

کلیه حقوق مادی و معنوی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه  
متعلق به دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) است.



دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)  
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد (برق-کنترل)

مدلسازی و طراحی کنترل کننده تطبیقی برای حذف اصطکاک در سیستم-

های مکانیکی

تحقیق و تدوین:

سید محمد حسن صدرقائینی

استاد راهنما:

دکتر علیرضا یزدی زاده

بهمن ماه ۱۳۸۷

این پایان نامه تحت عنوان "مدلسازی و طراحی کنترل کننده تطبیقی برای حذف

اصطکاک در سیستم‌های مکانیکی" در تاریخ ۸۷/۱۱/۲۹ توسط هیئت داوران متشکل از

اساتید محترم ذیل:

۱- جناب آقای دکتر یزدی زاده (استاد راهنما)

۲- جناب آقای دکتر لطیف شبگاهی (استاد ارزیاب)

۳- جناب آقای دکتر عرب خابوری (استاد ارزیاب)

۴- جناب آقای دکتر نجیمی (نماینده تحصیلات تکمیلی)

با شماره ۱۸/۲۵ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

جناب دکتر سالم نیا

ریاست محترم دانشکده برق

## تشر و قدردانی

وظیفه خود می دانم سپاسگزار تمام آنهایی باشم که در این دوره ارزشمند بودنشان و امیدشان راهگشای من بود؛ خانواده و همسر عزیزم که همانند تمام روزهای گذشته با صبر و حوصله در کنارم بودند. اساتید عزیز و گرانقدر دانشکده مهندسی برق و بخصوص جناب آقای دکتر یزدی زاده که با تلاش های بی شائبه خود نه تنها در انجام این پایان نامه بلکه در تمام دوره تحصیل مرا یاری نمودند و به هنگام نیاز برای حل مشکلات اینجانب از هیچ کمکی دریغ نوزیدند. برای ایشان آرزوی سلامتی، موفقیت و سربلندی را دارم.

همچنین تشر و قدردانی می نمایم از جناب آقای دکتر لطیف شبگاهی و جناب آقای دکتر عرب خابوری که برای داوری این پایان نامه قبول زحمت نمودند و وقت گرانبهای خود را در اختیار اینجانب قرار دادند.

# فهرست

فصل ۱. مقدمه	۲
۱-۱. نیاز و هدف	۳
۲-۱. مروری بر ساختار پایان نامه	۵
فصل ۲. شناسایی اصطکاک	۷
۱-۲. مقدمه	۸
۲-۲. پدیده اصطکاک	۸
۱-۲-۲. تاثیر اصطکاک بر سرعت ماندگار	۹
۲-۲-۲. اصطکاک استاتیک و نیروی شکست	۱۰
۳-۲-۲. پس فازی اصطکاک	۱۲
۳-۲. ایجاد سیکل حدی بوسیله اصطکاک	۱۲
۴-۲. خلاصه فصل	۱۳
فصل ۳. مدل سازی اصطکاک	۱۵
۱-۳. مقدمه	۱۶
۲-۳. مدل های استاتیک	۱۶
۱-۲-۳. مدل های کلاسیک	۱۷
۲-۲-۳. مدل Karnopp	۱۹
۳-۲-۳. مدل آرمسترانگ	۲۰
۳-۳. مدل های دینامیک	۲۱
۱-۳-۳. مدل دال	۲۱
۲-۳-۳. مدل Bristle	۲۳
۳-۳-۳. مدل Sorine - Bliman	۲۴
۴-۳-۳. مدل لوگری	۲۶

۳۲	.....مقایسه مدل Bliman-Sorine و مدل لوگری
۳۲	.....وابستگی به نرخ
۳۳	.....رفتار نوسانی در سرعت های کم
۳۵	.....خلاصه فصل
۳۷	.....فصل ۴. روش های کنترل اصطکاک
۳۸	.....مقدمه
۳۸	.....جبران ساز اصطکاک کولمب تطبیقی با پایداری نمایی
۳۹	.....جبران ساز اصطکاک تطبیقی
۴۰	.....جبران ساز اصطکاک پایدار نمایی
۴۱	.....شبیه سازی و نتایج عددی
۴۶	.....سیکل های حدی با منشاء اصطکاک
۴۷	.....کنترل مکان بوسیله یک رویتگر اصطکاک در مدل لوگری
۴۸	.....کنترل سرعت بوسیله رویتگر اصطکاک در مدل لوگری
۴۹	.....استفاده از فیدبک حالت در جبران سازی اصطکاک لوگری
۵۱	.....خلاصه فصل
۵۳	.....فصل ۵. کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی برای کنترل اصطکاک در خودرو
۵۴	.....مقدمه
۵۶	.....هدف از کنترل اصطکاک در خودرو
۵۶	.....معرفی سیستم یک چهارم خودرو
۵۶	.....ضریب لغزش
۵۸	.....دینامیک سیستم ترمز ضد قفل
۵۹	.....مروری بر روشهای کنترلی سیستم ترمز ضد قفل
۶۰	.....مدل سازی تایر
۶۱	.....مدل یک چهارم خودرو و مدل لوگری
۶۱	.....ارائه رویتگر اصطکاک بین تایر و جاده
۶۲	.....رویتگر مد لغزشی

۶۳	..... ۲-۵-۵. رویتگر تطبیقی
۶۵	..... ۶-۵. طراحی کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی
۶۵	..... ۱-۶-۵. کنترل کننده نامی برای جبران سازی اصطکاک
۶۶	..... ۲-۶-۵. کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی
۶۷	..... ۳-۶-۵. آنالیز کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی
۶۹	..... ۴-۶-۵. نتایج شبیه سازی کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی
۷۷	..... ۷-۵. خلاصه فصل
۷۹	..... فصل ۶. نتیجه گیری و پیشنهادات
۸۰	..... ۱-۶. جمع بندی
۸۰	..... ۲-۶. پیشنهادات
۸۲	..... مراجع



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: تماس میکروسکوپی یک بین دو صفحه..... ۹
- شکل ۲-۲: رابطه بین سرعت و نیروی اصطکاک. ناحیه به چهار قسمت قابل تقسیم است..... ۱۰
- شکل ۳-۲: به تصویر کشیدن نیروی شکست..... ۱۰
- شکل ۴-۲: رابطه بین اصطکاک و جابجایی..... ۱۱
- شکل ۵-۲: رابطه بین نرخ نیروی اعمالی و نیروی شکست..... ۱۱
- شکل ۶-۲: رابطه بین اصطکاک و جابجایی پیش لغزشی..... ۱۱
- شکل ۷-۲: هیستریزیس بین اصطکاک و سرعت..... ۱۲
- شکل ۸-۲: نتایج عددی کنترل مکان PID..... ۱۳
- شکل ۱-۳: مثالهایی از مدل‌های استاتیکی اصطکاک. شکل (a) اصطکاک کولمب، شکل (b) اصطکاک کولمب بعلاوه ویسکوز، شکل (c) اصطکاک کولمب و ویسکوز بعلاوه Stiction و شکل (d) چگونگی امکان کاهش پیوسته نیروی اصطکاک از مقدار اصطکاک استاتیکی..... ۱۸
- شکل ۲-۳: بلوک دیاگرام مدل اصطکاک Karnopp..... ۲۰
- شکل ۳-۳: نیروی اصطکاک تنها تابعی از جابجایی در مدل اصطکاک دال..... ۲۲
- شکل ۴-۳: واسط اصطکاک میکروسکوپی بین دو سطح، بصورت تماس بین شاخک ها..... ۲۴
- شکل ۵-۳: نمایش یک شاخک تنها که میانگین انحراف شاخک را در شکل ۳-۴ نشان می‌دهد..... ۲۶
- شکل ۶-۳: جابجایی پیش لغزشی..... ۲۹
- شکل ۷-۳: هیستریزیس در نیروی اصطکاک با تغییر فرکانس سرعت..... ۲۹
- شکل ۸-۳: رابطه بین نیروی شکست و نرخ افزایش نیروی اعمالی [29]..... ۳۰
- شکل ۹-۳: آزمایش مرسوم حرکت ایستایی- لغزشی..... ۳۱
- شکل ۱۰-۳: نمایش رابطه مکان، سرعت و اصطکاک در حرکت ایستایی- لغزشی [30]..... ۳۱
- شکل ۱۱-۳: محدودیت مدل لوگری در حافظه نقطه بازگشت. داده های آزمایش عملی (خط پر) و داده های مدل لوگری (خط چین) [19]..... ۳۲
- شکل ۱۲-۳: خروجی سیستم (۲۸-۳) با اصطکاک Bliman-Sorine به یک گشتاور اغتشاش سینوسی کوچک. در شکل بالا مکان (خط پر) و سرعت (خط چین) نمایش داده شده و در شکل پایین نیروی اصطکاک (خط پر) و گشتاور اعمالی (خط چین) نمایش داده شده است..... ۳۴
- شکل ۱۳-۳: خروجی سیستم (۲۸-۳) با اصطکاک لوگری به یک گشتاور اغتشاش سینوسی کوچک. در شکل بالا مکان (خط پر) و سرعت (خط چین) نمایش داده شده و در شکل پایین نیروی اصطکاک (خط پر) و گشتاور اعمالی (خط چین) نمایش داده شده است..... ۳۴

- شکل ۳-۱۴: صفحه فاز شکل ۴-۱۰ برای مدل Bliman Sorine. نمایش  $F^*$  (خط چین) و نقاط اصطکاک صفر
- ۳۵ ..... (خط چین - نقطه)
- شکل ۴-۱: سیگنال اعمالی به کنترل کنندهها. ۴۳
- شکل ۴-۲: خطای مکان با اعمال ورودی در شکل ۴-۱. ۴۳
- شکل ۴-۳: خطای سرعت با اعمال ورودی در شکل ۴-۱. ۴۳
- شکل ۴-۴: تخمین مقدار  $k_c$  با اعمال ورودی در شکل ۴-۱. ۴۴
- شکل ۴-۵: سیگنال اعمالی با فرکانس بالاتر به کنترل کنندهها. ۴۴
- شکل ۴-۶: خطای مکان با اعمال ورودی در ..... ۴۵
- شکل ۴-۷: خطای مکان با اعمال ورودی در شکل ۴-۵. ۴۵
- شکل ۴-۸: بلوک دیاگرام سرو موتور با کنترل کننده PID. ۴۶
- شکل ۴-۹: نتایج عددی کنترل کننده مکان PID در شکل ۴-۸. ۴۷
- شکل ۴-۱۰: بلوک دیاگرام کنترل کننده مکان با استفاده از یک رویکرد اصطکاک. ۴۸
- شکل ۴-۱۱: بلوک دیاگرام یک موتور با کنترل گشتاور و اعمال بار. ۵۱
- شکل ۴-۱۲: بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل حرکت با کنترل پیش خور و پس خور حالت. ۵۱
- شکل ۵-۱: نمونه ای از ضرایب اصطکاک طولی (خط پیوسته) و جانبی (خط چین) برحسب درصد لغزش
- چرخ ..... ۵۷
- شکل ۵-۲: جهت و نقطه اثر نیروهای وارد بر چرخ در حین ترمز ..... ۵۸
- شکل ۵-۳: توزیع فشار بین تایر و جاده در حالت استاتیک ..... ۶۰
- شکل ۴-۵: نمودار سرعت-مکان. کنترل کننده در مکان ۱۶۶ متری از شروع حرکت و در سرعت ۳۲ متر بر
- ثانیه اعمال شده است. ۷۰
- شکل ۵-۵: تخمین ضریب چسبندگی جاده. در ابتدا جاده خشک است در ثانیه چهارم خیس می شود و کم کم
- جاده برفی می شود. ۷۱
- شکل ۵-۶: سرعت دورانی تایر. در لحظه اعمال کنترل کننده برای ایجاد لغزش ۰/۲ سرعت تایر از ۱۲۷ به ۱۰۲
- کاهش میابد. ۷۱
- شکل ۵-۷: نمایش تغییرات سرعت چرخ به نسبت سرعت خودرو. ۷۲
- شکل ۵-۸: نمایش مقدار لغزش چرخ قبل و بعد از اعمال کنترل کننده. ۷۲
- شکل ۵-۹: نمایش مقدار خطای کنترل کننده برای بدست آوردن لغزش ۰/۲. ۷۳
- شکل ۵-۱۰: نمایش برقراری شرط دوم قضیه پایداری کنترل کننده. ۷۳
- شکل ۵-۱۱: نمودار جابجایی خودرو قبل و بعد از اعمال کنترل کننده تا رسیدن به سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه پس
- از طی ۱۳۰ متر. ۷۴

- شکل ۵-۱۲: نمودار سرعت- مکان. بدون اعمال کنترل کننده. ۷۵.....
- شکل ۵-۱۳: تخمین ضریب چسبندگی جاده. قبل و بعد از اعمال ترمز. ۷۵.....
- شکل ۵-۱۴: سرعت دورانی تایر. چرخ پس از اعمال ترمز کاملاً بر روی سطح جاده سر میخورد. ۷۵.....
- شکل ۵-۱۵: نمایش تغییرات سرعت خودرو به نسبت سرعت چرخ. ۷۶.....
- شکل ۵-۱۶: نمایش مقدار لغزش چرخ قبل و بعد از اعمال ترمز. ۷۶.....
- شکل ۵-۱۷: نمودار جابجایی خودرو قبل و بعد از اعمال ترمز تا رسیدن به سرعت ۷ متر بر ثانیه پس از طی ۱۵۰ متر. ۷۷.....

## چکیده:

در این پایان نامه به بررسی پدیده اصطکاک و مشکلات آن در صنعت پرداخته می‌شود. این مشکلات شامل تاثیر اصطکاک بر حالت گذرا و ماندگار سیستم می‌باشد که بوسیله مدل‌های استاتیک و دینامیک اصطکاک مدل شده‌اند.

مدل‌های استاتیکی اصطکاک ارائه شده در این پایان نامه شامل مدل‌های کلاسیک، مدل Karnopp و مدل آرمسترانگ است. مدل‌های دینامیکی اصطکاک نیز شامل مدل دال، مدل Bristle، مدل Bliman-Sorine و مدل لوگری هستند. از میان این مدل‌ها مدل لوگری به عنوان یک مدل دینامیک، خصوصیات زیادی از اصطکاک از جمله هیستریزیس، جابجایی پیش لغزشی و اثر استریک را در حین سادگی ارائه می‌دهد، بررسی می‌شود. سپس چند روش برای کنترل اصطکاک در سیستم‌های صنعتی را با استفاده از مدل اصطکاک ارائه می‌دهیم.

در نهایت به کنترل اصطکاک در خودرو می‌پردازیم. در خودرو هنگام ترمز گرفتن با افزایش مقدار اصطکاک بین تایر و جاده مواجه هستیم. برای رسیدن به این هدف ضریب لغزشی بین سرعت تایر و سرعت خودرو تعریف کرده و برای حداکثر کردن کاهش سرعت خودرو توام با کنترل پذیری آن یک کنترل تطبیقی طراحی می‌کنیم که مقدار لغزش خودرو را در مقدار معینی نگه دارد. سپس با روش لیاپانوف پایداری این کنترل کننده را تحلیل می‌کنیم.

نتایج شبیه سازی بر روی دو سیستم که یکی از کنترل کننده اصطکاک برای ترمز استفاده نکرده است و دیگری از کنترل کننده برای ترمز استفاده کرده است، ارائه شده است. سیستم طراحی شده در این پایان نامه که از کنترل کننده برای ترمز استفاده کرده است، نشان می‌دهند که کنترل کننده تطبیقی با اعمال نیروی مناسب بر ترمز توانسته است همراه با کنترل پذیری خودرو مقدار ترمز نیز حداکثر گردد و خودرو در کمترین مکان ممکن توقف نماید، که این مهم بوسیله تنظیم مقدار لغزش چرخ، حول لغزش مطلوب انجام شده است.

## فصل ۱. مقدمه

## فصل اول : مقدمه

### ۱-۱. نیاز و هدف

بررسی اصطکاک یک زمینه تحقیق قدیمی است که تاریخ آن به آزمایشات آمنتون<sup>۱</sup> در سال ۱۶۹۹ و کولمب در سال ۱۷۸۵ برمی گردد. اصطکاک در همه سیستم‌های مکانیکی از جمله انتقالی، هیدرولیکی، سیلندرها، شیرها، ترمزها، چرخ‌ها و سیستم‌های فنردار وجود دارد. اصطکاک در ارتباط فیزیکی بین دو صفحه وجود دارد. که برای کاهش آن از مواد چرب کننده مشابه گریس و روغن اغلب استفاده می‌شود اما با این وجود هرگز اصطکاک بین دو صفحه از بین نمی‌رود. اصطکاک به شدت از آلودگی میان دو جسم تأثیر می‌پذیرد. مدل سازی اصطکاک در طول سالیان به طور وسیعی در مهندسی مکانیک بررسی شده است و اخیراً نیز مجدداً بررسی‌های زیادی بر روی آن آغاز شده است.

اصطکاک برای مهندسين کنترل نیز بسیار مهم است، مثلاً در طراحی سیستم‌های راه‌انداز، مکانیزم‌های سروکنترل با دقت بالا، روبات‌ها، سیستم‌های هیدرولیک و نیوماتیک و ترمزهای ضد قفل ماشین‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد. اصطکاک پدیده‌ای غیرخطی است و ممکن است باعث خطای حالت ماندگار، سیکل‌های حدی و یا کاهش بازده در سیستم‌ها شود. بنابراین برای مهندسين کنترل درک پدیده اصطکاک و اینکه چگونه با آن برخورد کنند بسیار مهم می‌باشد. با توجه به توان محاسباتی که امروزه در اختیار است، امکان بررسی و محاسبات دقیق اصطکاک نیز فراهم است. تسلط بر اصطکاک شرط لازم بهبود کیفیت، اقتصادی بودن و ایمنی در یک سیستم می‌باشد.

اصطکاک می‌بایست در ابتدای کنترل در نظر گرفته شود و با استفاده از سخت افزارهای مناسب به اندازه کافی کاهش یابد. با این حال ممکن است بخاطر جلوگیری از افزایش هزینه‌های شناسایی برای استفاده از سخت افزارهای پیشرفته و گران محدودیت‌هایی بوجود آید.

Dither [1] یک راه ساده برای کاهش اصطکاک استاتیکی است که برای زمان‌های زیادی مورد استفاده قرار گرفته بود. Dither می‌تواند به صورت الکتریکی یا مکانیکی بوسیله یک لرزاننده، همانند آنچه که در سیستم‌های اتوپایلوت اولیه استفاده شده است، معرفی گردد. پیشرفت‌های اخیر کنترل کامپیوتری، امکان کاهش تأثیر اصطکاک را بوسیله تخمین و کنترل نشان داده شده است. اکنون علاقه زیادی به شناسایی اصطکاک در جامعه کنترل به دلیل وجود بخش‌های خاص و مقالات متنوع دیده می‌شود.

<sup>1</sup> -Amonton

برای مهندسين کنترل درک اصطکاک برای سیستم‌های حلقه بسته و طراحی قوانین کنترل که بتوانند اصطکاک را تحت کنترل خود در آورند، بسیار مهم است. الگوریتم‌های کنترل تناسبی-انتگرالی-مشتقی استاندارد در کاربردهای صنعتی سعی در کاهش تأثیر اصطکاک از حلقه‌های کنترل در قالب، پس‌خور و پیش‌خور دارند. همانند کنترل مشتقی-انتگرالی در [2]، کنترل انتگرالی در [3]، کنترل Dither در [4]. این روش‌ها ممکن است باعث ایجاد کنترل کننده با بهره بالا شوند که ممکن است قابلیت اجرا را برای تقویت نویز سنسورها و احتمال ایجاد سیکل‌های حدی کاهش دهد. روش‌های کنترل حرکت پیشرفته متفاوت برای جبران‌سازی اصطکاک در سیستم‌های سرو در نظر گرفته شده است که مشابه تنظیم فیدبک حالت [5] [6] و کنترل تطبیقی [4] [7] [8] است. بعلاوه از روش‌های محاسباتی همچون منطق فازی، الگوریتم ژنتیکی و شبکه عصبی نیز برای کاهش تأثیر اصطکاک بکار رفته است.

از میان این استراتژی‌های کنترل، روش جبران‌سازی اصطکاک تطبیقی بر مبنای مدل، یک راه حل مؤثر در جبران‌سازی اصطکاک با استفاده از مدل اصطکاکی دقیق [4] و [9] و [10] در کاربردهای صنعتی می‌باشد. مسئله کنترل در سرو موتورها و جاهائیکه بدنبال کاهش اصطکاک هستیم، ایجاد قوانین جبران‌سازی اصطکاک برای حذف تأثیر اصطکاک در سیستم با حفظ پایداری سیستم می‌باشد. برای طراحی یک جبران‌ساز تطبیقی بر مبنای مدل نیاز به یک مدل اصطکاک کامل با شناسایی دقیق پارامترها می‌باشد. در حالت کلی، اصطکاک بخاطر طبیعت تماس‌های بین دو سطح لغزان از جمله مشخصه مواد، سرعت مربوطه و شرایط مواد چرب کننده یک پدیده غیرخطی بوده و برای مدلسازی بسیار پیچیده می‌باشد.

اصطکاک میان دو صفحه شامل فرآیند استاتیک و دینامیک است. در طول سال‌ها تعدادی از مدل‌های اصطکاک سعی در تشریح بهتر و پیش‌بینی فرآیند اصطکاک کرده‌اند [1] [11] [12] [13] [14]. همچنین افراد زیادی سعی در کنترل سیستم‌ها با استفاده از این مدل‌ها کردند [15] [16] [17] [18]. مدل لوگری تعمیم یافته، توانایی مدلسازی رفتار اصطکاک دینامیک و استاتیک را دارد [5] و [19]. این مدل رفتار اصطکاک را که شامل اثر استریک، هیستریزس، مشخصه شبه فنری (stiction) و تغییر نیروی شکست می‌باشد، نشان می‌دهد. بعلاوه مدل لوگری در چندین مطالعات مدلسازی اصطکاک و جبران‌سازی آن استفاده شده است [8]، [7]، [19]. این مدل یک گزینه مناسب برای طراحی جبران‌ساز اصطکاک تطبیقی می‌باشد.

با این وجود مشکل استفاده از مدل لوگری برای طراحی کنترل تطبیقی این است که حالت اصطکاک داخلی  $z(t)$  بصورت فیزیکی قابل اندازه‌گیری نبوده و ضرایب اصطکاک معمولاً نامعلوم هستند که به ناچار برای تخمین مقدار حالت اصطکاک از روی‌تگر استفاده می‌کنیم.

از طرفی اصطکاک در خودرو در هنگام ترمز نقشی حیاتی ایفا می‌کند. افزایش اصطکاک بین تایر و جاده می‌تواند بسیار در افزایش کنترل خودرو و کاهش زمان توقف مؤثر باشد. برای مدلسازی اصطکاک در خودرو بدین دلیل که وزن خودرو بسیار زیاد می‌باشد، تغییراتی بر روی مدل لوگری انجام شده است تا بتواند وزن خودرو و تغییرات سطح جاده را برای محاسبه اصطکاک در نظر بگیرد که در این زمینه مطالعات زیادی انجام شده است و روی‌تگرها [20] [21] [22] و کنترل کننده‌هایی [23] [24] ارائه شده است.

## ۲-۱. مروری بر ساختار پایان نامه

این پایان نامه علاوه بر این فصل، شامل فصول زیر نیز هست:

- فصل دوم: این فصل به شناسایی پدیده اصطکاک و اثراتی که این پدیده بر روی یک فرآیند می-گذارد، می پردازد. در بخش ۲-۲ به بررسی پدیده اصطکاک و عوامل موثر بر آن و معرفی نیروی شکست می پردازیم و هیستریزس ناشی از اصطکاک را در سیستم‌ها معرفی می کنیم. سپس در بخش ۲-۳ به معرفی و چگونگی ایجاد سیکل‌های حدی بوسیله اصطکاک پرداخته می شود.
- فصل سوم: در این فصل با توجه به نیاز کاربردهای مختلف به مدل سازی اصطکاک و انتخاب یک مدل اصطکاک برای استفاده در شبیه سازی‌ها و کنترل سیستم‌ها به بررسی مدل‌های مختلف اصطکاک می پردازیم. مدل‌های اصطکاک در دو گروه مدل‌های استاتیک و دینامیک بررسی می شوند. در بخش ۲-۳ به بررسی مدل‌های استاتیک می پردازیم و از آن گروه به مدل‌های کلاسیک اصطکاک شامل مدل کولمب<sup>۱</sup>، ویسکوز<sup>۲</sup> و Stiction و مدل Karnopp و آرمسترانگ<sup>۳</sup> می پردازیم و مشاهده می کنیم که مدل‌های استاتیک ساده بوده ولی توانایی مدل سازی رفتارهای مختلف اصطکاک را ندارند بنابراین بناچار سراغ مدل‌های دینامیک اصطکاک می رویم. در بخش ۳-۳ از میان مدل‌های دینامیک به بررسی مدل دال، مدل Bristle، مدل Bliman-Sorine و مدل لوگری می پردازیم. در بخش ۳-۴ به مقایسه مدل لوگری و مدل Bliman-Sorine که هر دو تعمیم‌هایی از مدل دال هستند می پردازیم و در نهایت مدل دال را به عنوان مدلی مشابه رفتار واقعی اصطکاک در حین سادگی برای استفاده در شبیه سازی‌ها و کنترل انتخاب می کنیم.
- فصل چهارم: در این فصل با آگاهی از تاثیرات اصطکاک و با استفاده از مدل‌های اصطکاک به کنترل سیستم‌ها می پرداخته می شود. در بخش ۲-۴ به بررسی جبرانسازی اصطکاک با استفاده از مدل اصطکاک کولمب در یک سیستم سرو موتور پرداخته می شود و در شبیه سازی‌ها سه روش کنترلی متفاوت با یکدیگر مقایسه می شوند و مشاهده می کنیم که با داشتن یک مدل اصطکاک به یک سطح پایداری نمایی می توان رسید. در بخش ۳-۴ به بررسی دقیق تر سیکل‌های حدی می پردازیم و کنترلی برای از بین بردن این سیکل‌ها با استفاده از مدل اصطکاک لوگری ارائه می دهیم. در بخش ۴-۴ از فیدبک حالت برای کنترل اصطکاک با مدل سازی لوگری استفاده خواهیم کرد.
- فصل پنجم: در این فصل به دنبال کنترل یا به عبارتی افزایش اصطکاک در هنگام ترمز گرفتن در خودرو هستیم. به همین دلیل در ابتدا مقدمه‌ای بر سیستم ترمز در خودروها ارائه می دهیم سپس در بخش ۳-۵ به معرفی مدل سازی خودرو و تعریف ضریب لغزش تایر روی جاده می پردازیم و با توجه به

<sup>1</sup> -Columb

<sup>2</sup> -Viscous

<sup>3</sup> -Armstrong



منحنی اصطکاک- لغزش بیشترین مقدار اصطکاک بین تایر و جاده را در مقدار ۰/۲ ارزیابی و هدف کنترل را نگه داری مقدار لغزش خودرو بر ۰/۲ قرار می دهیم. در اینجا مدل اصطکاک بین تایر و جاده مدل لوگری انتخاب می کنیم و با استفاده از یک رویتگر مقدار اصطکاک را بدست می آوریم. در بخش ۵-۶ کنترل کننده ای برای حداکثر کردن مقدار اصطکاک در هنگام ترمز پیشنهاد می دهیم. با استفاده از قضیه لیاپانوف پایداری این کنترل کننده را اثبات می کنیم. نتایج شبیه سازی که در بخش ۵-۶-۴ ارائه شده حاکی از آن می باشد که کنترل کننده تطبیقی توانسته به خوبی مقدار لغزش چرخ را حول لغزش مطلوب تنظیم نماید.

● فصل ششم: این فصل به جمع بندی آنچه که در جریان این پایان نامه انجام شده است، می پردازد و پیشنهاداتی را جهت کارهای آتی و ادامه این تحقیق ارائه می کند.

## فصل ۲. شناسایی اصطکاک

## فصل دوم: شناسایی اصطکاک

### ۲-۱. مقدمه

از زمان‌هایی دور انسان‌ها بدن‌بال شناسایی اصطکاک بودند. اولین فرضیه درباره اصطکاک به کارهای لئوناردو داوینچی<sup>۱</sup> برمی‌گردد [19]. در این فصل عناصر مهم که در اصطکاک میان دو سطح ایجاد می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد و رفتار اصطکاک در آزمایشات عملی نشان داده می‌شود. در این فصل مفاهیمی درباره اصطکاک ارائه می‌شود که مقدمه‌ای برای مدل‌سازی و کنترل اصطکاک در فرآیندهای صنعتی می‌باشد.

### ۲-۲. پدیده اصطکاک

اصطکاک نیروی عکس‌العمل مماسی بین دو صفحه در حال تماس می‌باشد. در کاربردهای مهندسی تماس آهن با آهن، مشابه بلب‌رینگ که معمولاً با مواد چرب کننده همراه است، بسیار وجود دارد. البته بحث در اینجا شامل هر نوع تماسی می‌شود و فقط محدود به این نوع تماس نیست. در شکل ۱-۲ دو صفحه در حال تماس به صورت ساده‌ای به تصویر کشیده شده است [15]. صفحات در حال تماس در مقیاس میکروسکوپی یک زبر و پوشیده از یک لایه اکسید یا مواد مشابه هستند. اگر در محل تماس از مواد چرب کننده استفاده شود، بر روی صفحات همچنین روغن و یا گیریس نیز حضور خواهد داشت. تماس واقعی دو صفحه در بین تعدادی ذرات ریز که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، رخ می‌دهد و تماس در همه سطح به صورت پیوسته نخواهد بود. بدلیل وزن جسم تغییر شکل در نقاط تماس رخ می‌دهد. ممکن است در محل تماس ذرات، چسبندگی نیز رخ دهد. با اعمال نیروی مماسی مناسب، این نقاط تماس از بین می‌رود. به محض شروع حرکت، نقش مواد چرب کننده مطرح می‌شود. آرمسترانگ<sup>۲</sup> [25] مکانیزم حرکتی اصطکاک را به چهار ناحیه تقسیم کرد. این ناحیه‌ها بر مبنای سرعت نسبی سطوح در حال تماس می‌باشد. شکل ۲-۲ رابطه بین نیروی اصطکاک و سرعت را به چهار ناحیه روانی حرکت<sup>۳</sup> تقسیم می‌کند. ناحیه اول هنگامی است که حرکتی وجود ندارد. یک تصویر ذهنی مناسب در شکل ۲-۳ ارائه شده است. تماس‌ها به صورت تعدادی فنر می‌باشند. به محض اینکه نیرویی به جسم اعمال شود، فنرها کشیده می‌شوند که این نیرو برابر نیروی اصطکاک می‌باشد. اگر نیروی اعمالی به فنرها زیاد شود، فنرها

<sup>1</sup> - Leonardo da Vinci

<sup>2</sup> - Armstrong

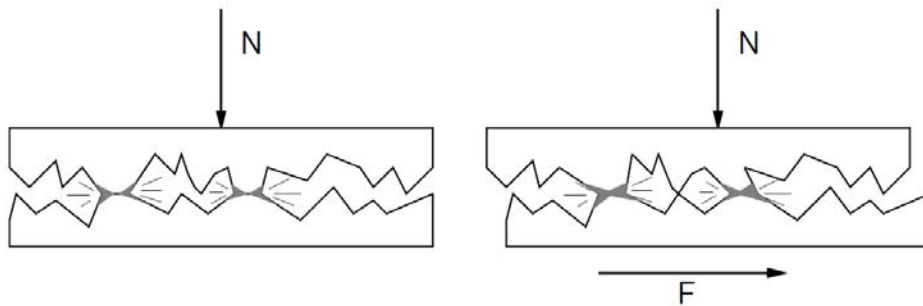
<sup>3</sup> - Lubrication Regimes

پاره شده و جسم شروع به لغزش می کند. بنابراین در هنگام ایستایی نیروی اصطکاک باعث تغییر شکل ذرات در حال تماس می شود.

در ناحیه دوم حرکت بین صفحات روان نیست و نیروی اصطکاک در این ناحیه صرف از بین بردن مقاومت بین ذرات در تماس می گردد.

به محض اینکه سرعت لغزش افزایش می یابد، حرکت روان شده و دو سطح از یکدیگر جدا می گردند. در این ناحیه نیروی اصطکاک صرف مواد چرب کننده بین سطوح و چسبندگی آنها و بخشی از ذرات دو سطح، می شود. در نهایت در ناحیه چهارم سطوح کاملاً بوسیله مواد چرب کننده جدا می شوند.

طبیعتاً دینامیک در تمامی نواحی سرعت وجود دارد. بنابراین رفتار کامل نیروی اصطکاک بسیار پیچیده است.



شکل ۲-۱: تماس میکروسکوپی بین دو صفحه.

## ۲-۲-۱. تاثیر اصطکاک بر سرعت ماندگار

نیروی اصطکاک به عنوان تابعی از سرعت برای حرکت های سرعت ثابت معمولاً مشابه شکل ۲-۲ می باشد. با بدست آوردن نتایج استریبک<sup>۱</sup> در [27][1] منحنی استریبک نامگذاری شد. حالت منحنی در بین ناحیه کم روان که ناحیه دوم است و ناحیه نسبتاً روان که ناحیه سوم است، اثر استریبک نامیده می شود. تابع عمومی نمی توان ارائه کرد که اصطکاک را بصورت تابعی از سرعت معرفی کند. در شکل ۲-۴ رابطه اصطکاک و سرعت بستگی به کاربرد و مسئله دارد و با مشخصه مواد، دما و ساییدگی تغییر می کند. در ضمن بسیاری از خصوصیات اصطکاک در آزمایشات سرعت ثابت آشکار نمی شود.

<sup>۱</sup> - Stribeck