافتن منحنی مرجع ۸۰
۴-۵-۳-۲ تطبیق معادله تعمیم یافته ماکسول بر روی نتایج ۸۰
۴-۵-۴ تعیین ضریب اصطکاک به روش تجربی ۸۱
۴-۵-۵ توضیحات کد نوشته شده بر اساس مدل ۸۲
۴-۵-۵-۱ منطق حاکم بر کد نوشته شده مبتنی بر مدل ۸۲
۴-۵-۵-۲ بررسی پارامتری برنامه نوشته شده ۸۴
فصل ۵- نتایج و بحث ۸۶
۵-۱ مقدمه ۸۶
۵-۲ تعیین مشخصات زبری سطح برای سطوح ساینده ۸۶
۵-۲-۱ تعیین زبری سطح با استفاده از روش‌های آماری ۸۶
۵-۲-۲ تعیین زبری سطح با استفاده از تحلیل فرکتال ۸۹
۵-۳ تعیین ضریب اصطکاک به روش تجربی ۹۲
۵-۳-۱ حذف اثر سازوکار چسبندگی در اصطکاک ۹۲

۵-۳-۲ آمیزه بدون سیلیکا ۹۳
۵-۳-۳ آمیزه دارای سیلیکا ۹۶
۵-۴ بررسی خواص ویسکو الاستیک آمیزه‌های لاستیکی ۹۸
۵-۴-۱ نتایج منحنی مرجع برای آمیزه‌های فاقد و حاوی پرکننده ۹۸
۵-۴-۲ نتایج حاصل از انطباق مدل ماکسول تعمیم یافته ۱۰۱
۵-۵ نتایج مربوط به بررسی مدل ۱۰۵
۵-۵-۱ بررسی اثر استفاده تغییر مدل ویسکوالاستیک در مدل ۱۰۵
۵-۵-۲ بررسی اثر تغییر پارامتر آزاد b در برنامه ۱۰۷
۵-۵-۳ اثر تغییر بار عمودی بر ضریب اصطکاک ۱۰۸
۵-۶ بررسی اثر زبری بر ضریب اصطکاک به کمک مدل ۱۰۹
۵-۶-۱ آمیزه بدون سیلیکا ۱۰۹
۵-۶-۲ آمیزه دارای سیلیکا ۱۱۱
۵-۷ مقایسه نتایج مدل با نتایج تجربی ۱۱۲
۵-۷-۱ مقایسه نتایج اصطکاک حاصل ازمدل با آزمایشات برای لاستیک فاقد سیلیکا ۱۱۲
۵-۷-۲ مقایسه نتایج مدل و تجربه، برای نمونه‌های حاوی سیلیکا ۱۱۶
فصل ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۹
۶-۱ نتیجه گیری نهایی ۱۱۹
۶-۲ پیشنهادات برای تحقیقات آتی ۱۲۰

فهرست شکل‌ها و نمودارها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱- مالش سطح بر روی سطح دیگر[۱] ۹
شکل ۲-۲ دو سازوکار چسبندگی و تغییر فرم در اصطکاک[۷] ۱۴
شکل ۲-۳ اصطکاک چسبندگی و نظریه اتصال و برش[۳] ۱۷
شکل ۲-۴ شکست ناهمواری‌ها در نتیجه درگیری[۲] ۱۸
شکل ۲-۵ تشکیل لایه مذاب در اصطکاک پلاستیک[۲] ۱۹
شکل ۲-۶ سازوکار تغییر فرم در اصطکاک لاستیک ها[۳] ۲۰
شکل ۲-۷ رابطه اصطکاک و سرعت در لاستیک ها[۱] ۲۱
شکل ۲-۸ کاهش اتصال بین دره‌ها با سطح مقابل[۲] ۲۲
شکل ۲-۹ رابطه ضریب اصطکاک پسماند و سرعت در لاستیک [۱] ۲۳
شکل ۲-۱۰ شمایی از سطوح فرکتال [۲] ۲۵
شکل ۲-۱۱ نمایی از پارامتر Ra [۲] ۲۶
شکل ۲-۱۲ نمایی از سه کمیت مربوط به مشخصه سطح فرکتال[۱۵] ۲۷
شکل ۲-۱۳ نمایی از مدل ناهمواری تک قله‌ای[۱] ۳۲
شکل ۲-۱۴ ناهمواری چند قله‌ای با چینش سینوسی[۱] ۳۴
شکل ۲-۱۵سطح زبر با چینش نامنظم[۱] ۳۶
شکل ۲-۱۶ مدل استوانه‌ای برای نشان دادن سطح زبر متحرک بر روی لاستیک[۲۶] ۳۷
شکل ۲-۱۷ رابطه ضریب اصطکاک بر حسب سرعت رسم شده از مدل[۲۱] ۳۸
شکل ۲-۱۸ مقایسه ضریب اصطکاک تجربی و محاسباتی(ضریب اصطکاک بر حسب سرعت)[۲۲] ۳۹
شکل ۲-۱۹مقایسه ضریب اصطکاک تجربی با نتایج مدل هاینریش کلوپال[۱۸] ۴۳
شکل ۲-۲۰نمونه پروفایل تنش در یک لاستیک به کمک برنامه المان محدود[۳۰] ۴۴
شکل ۳-۱ شماتیکی از حرکت مدل زنر بر روی سطح زبر[۶] ۵۲
شکل ۳-۲ شماتیکی از رابطه مقیاس‌های اندازه گیری زبری سطح با یکدیگر ۵۷
شکل ۳-۳منحنی تابع خود همبستگی[۱۵] ۶۰
شکل ۳-۴فاصله بین متوسط پروفایل و عمق نفوذ d [۶] ۶۲
شکل ۳-۵ شماتیکی از اثر قله‌ها و حذف نقاط کم ارتفاع[۲] ۶۳
شکل ۳-۶ مقایسه اثر حضور s در توزیع ناهمواری‌ها و میانگین ارتفاع پروفایل[۱۵] ۶۵
شکل ۳-۷ شماتیکی ازمدل ماکسول تعمیم یافته ۶۶
شکل ۴-۱شمایی از ساختار حاکم بر آزمایشات ۶۹
شکل ۴-۲ نمونه سنگ کف پوش خیابان ۷۲
شکل ۴-۳ تصویر دستگاه زبری سنج سورترونیک ۲۵ ..... ۷۳

شکل ۴-۴ دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک ۷۴
شکل ۴-۵ نمونه صفحه شیشه زبر شده با اندازه ذرات ۱۰۰۰ ..... ۷۵
شکل ۴-۶ نمونه کاغذ سنباده شده آماده جهت آزمون اصطکاک ۷۶
شکل ۴-۷ تصویر نمونه‌های آمیزه استفاده شده در تست اصطکاک ۷۷
شکل ۴-۸ شمایی از پروفایل زبری سطح ۷۸
شکل ۵-۱مقایسه Ra برای زبری‌های مختلف سنباده ۸۷
شکل ۵-۲پارامتر Ra برای سطوح زبر شیشه ۸۸
شکل ۵-۳ منحنی مربوط به تابع خود همبستگی برای سنباده با زبری ۸۰۰ ..... ۹۰
شکل ۵-۴مقایسه پارامتر B برای سطوح زبر سنباده ۹۱
شکل ۵-۵ بررسی اثر حذف سازوکار چسبندگی در ضریب اصطکاک (منحنی مشکی مربوط به حضور چسبندگی و منحنی طوسی مربوط به حذف اثر چسبندگی است)..... ۹۳
شکل ۵-۶ ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، نتایج حاصل از آزمایش تجربی برای سه سطح زبر سنباده و آمیزه بدون سیلیکا ۹۴
شکل ۵-۷ نمودار مربوط به ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، در آمیزه‌های بدون سیلیکا بر روی سطوح شیشه ۹۵
شکل ۵-۸ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، آزمایش تجربی برای سه سطح زبر سنباده در نمونه حاوی سیلیکا ۹۷
شکل ۵-۹ آزمون دینامیکی مکانیکی به صورت هم دما در دماهای مختلف ۹۸
شکل ۵-۱۰منحنی مرجع برای آمیزه بدون سیلیکا(منحنی مشکی مربوط به مدول ذخیره و منحنی طوسی مربوط به اتلاف می‌باشد) ۹۹
شکل ۵-۱۱منحنی مرجع برای آمیزه دارای سیلیکا ۱۰۰
شکل ۵-۱۲ مقایسه منحنی مرجع با معادله رسم شده منطبق شده بر آن (الف: مدول ذخیره، ب:مدول اتلافی) منحنی‌های طوسی مربوط به داده‌های آزمایش و منحنی‌های مشکی مربوط به مدل است.....۱۰۲
شکل ۵-۱۳مقایسه منحنی مرجع آمیزه حاوی سیلیکا با معادله رسم شده منطبق شده بر آن (الف: مدول ذخیره، ب:مدول اتلافی)(منحنی مشکی رنگ مربوط به نتایج تجربی و منحنی طوسی مربوط به مدل می‌باشد) ۱۰۳
شکل ۵-۱۴ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب سرعت – مقایسه تغییر مدل ویسکوالاستیک (منحنی طوسی مدل زنر با ۱ زمان استراحت از تنش، منحنی مشکی مدل ماکسول تعمیم یافته با ۱۲ زمان استراحت از تنش) ۱۰۶
شکل ۵-۱۵ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب سرعت برای آمیزه و سطح زبر نمونه، بار ۵۰ کیلوگرم الف) b=۱ و ب) b=۱۰ .....۱۰۷
شکل ۵-۱۶بررسی اثر تغییر بار عمودی بر ضریب اصطکاک محاسبه شده توسط مدل، برای نمونه مرجع، مقدار بار عمودی در منحنی خط چین، ۲۰، در منحنی طوسی ۵۰ و در منحنی مشکی ۱۰۰ کیلوگرم می‌باشد. ۱۰۸

شکل ۵-۱۷ منحنی ضریب اصطکاک بر حسب سرعت برای زبری‌های مختلف سنباده در آمیزه بدون سیلیکا، نمودار مشکی p۳۲۰، و خط چین P۴۰۰ و طوسی P۸۰۰ است. ۱۰۹
شکل ۵-۱۸ منحنی ضریب اصطکاک بر حسب سرعت برای زبری‌های مختلف شیشه در آمیزه بدون سیلیکا. ۱۱۰
شکل ۵-۱۹ منحنی ضریب اصطکاک بر حسب سرعت برای زبری‌های مختلف سنباده در آمیزه حاوی سیلیکا، نمودار خط چین p۳۲۰، و طوسی P۴۰۰ و مشکی P۸۰۰ است. ۱۱۱
شکل ۵-۲۰ مقایسه نتایج ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، حاصل از مدل با داده‌های تجربی برای سطح سنباده P۳۲۰، b=۲۶ (منحنی مشکی مربوط به مدل ماکسول تعمیم یافته و منحنی مشکی مربوط به مدل زنر) ۱۱۳
شکل ۵-۲۱مقایسه نتایج ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، حاصل از مدل با داده‌های تجربی برای سطح سنباده P۴۰۰و b=۱۶.۳(منحنی مشکی مربوط به مدل ماکسول تعمیم یافته و منحنی طوسی مربوط به مدل زنر) ۱۱۳
شکل ۵-۲۲مقایسه نتایج ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، حاصل از مدل با داده‌های تجربی برای سطح سنباده P۸۰۰ وb=۲۴۰ (منحنی مشکی مدل ماکسول تعمیم یافته و منحنی طوسی مدل زنر تک جمله‌ای) ۱۱۴
شکل ۵-۲۳مقایسه نتایج ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، حاصل از مدل با داده‌های تجربی برای سطوح شیشه- الف) P۲۲۰ و b=۲۰۰ ب)P٤۲۰ و b=۱۰ ج)P٦۰۰ و b=۲۱۵ و د)P۱۰۰۰ و b=۴۲ ۱۱۵
شکل ۵-۲۴ مقایسه نتایج ضریب اصطکاک بر حسب سرعت، حاصل از مدل با داده‌های تجربی برای سطح سنباده P۳۲۰ و b=۴۰ – آمیزه حاوی ۶۰ phr سیلیکا ۱۱۶

فهرست جداول

جدول ۴-۱ مشخصات سیلیکای آذرین مورد استفاده در این تحقیق ۷۰
جدول ۴-۲مواد مورد استفاده در تهیه آمیزه‌های پلیمری ۷۱
جدول ۵-۱نتایج حاصل از آزمون زبری سطح سنباده ۸۷
جدول ۵-۲نتایج حاصل از آزمون زبری سطح شیشه ۸۸
جدول ۵-۳نتایج تحلیل فرکتال برای سطوح سنباده ۹۰
جدول ۵-۴نتایج آزمون زبری و تحلیل فرکتال برای سطح شیشه زبر ۹۱
جدول ۵-۵ضرایب معادله WLF برای آمیزه بدون سیلیکا ۹۹
جدول ۵-۶ ضرایب معادله WLF برای آمیزه حاوی سیلیکا ۱۰۰
جدول ۵-۷زمانهای استراحت و مدول منطبق شده بر روی منحنی آمیزه بدون فیلر، مقدار اولیه مدول:۴.۰۶ ..... ۱۰۲
جدول ۵-۸زمان استراحت ومدول منطبق شده روی منحنی مرجع آمیزه حاوی سیلیکا، مقدار اولیه مدول:۴.۰۶ ..... ۱۰۴

فصل اول

مقدمه

فصل ۱- مقدمه

امروزه خواص تریبولوژیکی[۱] از جمله خصوصیات بسیار مهم مواد به شمار می‌روند به گونه‌ای که مهار و کنترل پدیده‌های اصطکاک و سایش می‌تواند تا حد زیادی در کارایی و عمر کاربری مواد و ابزارها اثر بگذارد. در این میان، اصطکاک نسبت به سایر پدیده‌های مربوط به سطح اهمیت بیشتری داشته و ضریب اصطکاک نقش بسزایی در تعیین بسیاری از خواص مواد از جمله کشانش[۲]، فرسایش[۳] و مقاومت غلطشی[۴] دارد.

در پلیمرها سازوکارهای اصطکاک، متنوع بوده و در پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها با یکدیگر متفاوت است. اصطکاک در پلاستیک، از جهات بسیاری با فلزات شباهت دارد، درحالیکه در لاستیک به دلیل داشتن خواص ویسکوالاستیک، سازوکارهای اصطکاک با آنچه در فلزات شناخته شده است تفاوت دارد، و نیاز به بررسی و تبیین موضوع اصطکاک در آن‌ها، لازم و ضروری می‌نماید. اصطکاک لاستیک بر روی سطوح زبر، عمدتاً توسط اتلاف انرژی پسماند در لاستیک تحت تأثیر تغییر فرم‌های دینامیک ناشی از زبری سطح تعیین می‌شود.[۱]

یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر اصطکاک لاستیک، زبری سطح ساینده می‌باشد که تعیین کننده اندازه سطح تماس واقعی و توزیع فشار بر روی سطح تماس است. برای بررسی اصطکاک لاستیک و اثر زبری بر آن دو رویکرد موجود است، اول استفاده از روش‌های آماری برای بررسی اثر زبری و دوم ارائه روابط فیزیکی جهت تعیین ضریب اصطکاک. روش‌های آماری اگرچه هنوز کاربرد زیادی دارند، اما عموماً سطح کارایی پایینی داشته و مبتنی بر آزمایشات تجربی می‌باشند.[۲] لزوم پیش بینی ضریب اصطکاک در شرایط مختلف آزمون و مطالعه اثر زبری در اصطکاک لاستیک‌ها، نیاز بسیار برای ایجاد مدل‌های فیزیکی

---

[۱] Tribology

[۲] Traction

[۳] Wear

[۴] Rolling resistance

قابل اتکا را ضرورت بخشیده است. از سوی دیگر در محاسبات عددی و شبیه سازی مسائل تماس لاستیک با سطوح واقعی (همانند آنالیز المان محدود غلطش تایر بر سطح جاده) نیاز به اعمال دقیق ضریب اصطکاک (به عنوان تابعی از فشار، سرعت و زبری) وجود دارد. نیاز به مدلی که در آن فیزیک سطح ساینده و فیزیک لاستیک در کنار یکدیگر به تبیین اصطکاک لاستیک بینجامد محققین را به سمت ارائه مدل‌های فیزیکی پیش برد که در این مورد محققینی مانند هاینریش و کلوپال[۱] و پرسون[۲] مطالعاتی انجام داده و مدل‌هایی ارائه نموده‌اند.[۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲]البته عمر این مدل‌ها به حداکثر یک دهه قبل باز می‌گردد و هنوز تحقیقات زیادی برای دستیابی به مدل مطلوب و بهینه برای شبیه سازی اصطکاک لاستیک نیاز است.

در سال‌های اخیر با شناخته شدن این مدل‌ها، پژوهش‌هایی برای بررسی میزان کارایی آن‌ها (بالاخص مدل هاینریش- کلوپال) انجام شده است. متأسفانه مدل ارائه شده توسط گروه هاینریش- کلوپال، اگرچه مدلی نسبتاً توانمندتر از سایرین است، ولی پیچیدگی بسیار زیاد آن، اعم از معادلات پیچیده، دشواری حل معادلات به صورت عددی، و تعداد کمیت‌های موثر در مدل، پژوهش در این زمینه را با چالش‌های بسیاری روبرو کرده است، با این وجود نتایج این پژوهش‌ها نشان می دهد که مدل توانایی خوبی در نشان دادن ضریب اصطکاک و تأثیر برخی کمیت‌های موثر بر آن دارد.[۱۳و۱۵و۱۶و۱۸]

علیرغم این پژوهش‌ها هنوز سوالات بدون پاسخ مهمی وجود دارند که در حقیقت ضرورت ادامه چنین پژوهشی را تبیین می‌نمایند. علاوه بر این، مبحث تریبولوژی و در مرکز آن بحث اصطکاک پلیمرها در حد بسیار کمی در ایران مورد توجه قرار گرفته است و با توجه به اهمیت آن در صنایع پلیمر و به خصوص صنعت لاستیک و تایر، پرداختن به آن ضروری به نظر می‌رسد. چنین مدل‌هایی که بر اساس فیزیک اصطکاک لاستیک بر روی سطوح زبر پایه گذاری شده‌اند، می‌توانند به عنوان مبنایی برای مطالعات

[۱] Heinrich & Kluppel

[۲] Person

تجربی و ارزیابی نتایج حاصل به کار گرفته شوند. لذا به منظور مقایسه نتایج تجربی با مدل‌های فیزیکی، شبیه سازی آن‌ها توسط رایانه ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه این مدل توسط معدود گروه‌هایی در دنیا شبیه سازی شده است، ولی به دلیل دشواری و پیچیدگی بسیار زیاد شبیه سازی آن، هیچ یک از گروه‌های مذکور، برنامه حاصل از کار خود را در اختیار سایر محققین نگذاشته و حتی تیم ارائه دهنده مدل نیز جزییات مورد نیاز برای شبیه سازی رایانه‌ای را ارائه نکرده است. لذا فهم نظری مدل‌ها، استخراج معادلات، تبدیل آن‌ها به فرم عددی، شبیه سازی مدل به فرم رایانه‌ای و استفاده از این برنامه در مطالعات تجربی و کاربردی نیاز دیگری است که منجر به تعریف این پژوهش گردید. از دیگر اهداف این پژوهش نقد و بررسی مدل‌های مذکور و در صورت نیاز اعمال اصلاحاتی در جهت بهبود توانایی آن‌ها در پیش بینی نتایج تجربی بوده است. دشواری‌های حل عددی مدل با کد نوشته شده و حساسیت بسیار بالای آن به کمیت‌ها و نیز در کنار موارد فوق به دشواری‌های پروژه افزود.

اولین گام در این تحقیق انتخاب قاعده‌مند سطح زبر و روش مناسب برای توصیف مشخصه‌های زبری سطح در ارتباط با اصطکاک لاستیک بوده است. اندازه گیری اصطکاک لاستیک بر روی سطوح انتخاب شده و اندازه گیری مشخصه‌های زبری سطوح و امکان ایجاد ارتباط منطقی بین آن‌ها در مرحله بعد مدنظر قرار گرفت. از آنجایی که رویه آماری قبلاً در گروه، توسط آقای اسمعیلی مورد مطالعه قرار گرفته بود و با توجه به خود متشابه بودن بسیاری از سطوح واقعی در مقیاس وسیعی از زبری و نقش مهم این موضوع در تبیین مدل‌های فیزیکی، از روش تحلیل فرکتال[1] برای توضیح نتایج تجربی و مدل‌های نظری استفاده شد. بررسی اثر مشخصه‌های فرکتال سطوح خود متشابه در آزمایشات تجربی اصطکاک و مقایسه اثر آن‌ها در مدل‌های نظری، مستلزم ایجاد یک برنامه رایانه‌ای برای شبیه سازی یکی از مدل‌های فیزیکی پرکاربرد(مدل هاینریش – کلوپال) بود. لذا چالش‌های تبدیل این مدل فیزیکی به برنامه رایانه‌ای و مطالعه پارامتریک این مدل پیش رو قرار گرفت.

[1] Fractal analysis