

# بررسی تجربی اثر الگوی سطح و حجم روانکار بر عملکرد تریبولوژیکی سطوح در تماس نقطه‌ای

علی عباسیان بروجنی، صالح اکبرزاده

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مکانیک

(دریافت مقاله: ۹۸/۰۱/۲۶ - پذیرش مقاله: ۹۸/۰۹/۲۴)

## چکیده

کاهش ضریب اصطکاک از اهمیت زیادی در صنایع مختلف برخوردار است. در این پژوهش اثر افزودن الگوی سطح بر سطح نمونه در آزمون‌های اصطکاک و همچنین حجم روانکار بررسی شده است. آزمون‌های مختلفی به کمک دستگاه آزمون پین روی دیسک انجام شده است و عملکرد اصطکاکی سطوح بررسی شده است. از میان روش‌های مختلف الگودهی، الگوی سطح به روش مکانیکی روی سطح دیسک‌ها ایجاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای دیسک‌های با الگوی سطح نیز تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت رفتاری مشابه رفتار نمودار استرایبک دارد. به عبارت دیگر مرز بین رژیم‌های مختلف روانکاری مشخص می‌شود. همچنین ایجاد الگوی سطح می‌تواند باعث کاهش ضریب اصطکاک شود اما این کاهش در بارهای زیاد ملموس تر است. همچنین در حالتی که حجم روانکار تأمین کمی باشد، افزایش نیرو سبب افزایش سرعت جدایش می‌شود. مقایسه ضریب اصطکاک در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد که در سطوح با الگوی سطح بارهای کم، روغن کم عملکرد بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوی سطح، ضریب اصطکاک، تماس نقطه‌ای، حجم روانکار.

## An Experimental Study on the Effect of Lubricant Volume and Surface Texture on the Tribological Performance of Surfaces in Point Contact

Ali Abbasian Boroujeni, Saleh Akbarzadeh

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received 15 April 2019, accepted 15 December 2019)

### Abstract

Reduction of friction coefficient is always of great importance in various mechanical systems. In this research, the effect of surface texturing and the lubricant volume on the friction coefficient is investigated. The experiments are conducted using a pin on disk test rig and a mechanical setup is used to texturize the surface of the disks. The results show that Stribeck curve can be obtained in the textured case. It is also observed that surface texture reduces the friction coefficient but this reduction is more pronounced under heavy loads. In the case when very low amount of lubricant is provided, an increase in the applied load results in an increase in the lift-off speed.

**Keywords:** surface texture, friction coefficient, point contact, lubricant volume.

**E-mail of Corresponding author:** s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir.

## مقدمه

یک مزیت بزرگ از منظر کاهش تلفات اصطکاک محسوب می‌شود. چو و خوانساری [۸] و همچنین شارما و همکاران [۹] به بررسی اثر ایجاد الگوی سطح روی رینگ‌های فولادی و همچنین یاتاقان‌های ژورنال پرداختند. آنو و همکاران [۱۰] به بررسی اثر الگوی سطح بر عملکرد تریبولوژیکی نشت‌بندهای مکانیکی پرداختند.

اتسیون و برشتاین به کمک فناوری لیزر توانستند حفره‌هایی در ابعاد میکرومتر بر روی سطوح برخی قطعات مکانیکی مانند نشت‌بند ایجاد کنند [۱۱-۱۲]. کلیگرمن و همکاران [۱۳] با ایجاد الگوی سطح روی سطح خارجی پیستون، نشان دادند که می‌توان ضریب اصطکاک را تا حدود ۲۰٪ کاهش داد. کانتا و نیشیکاوا [۱۴] یک مطالعه پارامتری بر روی اثر هندسه و چگالی حفره‌ها روی میزان ضریب اصطکاک انجام دادند. مطالعات آنها نشان داد که تاثیر عمق و چگالی حفره‌ها روی ضریب اصطکاک بیشتر از تاثیر هندسه حفره است.

موریر و همکاران [۱۵] به بررسی اثر الگوی سطح در تماس کره روی دیسک با حضور روانکار پرداختند. نتایج تجربی آنها نشان داد که افزایش عمق حفره‌ها باعث کاهش ضخامت لایه روانکار بین دو سطح می‌شود و استفاده از حفره‌های با عمق کم از نظر رفتار سایشی مناسب‌تر است. اسکاراگی و همکاران [۱۶] به مقایسه تجربی دو حالت مختلف پرداختند. در یک حالت شیارهایی از ابعاد میکرومتر و در دیگری آرایشی از حفره‌های دایروی ایجاد شده بود. نتایج تجربی نشان داد که استفاده از حفره‌های دایروی حدود ۵٪ ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد اما استفاده از شیارها گاهی باعث افزایش ضریب اصطکاک تا حدود ۸۰٪ می‌شود. شینکارنگو و همکاران [۱۷] بصورت عددی مساله تماس یک سطح نرم و یک سطح حفره‌دار را تحلیل کردند. برای این کار معادله رینولدز و معادله تغییر شکل الاستیک الاستومر مورد استفاده بصورت همزمان حل شد. نتایج

سایش یکی از عوامل تخریب قطعات فلزی در صنایع مختلف می‌باشد و انتخاب جنس قطعات درگیر با یکدیگر و پوشش قطعات برای کاهش سایش، حائز اهمیت است. تعداد زیادی از قطعات صنعتی از قبیل چرخنده‌ها و یاتاقان‌ها و ... مستعد به سایش هستند. یکی از راه‌های کاهش سایش استفاده از روانکار صحیح است که باعث کاهش قابل توجه در نرخ سایش می‌شود. با این وجود یکی از اشتباهات متداول در افزایش سایش و متعاقباً شکست قطعه‌ها در صنعت، استفاده بیش از اندازه روانکار از مقدار معین آن می‌باشد. این امر سبب می‌شود روانکار با محیط اطراف خود وارد واکنش شود و این خود باعث ایجاد ذرات ریزی می‌شود که بین سطوح در حال حرکت است و سایش شیمیایی را ایجاد می‌کند. یکی دیگر از روش‌های موجود برای کاهش سایش ایجاد الگوی سطح یا بافت سطح است. این نوع بافت می‌تواند مانند مخازن کوچک روغن عمل کند و در شرایط خاص باعث بهبود شرایط روانکاری و کاهش سایش و اصطکاک گردد.

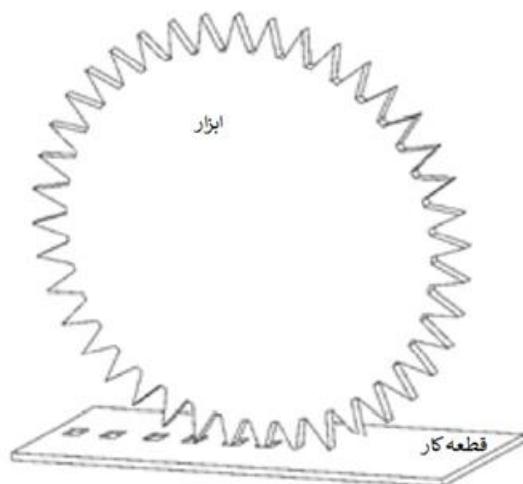
تاریخچه ایجاد الگوی سطح بر روی قطعات مکانیکی موضوعی است که در دهه‌های گذشته توسط محققین مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. ایجاد حفره روی سطوح برای بهبود خواص تریبولوژیکی قطعات مکانیکی مورد توجه محققین مختلفی بوده است [۱]. این حفره‌ها به روش‌های مختلفی مانند مکانیکی، لیتوگرافی و شیمیایی، و به کمک فناوری لیزر ایجاد می‌شوند [۲-۵]. در تماس قطعات مکانیکی در حضور روانکار، این حفره‌ها می‌توانند به عنوان یک مخزن کوچک روانکار عمل کنند [۶].

کوالچنکوا و همکاران [۷] نشان دادند که با ایجاد الگوی سطح مناسب می‌توان رژیم روانکاری را از رژیم مخلوط به رژیم روانکاری فیلم کامل منتقل کرد. این تغییر رژیم

است. در این تحقیق آزمون‌های تجربی به کمک دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک انجام شده است. در انجام آزمایش‌ها با تریبومتر پین روی دیسک، از پینی از جنس فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ با سختی ۸۰۰ ویکرز استفاده شد. برای دیسک از فولاد ST37 استفاده شده که دارای سختی برابر با ۱۷۵ ویکرز است. به علت تفاوت سختی پین و دیسک، سایش روی دیسک اتفاق می‌افتد. همچنین روغن مورد استفاده روغن 20W50 است.

#### طرز ایجاد الگوی سطح

برای ایجاد بافت سطح یا الگوی سطح از روش مکانیکی استفاده شد به گونه ای که در آن قطعه دندانه دار دایره ای (شکل ۱) با حرکت چرخشی و نیروی عمودی وارد بر آن باعث ایجاد حفره ها با سطح مقطع مربعی شکل روی سطح دیسک شد. ویژگی های حفره های ایجاد شده بر روی قطعه در جدول ۱ بیان شده است. حفره‌های ایجادشده دارای مقطع مربعی هستند که ۶٪ از کل سطح دیسک را پوشش می دهند. عمق این حفره‌ها بین  $25\mu\text{m}$  تا  $35\mu\text{m}$  است.



شکل ۱. ابزار ایجاد الگوی سطح به روش مکانیکی.

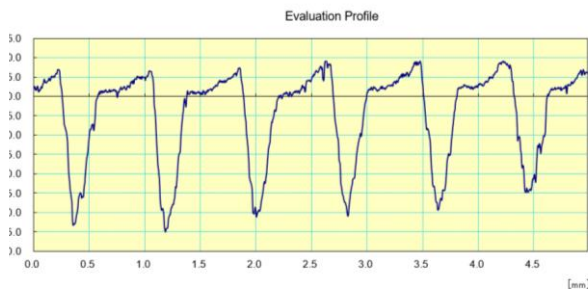
تحلیلی آنها نشان داد بسته به شرایط کاری استفاده از حفره‌ها تا ۲۰٪ کاهش در ضریب اصطکاک را باعث می‌شود. ونگ و همکاران [۱۸] بصورت عددی و تجربی تماس دیسک برنجی و پین فولادی که در آن دیسک دارای حفره است و دارای سرعت لغزشی پایین است را بررسی کردند.

ولادکو و همکاران [۱۹] به بررسی اثر هندسه حفره در تماس رفت و برگشتی پرداختند. مطالعات آنها نشان داد که حفره‌های غیردایروی که در جهت عمود بر حرکت باشند در مقایسه با حفره‌هایی که همراستا با حرکت باشند اثر بهتری در بهبود عملکرد اصطکاکی دارند. گالدا و همکاران [۲۰] به بررسی اثر هندسه حفره در حالتی که رژیم روانکاری مرزی باشد پرداختند و نشان دادند که در این حالت حفره‌های کم‌عمق اثر بهتری نسبت به حفره‌های عمیق دارد. طایی و همکاران [۲۱] به بررسی تحلیلی و تجربی سایش در سطوح با حفره در حضور روانکار پرداختند.

در تمام تحقیقاتی که تاکنون انجام شده است، فقط به بررسی اثر الگوی سطح و هندسه‌های مختلف آن پرداخته شده است. در این مقاله بصورت تجربی اثر الگوی سطح و میزان روغن بصورت ترکیبی بررسی شده است. همچنین در این مقاله به بررسی سرعت جدایش سطوح در حالت با ایجاد الگوی سطح و برای بارهای مختلف پرداخته شده است.

#### روش تحقیق

پارامترهای زیادی در فرایند سایش دخیل هستند که از مهمترین آنها می‌توان به زمان، سرعت، دما، نیرو، کیفیت سطح، جنس روانکار، جنس ماده، شرایط سطحی و ... اشاره کرد. در این تحقیق به بررسی اثر ایجاد الگوی سطح بر عملکرد تریبولوژیکی سطوح در حال تماس و همچنین بررسی تاثیر حجم روانکار بر این رفتار پرداخته شده



شکل ۳. نتیجه حاصل از زبری سنجی قطعه پس از ایجاد الگوی سطح

شکل ۳. نتیجه حاصل از زبری سنجی قطعه پس از ایجاد الگوی سطح.

### نتایج

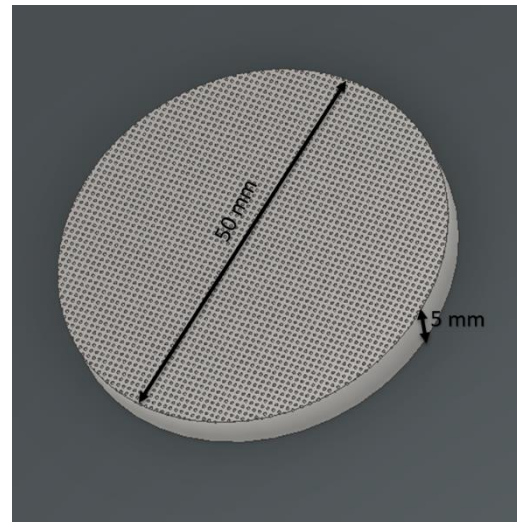
آزمون‌های پین روی دیسک برای اندازه گیری میانگین ضریب اصطکاک انجام شدند. روال انجام آزمون‌ها به این صورت است که آزمون‌ها در دو حالت روغن بسیار کم (یک فیلم نازک روغن روی قطعه) و غوطه‌ور در روغن و در بارگذاری‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ نیوتن در سرعت‌های ۵ تا ۱۲۰ RPM انجام می‌شدند. تحت هر کدام از شرایط کاری، آزمون سایش برای ۱۲۰ ثانیه انجام می‌شد و میانگین داده‌های ذخیره شده برای به دست آوردن ضریب اصطکاک میانگین محاسبه می‌شدند. همچنین هر یک از آزمون‌ها سه مرتبه تکرار شدند و نتایج گزارش شده حاصل میان‌گیری نتایج آزمون‌ها است.

اثر بار و سرعت

به کمک این داده‌ها تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت در شکل ۴ رسم شد. مشاهده می‌شود که برای تماس سطوحی که دارای بافت سطح هستند، تغییرات ضریب اصطکاک مشابه نمودار استراییک برای سطوح بدون دیمپل است. به عبارتی با افزایش سرعت، ضخامت لایه روانکاری که بین دو سطح تشکیل می‌شود افزایش می‌یابد. افزایش لایه روانکار باعث می‌شود از تماس زبری‌های دو سطح جلوگیری شود و در نتیجه ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که شرایط کاری آزمون‌ها در رژیم روانکاری

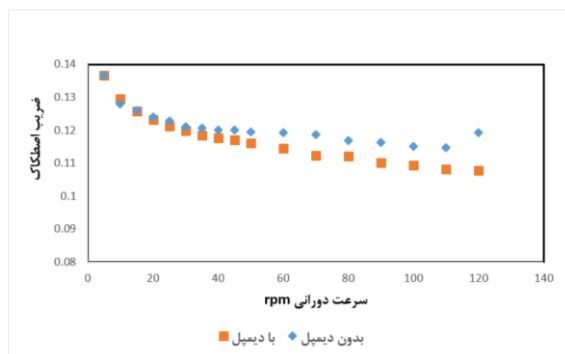
جدول ۱. ویژگی‌های دیمپل‌های ایجاد شده روی قطعه.

چگالی حفره ها (%)	عمق (μm)	سطح (μm <sup>2</sup> )	اندازه (μm)	مقطع
۶	۲۵-۳۵	۳۱.۴۱۵	۱۷۷	مربع

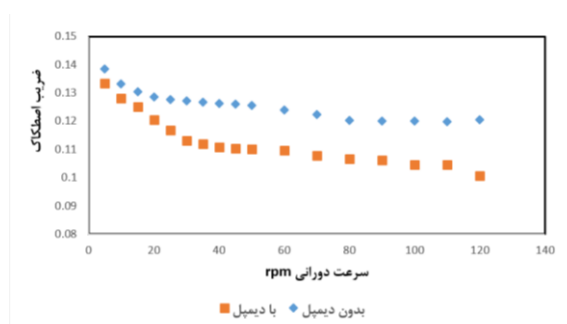


شکل ۲. شماتیک قطعه پس از ایجاد الگوی سطح بر روی آن.

مراحل تهیهی نمونه‌ها به این صورت است که نمونه‌ها بعد از عملیات تراشکاری، توسط دستگاه سنگ مغناطیسی به صورت یکسان سنگ زده می‌شود. پس از سنگ زدن قطعه‌ها الگوی سطح روی قطعه‌ها ایجاد می‌گردد. حفره‌های ایجاد شده را اصطلاحاً دیمپل می‌نامند. پس از آن برای تعیین میزان کیفیت سطح نمونه‌ها از دستگاه زبری‌سنج استفاده می‌شود. در نهایت قطعه به صورت دیسکی با قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۵ میلی‌متر دارای الگوی سطح به دست آمد (شکل ۲) که در انجام آزمون‌ها از آن استفاده شد. شکل ۳ پروفیل زبری سطح دیسک را نشان می‌دهد. پروفیل زبری نشان می‌دهد که به کمک این روش امکان ایجاد حفره با عمق مورد نظر وجود داشته است. با سنگ‌زنی سطح دیسک پس از ایجاد حفره، تاحدودی سطح همواری حاصل شده است.



شکل ۶. تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت برای بار 20N.



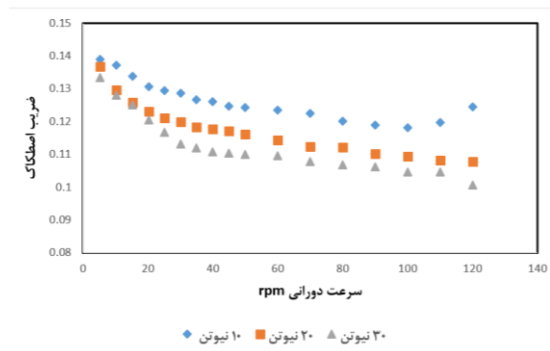
شکل ۷. تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت برای بار 30N

شکل ۷. تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت برای بار 30N

#### تغییر رژیم روانکاری

یکی دیگر از پارامترهای مهم سرعت جدایش است. این سرعت نشان دهنده تغییر رفتار از روانکاری مخلوط به روانکاری هیدرودینامیکی است. در این سرعت، ضریب اصطکاک به کمترین مقدار خود می‌رسد و در این سرعت است که عملاً تماس زبری‌ها دیگر نقشی در تحمل بار ندارد و تمام بار توسط لایه روانکار تحمل می‌شود. شکل ۸ نشان می‌دهد برای سطوح با الگوی سطح با افزایش بار سرعت جدایش افزایش می‌یابد. چنین رفتاری برای سطوح بدون دیپیل مشاهده نمی‌شود. می‌توان گفت سرعت جدایش سطوح تحت بار 10 N برابر 110 rpm است و این سرعت در بار 20 N به عدد 120 rpm می‌رسد. برای بار 30 N سرعت جدایش در خارج از بازه سرعت کاری دستگاه رخ می‌دهد اما رفتار نمودار نشان می‌دهد که در سرعتی فراتر از 120 rpm جدایش سطوح رخ می‌دهد.

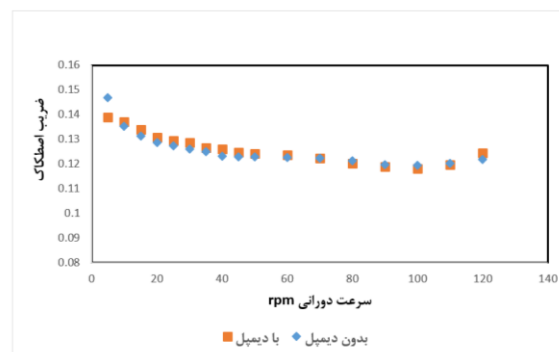
مخلوط است و لایه روانکار و زبری‌ها هر دو در تحمل بار اعمال شده مشارکت دارند. از سوی دیگر نشان داده شده است که افزایش نیرو باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود که موید این مطلب است که این بارگذاری مربوط به رژیم روانکاری مخلوط است.



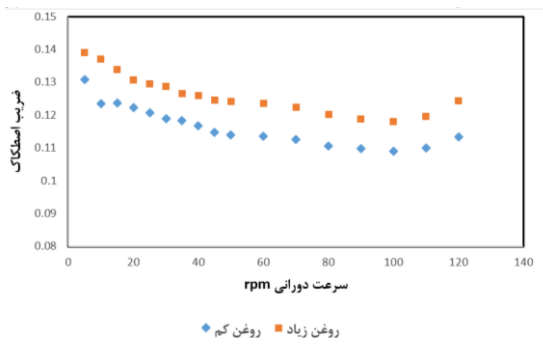
شکل ۴. تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت دورانی برای دیسک با الگوی سطح

#### اثر الگوی سطح

شکل های ۵ تا ۷ نشان‌دهنده مقایسه بین ضریب اصطکاک در سطوح با الگوی سطح و بدون آن هستند. مشاهده می‌شود افزودن الگوی سطح باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود اما این کاهش در نیروهای زیاد (۳۰ نیوتون) واضح‌تر است. به عبارتی در بارهای کم (۱۰ نیوتون) ایجاد الگوی سطح تاثیر چندانی ندارد. در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که افزودن دیپیل به سطوح باعث افزایش سرعت جدایش می‌شود.

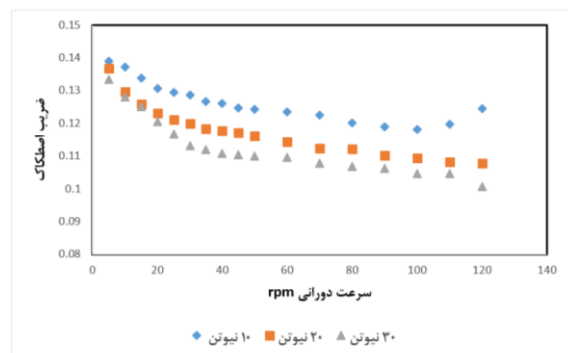


شکل ۵. تغییرات ضریب اصطکاک با سرعت برای بار 10 N



شکل ۹. بررسی اثر حجم روانکار بر ضریب اصطکاک سطح با الگوی سطح در بار 10 N

شکل ۹. بررسی اثر حجم روانکار بر ضریب اصطکاک سطوح با الگوی سطح در بار 10 N.

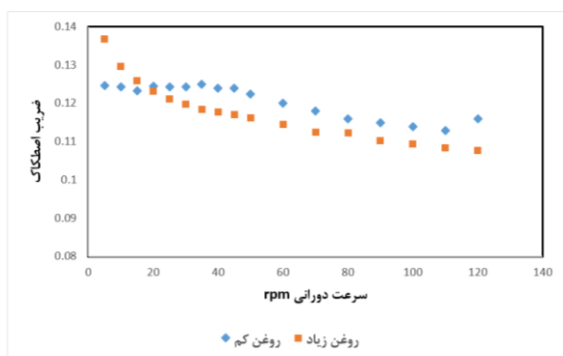


شکل ۱۰. مقایسه سرعت جدایش با تغییرات نیروی اعمالی

شکل ۱۰. مقایسه سرعت جدایش با تغییرات نیروی اعمالی.

### اثر حجم روانکار

یکی دیگر از پارامترهای مهم اثر حجم روانکار تامین شده بر ضریب اصطکاک است. شکل ۹ و ۱۰ به بررسی این اثر پرداخته است. در شکل ۹ که بار اعمالی کم است مشاهده می‌شود که اگر حجم روانکار تامین شده کم باشد، ضریب اصطکاک مقدار کمتری نسبت به حالت با روانکار زیاد دارد. همچنین برای دیسک‌های با الگوی سطح در بارهای کم، با حجم روغن کم عملکرد بهتری مشاهده می‌شود و در بارهای زیاد عملکرد اصطکاکی آنها نامطلوب خواهد بود. علت این پدیده این است که ضریب اصطکاک از دو اثر مختلف تشکیل شده است که عبارتند از برش لایه روانکار و همچنین تماس زبری‌ها. در بارهای کم، ضریب اصطکاک مقدار زیادی دارد که بیشتر بخاطر برش لایه روانکار است. به همین علت اگر حجم روانکار تامین شده کم باشد، لایه کوچکتری از فیلم سیال تشکیل می‌شود و در نتیجه ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. با افزایش نیرو، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و اثر تماس زبری‌ها مهم‌تر می‌شود. به همین علت، افزایش حجم روغن باعث محافظت بهتر از سطوح فلزی شده و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. این اتفاق در سرعت‌های بالا که ضخامت لایه روانکار بیشتر است واضح‌تر می‌باشد.



شکل ۱۱. بررسی اثر حجم روغن بر ضریب اصطکاک در سطح با الگو تحت نیروی 20 N

شکل ۱۱. بررسی اثر حجم روغن بر ضریب اصطکاک در سطح با الگو تحت نیروی 20 N.

### جمع‌بندی

در این پژوهش تجربی به بررسی حجم روغن و همچنین اثر ایجاد الگوی سطح بر عملکرد تریبولوژیکی پرداخته شده است. آزمون‌های مختلفی به کمک دستگاه آزمون پین روی دیسک انجام شده است و عملکرد اصطکاکی سطوح بررسی شده است. الگوی سطح به روش مکانیکی روی سطح دیسک‌ها ایجاد شده است. مشاهده شد که با ایجاد الگوی سطح روی دیسک‌ها همچنان می‌توان نمودار استرایک را مشاهده نمود. همچنین مشاهده شد که ایجاد الگوی سطح می‌تواند باعث کاهش ضریب اصطکاک شود

Structure, Tribology Transactions, 39(1996) 677-683.

12. I. Etsion, *Improving tribological performance of mechanical seals by laser surface texturing*, (2000).

13. Y. Kligerman, I. Etsion, and A. Shinkarenko, *Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing*, ASME, 127(2005) 632-638.

14. M. Kaneta and H. Nishikawa, *Local Reduction in Thickness of Point Contact EHL Films Caused by a Transversely Oriented Moving Groove and Its Recovery*, ASME Tribology, 116(1994) 635-639.

15. Mourier.L, Mazuyer.D, L. .A.A, and Donnet.C, *Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts*, Tribology International, 39(2006) 1745-1756.

16. M. Scaraggi , F. Mezzapesa, G. Carbone, and A. Ancona, *Friction Properties of Lubricated Laser-MicroTextured-Surfaces: An Experimental Study from Boundary- to Hydrodynamic-Lubrication*, Tribology Letters, 49(2013) 117-125.

17. A. Shinkarenko, Y. Kligerman, and I. Etsion, *The effect of surface texturing in soft elasto-hydrodynamic lubrication*, Tribology International, 36(2009) 95-103.

18. Wang, X., Liu, W., Zhou, F., Zho, D.: *Preliminary investigation on the effect dimple size on friction in line contact*, Tribol. Int.42, (2009)1118–1123.

19. Veladescu, S.C., Olver, A.V., Pegg, I.G., Reddyhoffa, T.: *The effects of surface texture in reciprocating contacts—an experimental study*, Tribol. Int. 82, (2014) 28–42.

20. Galda, L., Sep, J., Prucnal, S.: *The effect of dimples geometry in the sliding surface on the tribological properties under starved lubrication conditions*, Tribol. Int. 99, 77–84 (2016).

21. Tae, M., Torabi, A., Akbarzadeh, S. , Khonsari, M. M., Badrossamay, M., *On the performance of EHL contacts with textured surfaces*, Tribology Letters, 65(2017) 85.

اما این کاهش در بارهای زیاد ملموس تر است. همچنین در حالتی که حجم روانکار تامینی کم باشد، افزایش نیرو سبب افزایش سرعت جدایش می شود. مقایسه ضریب اصطکاک در حالت های مختلف نشان می دهد که در سطوح با الگوی سطح بارهای کم، روغن کم عملکرد بهتری دارد.

## مراجع

1. I. Etsion, State of the art in laser surface texturing, Trans. ASME, 127(2005)248-253.
2. Y. Tejima, A. Ishiyama, and A. Ura, *The effects of the rounded pore shapes on tribological characteristics under hydrodynamic lubrication*, Proceedings of the international tribology conference (2000) 1919-1924.
3. A. Alberdi, S. Merino, J. Barriga, and A. Arazabe, *Microstructured Surfaces for Tribological Applications*, International Colloquium Tribology, (2004) 269-278.
4. D. B. Hamilton, J. A. Walowit, and C. M. Allen, *A Theory of Lubrication by Micro irregularities*, ASME Journal of Basic Engineering, 88(1966) 177-182.
5. I. Etsion and G. Halperin, *A laser surface textured hydrostatic mechanical seal*, Tribology Transactions, 45(2002) 430-434.
6. I. Etsion, *Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication*, 1(2013) 195-209.
7. A. Kovalchenkoa, A. Ajayia, A. Erdemira, G. Fenske, and I. Etsion, *The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact*, Tribology International, 38(2005) 219-225.
8. Y. Qiu and M. Khonsari, *Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings*, Tribology International, 44(2010) 635-644.
9. K. Sharma, S. Kango, and Singh-R, *Numerical investigation on the influence of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing*, Meccanica 47, (2011) 469-482.
10. J. N. Anno, J. A. Walowit, and C. M. Allen, *Microasperity Lubrication*, ASME Jour. of Basic Eng, 91(1968) 351-355.
11. I. Etsion and L. Burstein, *A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface*