



مدل سازی گذرای عددی و بررسی تجربی اثر بافت سطح بر روان کاری الاستوهیدرودینامیک

امیر ترابی^{۱*}، صالح اکبرزاده^۲، بهنام اعظمی^۲، محسن اصفهانیان^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۳

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۰۵

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۰۸

کلمات کلیدی:

روان کاری

بافت سطح

اصطکاک

الاستوهیدرودینامیک

لیزر

خلاصه: پدیده سایش و اصطکاک و راه کارهای کاهش آنها بسیار مورد توجه بوده است. یکی از این روش ها الگودهی سطح و ایجاد ریزحفره روی آن است که با استفاده از لیزر با سرعت و دقت بالا قابل انجام است. در این پژوهش ابتدا مدل عددی به صورت گذرا برای بررسی رفتار اصطکاک و شکل گیری لایه روان کار با وجود حفره روی سطح توسعه داده شده است. نتایج بررسی عددی نشان داد که فرض دو گام زمانی که در مطالعات رایج است خطای بزرگی در تخمین ضریب اصطکاک ایجاد می کند و برای عبور از روی حفره تعداد ۱۱ گام زمانی پیشنهاد می شود. سپس اثر ایجاد بافت لیزری بر روی دیسکی از جنس فولاد ST۳۷ در شرایط تماس خطی در رژیم روان کاری مخلوط به صورت تجربی بررسی شده است. در این پژوهش دو پارامتر ورودی سرعت خطی و بار اعمالی متغیر بودند. با تغییر این پارامترها ضریب اصطکاک به طور متوسط پس از طی مسافت های ۱۰۰ متری اندازه گیری شده است. با بررسی های صورت گرفته مشخص گردید که با افزایش سرعت و کاهش نیروی اعمالی میزان اصطکاک کاهش پیدا می کند. همچنین با مقایسه نتایج بین دیسک های الگودهی شده و صیقلی مشخص شد که میزان ضریب اصطکاک بین ۱۲ تا ۲۳ درصد در بررسی تجربی کاهش یافته است در حالی که در تخمین عددی امکان داشتن کاهش بین ۲۵ تا ۴۰ درصد نیز پیش بینی می شود. در سرعت های بالا تخمین های مدل عددی و نتایج بدست آمده از آزمایش بسیار بهم نزدیک شده اند.

۱- مقدمه

حین سایش بین سطوح به حساب می آیند. ذرات سایشی حاصل از تماس دو سطح، در درون این حفره ها قرار گرفته و مانع سایش بیشتر سطوح توسط این ذرات می شوند. از طرفی ریزحفره ها به عنوان یک مخزن کوچک روان کننده هستند. هرچند که حجم روان کار زیادی در این حفره ها نمی تواند قرار گیرد، با این وجود همین مقدار کم تاثیر بسزایی در کاهش اصطکاک بین سطوح در تماس با یکدیگر دارد (بیشتر در حالت رژیم روان کاری مرزی دیده می شود). با وجود این حفره ها انتقال رژیم روان کاری از مخلوط به کامل در سرعت های کمتری نسبت به سطح صاف رخ می دهد. بدین معنی که در یک زمان مشخص فیلم سیال در بین سطوح دارای الگو سریعتر از سطوح بدون الگو، تشکیل می شود و باعث کاهش سایش و اصطکاک می گردد.

الگوی های مختلفی را می توان روی سطوح ایجاد کرد. اما حالت نیم کروی بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد، از طرفی عملکرد بهتری نسبت به هندسه های دیگر دارد و همچنین ایجاد حفره کروی به وسیله لیزر نسبت به هندسه های دیگر راحت تر است [۱]. برای اولین بار

در تماس ناهمبندی سطوح، تغییر شکل های الاستیک سطوح از مرتبه ضخامت لایه روان کار است و در نتیجه باید در تحلیل روان کاری لحاظ گردند. در روان کاری الاستوهیدرودینامیک مشخصه هایی چون سختی جسم، میزان همدیسی، و همچنین میزان افزایش لزجت روان کار با فشار از اهمیت زیادی برخوردارند. با پیشرفت علم و تکنولوژی، اخیراً از الگوهای مختلف روی سطوح برای بهبود عملکرد تریبولوژیکی آنها استفاده می شود. این الگوها معمولاً شامل حفره هایی با شکل های هندسی مختلف هستند. سایز و هندسه حفره ها با توجه به مشخصات سطوح تماس (گرانروی، هندسه منافذ، سرعت تماس، فشار بار و غیره) مشخص می شود. فرورفتگی سطح می تواند رفتار تریبولوژیکی را با محتوای روغن درون حفره و کمک به تحمل بار با ایجاد فشار هیدرواستاتیک در حفره بهبود بخشد. این حفره های کوچک روان کننده می توانند عمر مفید قطعات را بیشتر کنند. همچنین ریزحفره ها به عنوان یک مکان برای جمع آوری ذرات ساییده شده در

* نویسنده عهده دار مکاتبات: torabi@sku.ac.ir



وابستگی شدید قطر حفره و کاهش اصطکاک نیز دیده شد. در صورت بهینه‌سازی بافت بیش از ۸۰٪ کاهش اصطکاک می‌توان داشت. قطر مطلوب بستگی به دمای روغن و ویسکوزیته روغن دارد [۷]. چادواری و همکاران اثر بافت سطح را در بارهای بسیار بالا و حرکت رفت و برگشتی بررسی کردند [۸]. آنها روغن‌های رقیق و لزج را بررسی کردند و اثر بهبود ریزحفره‌ها را بر مشخصات تریبولوژیکی مانند اصطکاک و سایش نشان دادند.

در مدل‌سازی جریان روان‌کار با وجود حفره نیز کارهای فراوانی انجام شده است. کارامیا و همکاران [۹] مدل دوبعدی و هان و همکاران [۱۰] مدل سه‌بعدی روان‌کاری هیدرودینامیکی با وجود بافت حفره‌ای را با حل معادلات حاکم بدست آوردند. طراحی و بهینه‌سازی بافت حفره‌ای در سال‌های اخیر همچنان توجه زیادی را به خود جلب کرده است و تحقیقات متعددی روی آن انجام می‌شود. از این موارد می‌توان به کارهای گروپر و همکاران [۱۱ و ۱۲]، مقاله رحمانی و راهنجات [۱۳]، منگ و همکاران [۱۴]، روم و مولر [۱۵] و طایی و همکاران [۱۶] اشاره کرد. یان و همکاران به مدل‌سازی روان‌کاری سطح دارای ریزحفره با در نظر گرفتن اثرات گرمایی و اثرات زبری سطح پرداختند [۱۷]. آنها مدلی برای عمر خستگی و ارتباط آن با شرایط تماس ارائه کردند.

در این مقاله به تکمیل مدل‌سازی جریان با در نظر گرفتن شرایط گذرای عبور دو سطح از روی یکدیگر پرداخته شده است. با این کار خطایی که در مدل‌سازی‌های قبلی بوده اصلاح شده و تخمین بهتری از شرایط روان‌کاری بدست آمده است. سپس به صورت تجربی به بررسی یافته‌های مدل‌سازی اقدام شده تا نتایج و روند تغییرات ضریب اصطکاک با شرایط واقعی ارزیابی شوند.

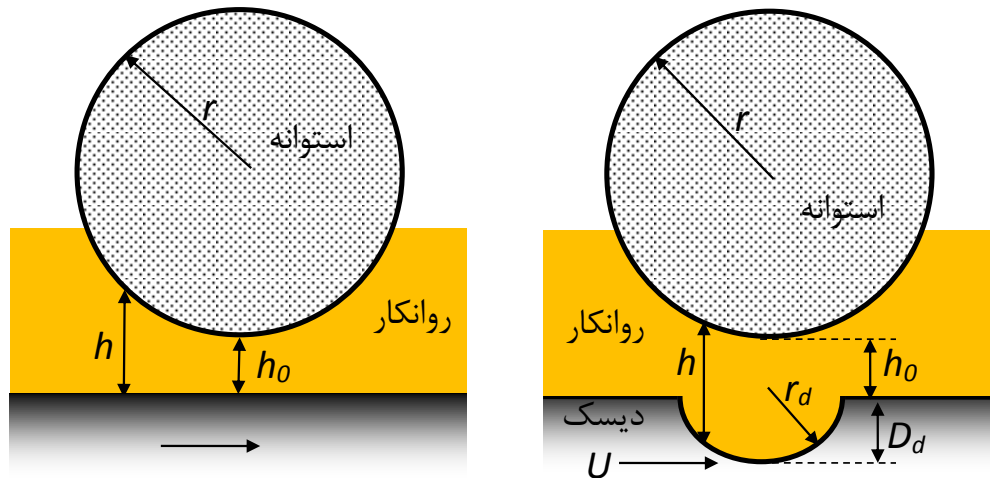
۲- مدل‌سازی عددی

تماس دو سطح با یکدیگر به گونه‌ای که مرکز سطح هر کدام در سمت مجزایی از خط مماس بر ناحیه تماس باشد، تماس ناهم‌دیس نامیده می‌شود. در این نوع تماس سطح واقعی تماس بسیار کوچک است و تحت بارهای متوسط هم فشارهای بزرگی در این ناحیه ایجاد می‌شود. اگر تماس به صورتی باشد که در یک راستا شرایط تماس سطح منحنی تغییر نکند، نظیر تماس دو استوانه با هم در امتداد محور استوانه، ناحیه تماس به صورت یک مستطیل کشیده است.

استفاده از الگودهی زبری سطح، به منظور بهبود خواص تریبولوژیکی، در سال ۱۹۶۰ مورد بحث قرار گرفت. همیلتون و همکاران و آنو و همکاران به بررسی ساختار زبری سطح در آب‌بندهای مکانیکی^۱ پرداختند و مشخص شد که ریززبری‌ها در نیروی بین سطوح آب‌بندها و کاهش سایش بسیار مفید هستند [۲]. استفاده از فرایند ایجاد بافت با پژوهش اتسیون و برشتاین آغاز شد [۳]. آنها یک مدل تئوری برای ساختار ریزحفره‌های آب‌بندهای مکانیکی ارائه کردند و مشخص شد که در عملکرد آب‌بندها بهبود قابل توجهی صورت می‌گیرد، به‌خصوص در زمانی که ریزحفره‌های نیم‌کروی به صورت منظم روی سطح آب‌بند توزیع شده باشند.

کیو و خوانساری به بررسی عملکرد تریبولوژیکی بافت سطح لیزر رینگ‌های فولادی ضدزنگ پرداختند [۴]. حفره‌های به صورت شکل دایره و بیضی شکل روی سطح فولاد ایجاد شدند که حالت بیضی در دو جهت شعاعی و محیطی بود. مشاهده شد که سرعت نقش تعیین‌کننده‌ای در فشار روی حفره‌ها بازی می‌کند. برای چگالی سطح مشخص، عملکرد حفره وابسته به نسبت عمق به قطر است. اگر چگالی حفره‌ها ثابت باشد، نسبت بهینه‌ای وجود دارد. در نهایت نتایج حاکی از آن بود که حفره‌های بیضی در جهت محیطی عملکرد بهتری نسبت به دو حالت دیگر دارند. کانگو و همکاران به بررسی عددی اثر بافت سطح بر عملکرد یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی پرداختند [۵]. در این بررسی اثر ریزحفره روی یاتاقان ژورنال در نظر گرفته شد. معادلات رینولدز در حالت دوبعدی در مختصات استوانه‌ای با روش اختلاف محدود برای تجزیه و تحلیل اثر بافت روی مشخصات یاتاقان حل عددی شدند. مشخص شد که با وجود حفره‌های کوچک در موقعیت‌های مختلف از سطح یاتاقان، عملکرد یاتاقان بهبود می‌یابد. وان و همکاران خواص تریبولوژیکی پلی‌تترافلورواتیلن^۲ با وجود بافت سطح را بررسی کردند [۶]. نتایج نشان داد که ضریب اصطکاک فولاد ضد زنگ از ۰/۰۸ به ۰/۰۵ با وجود بافت سطح کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که در چگالی حفره‌ها بین ۷/۹٪ تا ۸/۸٪ کمترین میزان ضریب اصطکاک وجود دارد. براون و همکاران به بررسی اثر تریبولوژیکال پلی‌آلفالین^۳ پرداختند. مشخص شد که کاهش اصطکاک تنها به نسبت عمق به قطر حفره‌ها وابسته نیست،

1. Mechanical seal
2. Poly tetra fluoro ethylene
3. Polyalphaolefin(PAO)



شکل ۱. هندسه حل، تماس خطی روی سطح بدون حفره (سمت چپ) و روی سطح با ریز حفره (سمت راست)

Fig. 1. Geometry of the problem, line contact condition for plain surface (Left) and textured surface (Right)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \bar{U} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

شرایط مرزی حاکم بر این مسئله فشار صفر در فاصله دور در سمت راست و چپ ناحیه تماس است. این معادله برای حالت‌های خاص تغییر جزئی خواهد داشت. این حالت‌های خاص مغشوش شدن جریان و در نظر گرفتن زبری سطح و یا روانکاری مخلوط است. همانطور که از معادله (۱) دیده می‌شود، توزیع فشار تابعی از ضخامت لایه روان کار و خواص روان کار و سرعت است.

در طی حرکت دو سطح روی یکدیگر دما و فشار لایه روانکار به طور محسوس تغییر می‌کند. تغییر فشار برای سطوح ناهمدیس مانند پیرو و بادامک به گونه‌ای است که احتمال تغییر فاز روانکار را پیش می‌آورد. در بیشتر مراجع روابط مربوط به خواص روان کار تغییرات ویسکوزیته و چگالی را برحسب فشار بیان می‌کنند [۱۹]. روابط زیر برای رفتار روانکار ارایه شده است:

$$\mu = \mu_0 \exp \left\{ A_1 [-1 + (1 + A_2 p)^{Z_0}] \right\} \quad (2)$$

که در آن $Z_0, A_2 = 5.1 \times 10^{-9}, A_1 = \ln(\mu_0) + 9.67$ ثابت برابر ۰/۶۸ است. رابطه چگالی نیز به صورت زیر بیان شده است:

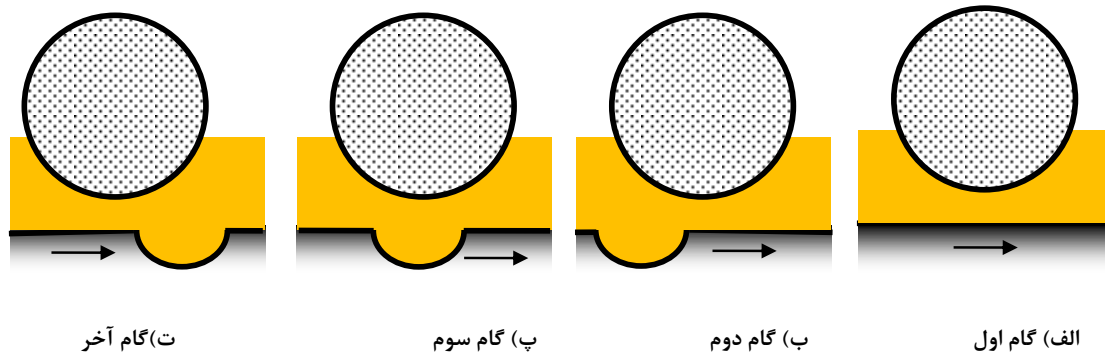
$$\rho = \rho_0 \left[1 + \frac{C_1 p}{1 + C_2 p} \right] \quad (3)$$

که در آن $C_2 = 1.7 \times 10^{-9} Pa^{-1}$ و $C_1 = 0.6 \times 10^{-9} Pa^{-1}$ است.

به همین خاطر این تماس را خطی یا مستطیلی می‌گویند. با تقریب خوبی می‌توان از لبه‌های استوانه در قیاس با ناحیه طویل تماس صرف نظر کرد. از طرفی به خاطر نازکی ضخامت لایه روان کار تغییرات فشار در عرض لایه ناچیز است و بنابراین ناحیه تماس و سیال بین دو سطح را می‌توان به صورت یک بعدی در راستای حرکت سیال از بین دو سطح مدل سازی کرد.

در شکل ۱ هندسه تماس در این مسئله خاص نشان داده شده است. یک سطح مسطح و مرکز آن در بی نهایت است و سطح دیگر یک استوانه طویل است که روی سطح حرکت می‌کند. این مسئله از زمره مسایل تماس ناهمدیس خطی دسته بندی می‌شود. از آنجا که در این پژوهش مدل سازی اثر ریزحفره‌ها مدنظر است، یک ریزحفره در هندسه تماس مشخص شده است.

برای مدل سازی ابتدا شرایط هندسه، بار، سرعت و مشخصات روان کار به عنوان داده‌های اولیه و مشخص در نظر گرفته می‌شود. معادله حاکم بر رفتار روانکار معادله مشهور رینولدز است [۱۸]. معادله رینولدز از ترکیب معادله ممنتوم ساده شده برای شرایط روان کاری و بقای جرم بدست آمده است. در روان کاری به خاطر لزجت بالای سیال و فیلم نازک لایه روانکار، نیروهای اینرسی به خاطر جرم پایین سیال (لایه نازک) قابل صرف نظر بوده و نیروی فشاری و نیروهای لزجت حاکم بر مسئله و در تعادل با هم هستند. با در نظر گرفتن ثابت $\bar{U} = \frac{U_a + U_b}{2}$ ، معادله رینولدز در حالت تماس خطی یک بعدی و به صورت زیر در می‌آید:



شکل ۲. تغییر هندسه حل در هنگام عبور استوانه از روی حفره در شبیه سازی با چهار گام زمانی

Fig. 2. Changing the geometry through crossing of pin over the dimple for 4 time steps simulation

حدس حداقل ضخامت استفاده خواهد شد.

$$w = \int_{x_1}^{x_2} p dx \quad (6)$$

الگوریتم تشریح شده مربوط به حل جریان در یک لحظه است و در صورتی که جریان پایا باشد حل کامل خواهد بود. در شکل ۲ عبور استوانه از روی ریزحفره در گام‌های زمانی نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، موقعیت ریزحفره نسبت به استوانه در تحلیل جریان و توزیع فشار می‌تواند تأثیر به سزایی داشته باشد. با حرکت استوانه روی سطح هندسه جریان با زمان تغییر می‌کند. این اثر در معادلات با عبارت گذرای معادله (۱) قابل مدل‌سازی است. چرا که در این عبارت می‌توان تأثیر تغییر ضخامت نسبت به گام قبلی را مدنظر قرار داد. گام زمانی اول روی سطح بدون حفره شروع می‌شود و در چند گام زمانی استوانه از روی حفره می‌گذرد تا در نهایت دوباره به سطح مسطح برسد.

۳- بررسی آزمایشگاهی:

برای بررسی آزمایشگاهی از دستگاه تریبولوژیکی پین روی دیسک بهره گرفته شده است. جنس دیسک از یک فلز اصطلاحاً نرم نظیر فولاد ST۳۷ انتخاب گردید که دارای سختی ۲۲۰ ویکرز است. جنس پین استفاده شده در انجام آزمایش‌ها، فولاد بلبرینگ ۵۲۱۰۰ با سختی ۸۰۰ ویکرز^۱ است. شکل پین به دلیل کروی بودن دو انتهای آن برای تماس نقطه‌ای مناسب بود، اما برای تماس خطی با استفاده از وایرکات ابتدا انتهای آن تخت شده، از دوطرف به میزان مساوی بریده

در تماس سطوح ناهم‌دیس فشارهای بسیار بالا سبب تغییر شکل الاستیک و افزایش فاصله آنها از یکدیگر می‌شود. اگر تماس دو جسم به صورت مستطیلی یا به عبارتی خطی باشد مثلاً استوانه و سطح مسطحی را در نظر بگیرید که روانکاری بین آنها قرار دارد؛ این تغییر شکل در عبارت $\delta(x)$ ظاهر می‌شود.

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2r} + \delta(x) + \text{dimple}(x) \quad (4)$$

$$\delta(x) = \frac{-2}{\pi E'} \int_{x_{\min}}^{x_{\text{end}}} p \ln(x-x')^2 dx' \quad (5)$$

با استفاده از معادلات ۲ تا ۵ خواص روان‌کار و ضخامت لایه روان‌کار بر اساس فشار قابل محاسبه است. بنابراین با حدس اولیه فشار می‌توان تخمینی از خواص روان‌کار و ضخامت لایه روان‌کار داشت. با حل معادله رینولدز توزیع فشار جدید بدست می‌آید و سپس توزیع فشار جدید با اعمال یک ضریب رهاسازی مناسب حلقه حل را معادلات ۱ تا ۵ را دور می‌زند تا همگرایی توزیع فشار بدست آید. با توجه به تغییرات عمده ویسکوزیته و چگالی با فشار تغییر شکل سطوح می‌تواند تا چندین مرتبه بزرگتر از حداقل ضخامت لایه روان‌کار شود و در نتیجه این معادلات در دستیابی به توزیع فشار باید همراه هم حل شوند.

با بدست آمدن توزیع فشار و انتگرال گرفتن فشار روی سطح تماس میزان بار تحمل شده بدست خواهد آمد. این معادله هم می‌تواند معیاری برای همگرایی و هم ابزاری برای تنظیم گام بعدی در حل توزیع فشار باشد. چرا که h_0 یا ضخامت اولیه لایه روان‌کار در معادله ۴ به صورت حدسی انتخاب می‌شود و معادله بار، رابطه ۶، برای اصلاح



شکل ۳. دیسک حفره دار (سمت چپ) و نحوه قرارگیری پین و دیسک بر روی دستگاه (سمت راست)
Fig. 3. Textured disk (Left) and pin on disk assembly on test apparatus (Right)

نسبت سطح تحت پوشش حفره به سطح کل که برای یک نسبت ابعادی مشخص چگالی بهینه‌ای وجود دارد. هرچه چگالی بالاتر باشد به معنی عملکرد بهتر نیست [۲۰]. حفره‌ها نیم‌کروی با قطر ۴۰۰ میکرومتر و عمق حدود ۳۰ میکرومتر روی سطح ایجاد شدند. از آنجا که دستگاه دارای خروج از مرکزی تقریباً برابر ۲ میلیمتر بود پهنای باند ۶ میلیمتر به مرکزیت شعاع ۱۶ میلیمتری در نظر گرفته شد. در شکل ۳ نحوه قرارگیری دیسک داخل محفظه و بر روی دستگاه نشان داده شده است.

در این پژوهش از روغن هیدرولیک ISO VG-۶۸ با گرانیوی ۶۸ cSt به عنوان روان‌کار استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۱ آورده شده است. برای بررسی اثر الگودهی سطح بر رفتار سایشی و اصطکاکی سطوح، تست‌ها تحت سه بار مختلف ۵۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ نیوتن و دوسرعت مختلف ۰/۰۸۵ و ۰/۲۱۵ متر بر ثانیه با شرایط ثابت‌نگه‌داشتن یک مورد و تغییر پارامتر دیگر انجام گرفته‌شده‌اند تا اثرات تغییر سرعت در بار ثابت و تغییر بار در سرعت ثابت بررسی شوند.

شده، به‌گونه‌ای که به ضخامت ۲ mm از آن باقی گذاشته شد و در نهایت یک انحنای یک‌طرفه به شعاع ۱۰ mm در انتهای آن زده شد. نمونه‌های مورد نظر قطر ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۸ میلی‌متر ساخته شد و به کمک دستگاه سنگ مغناطیسی دو طرف تمام دیسک‌ها سنگ‌زنی شد. نمونه‌ها تا سنباده ۱۰۰۰ پرداخت شدند.

با استفاده از لیزر Nd: YAG با طول موج ۱۰۶۴ nm و توان W ۱۰۰ با عرض پالس ۱۰۰ ns برای ایجاد حفره‌های حالت دایره‌ای روی سطح دیسک استفاده شد. با ایجاد ریزحفره روی سطح، برآمدگی روی سطح به‌دور حفره بوجود می‌آید که خود، باعث افزایش سایش و اصطکاک می‌شود. برای ارزیابی این برآمدگی‌ها به ناچار دوباره نمونه‌ها با سنباده ۱۰۰۰ پرداخت می‌شوند با توجه به شعاع حرکت پین روی سطح دیسک (۱/۶ سانتی‌متر) و عرض ناحیه تماس پین با دیسک، محاسبات مربوط به تعداد ریزحفره‌های روی سطح و فاصله بین حفره‌ها، با چگالی بهینه ۱۲ درصد برای ریزحفره‌ها در حالت ۵ ردیفه به‌صورت فاصله شعاعی مرکز تا مرکز حفره‌ها ۱/۴ میلی‌متر و در هر ردیف ۱۱۵ حفره در نظر گرفته شد. چگالی حفره عبارتست از

جدول ۱. مشخصات روان‌کار استفاده‌شده در بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی

Table 1. Lubricant specification which is used for experimental tests and numerical simulations

استاندارد ملی ایران	روش آزمون ASTM	مشخصات روان‌کار
۳۴۰	D-۴۴۵	گرانروی سینماتیک در cSt، ۴۰ درجه
۱۹۵	D-۲۲۷۰	شاخص گرانروی (VI) (حداقل)
۱۹۸	D-۹۲	نقطه اشتعال، درجه سلسیوس (حداقل)
۲۰۱	D-۹۷	نقطه ریزش، درجه سلسیوس (حداکثر)
۱۹۷	D-۱۲۹۸	دانسیته در ۱۵ kg/m ³ ، ۱۵ درجه

جدول ۲. تغییرات ضریب اصطکاک با اندازه شبکه حل

Table 2. Variation of friction coefficient with size of mesh

درصد تغییر ضریب اصطکاک			درصد تغییر ضریب اصطکاک		
اصطکاک محاسبه شده	ضریب اصطکاک محاسبه شده با تعداد مش شبکه	تعداد مش شبکه	اصطکاک محاسبه شده	ضریب اصطکاک محاسبه شده با تعداد مش شبکه	تعداد مش شبکه
نسبت به تعداد مش قبل			نسبت به تعداد مش قبل		
-۷/۳۱	۰/۰۵۹۵	۲۵۰	۰/۰۶۵۲		۱۳۰
۸/۸۰	۰/۰۵۴۲	۲۶۰	۱۱/۴۲	۰/۰۵۷۷	۱۴۰
۸/۰۴	۰/۰۴۹۹	۲۷۰	-۲۱/۷۶	۰/۰۷۰۳	۱۵۰
-۸/۷۸	۰/۰۵۴۲	۲۸۰	۱۲/۷۳	۰/۰۶۱۳	۱۶۰
-۰/۰۶	۰/۰۵۴۳	۲۹۰	۷/۷	۰/۰۵۶۶	۱۷۰
۱/۴۶	۰/۰۵۳۵	۳۰۰	-۲۳/۳۲	۰/۰۶۹۸	۱۸۰
۱/۴۷	۰/۰۵۲۷	۳۱۰	۲۱/۹۷	۰/۰۵۴۵	۱۹۰
-۳/۴۷	۰/۰۵۴۵	۳۲۰	-۷/۲۷	۰/۰۵۸۴	۲۰۰
-۰/۴۱	۰/۰۵۴۷	۳۳۰	۱۳/۳۳	۰/۰۵۰۷	۲۱۰
۳/۵۸	۰/۰۵۲۸	۳۴۰	-۲۲/۴۲	۰/۰۶۲۰	۲۲۰
۱/۸۲	۰/۰۵۱۸	۳۵۰	۶/۶۴	۰/۰۵۷۹	۲۳۰
			۴/۳۰	۰/۰۵۵۴	۲۴۰

ثانیه انجام شده است. در جدول ۲ استقلال حل از شبکه تحقیق شده است. همان طور که در شکل دیده می شود برای اندازه شبکه بزرگتر از $N = 280$ تغییر در میزان اصطکاک محاسبه شده و توزیع فشار دیده نمی شود. بنابراین کلیه محاسبات عددی با این تعداد مش انجام شده است.

نکته دیگری که در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است انتخاب گام زمانی مناسب برای عبور از حفره است. در مطالعات پیشین گذر از حفره مورد توجه نبوده و شرایط حفره و بدون حفره جداگانه مورد بررسی قرار می گرفتند. سپس بر اساس چگالی حفره ضریب اصطکاک با توجه به سهم هر کدام محاسبه می شد. در این مقاله شرایط متغیر تماس سطح و پین در حضور حفره به طور ویژه در نظر گرفته شده است. با انتخاب گام زمانی مناسب عبور از حفره به صورت مجموعه ای از شرایط تماس متغیر با زمان حل شده است. در جدول ۳ اثر انتخاب گام زمانی روی ضریب اصطکاک محاسبه شده نهایی نشان داده شده است. شرایط کاری شبیه سازی همانند مواردی است که در استقلال شبکه در نظر گرفته شد. ضریب اصطکاک به صورت متوسط ضریب محاسبه شده در کل گام های زمانی بدست آمده است. در شکل ۴ سه

با توجه به سه بار و دو سرعت مختلف تعداد ۶ آزمایش طراحی شده است. برای اطمینان از داده های بدست آمده هر آزمایش سه بار تکرار شد و در هر آزمایش متوسط ضریب اصطکاک برای ۲۰ متر مسافت عبور استوانه روی دیسک بدست آمده است. پس از طی مسافت ۲۰ متری دیسک تمیز شده و دوباره برای مسافت ۲۰ متری دیگری اندازه گیری ضریب اصطکاک تکرار می شود. این فرایند برای ۲۵ بار تکرار شده است و تا مسافت ۵۰۰ متر تماس دو سطح اندازه گیری ضریب اصطکاک ادامه یافت.

۴- نتایج:

میدان حل گسسته شده و روش نیوتن رافسون برای حل معادلات رینولدز حاکم بر جریان روان کار استفاده شده است. یکی از مواردی که در حل عددی باید مورد بررسی قرار گیرد، اندازه شبکه گسسته سازی شده است. برای بررسی اندازه شبکه روانکار و هندسه ای مشابه آزمایش تجربی در نظر گرفته شده است. حفره ها نیم کروی، با قطر ۴۰۰ میکرون و عمق ۳۰ میکرون و استوانه به شعاع ۱۰ میلی متر انتخاب شد. شبیه سازی ها در بار ۱۰۰ نیوتن و سرعت ۰/۱ متر بر

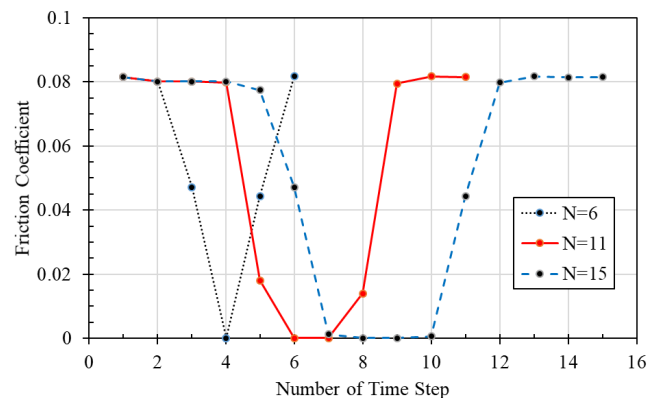
جدول ۳. تغییرات ضریب اصطکاک با تعداد گام زمانی حل
Table 3. Variation of friction coefficient with number of time step

درصد تغییر ضریب اصطکاک			درصد تغییر ضریب اصطکاک		
اصطکاک محاسبه شده نسبت به تعداد گام زمانی قبل	ضریب اصطکاک محاسبه شده با تعداد گام زمانی	تعداد گام زمانی	اصطکاک محاسبه شده نسبت به تعداد گام زمانی قبل	ضریب اصطکاک محاسبه شده با تعداد گام زمانی	تعداد گام زمانی
۴/۷۴	۰/۰۵۵۲	۹	۰/۰۴۰۸		۲
۰/۰۷	۰/۰۵۵۲	۱۰	۴۱/۳۸	۰/۰۵۷۷	۳
-۱/۷۸	۰/۰۵۴۲	۱۱	۵/۲۷	۰/۰۶۰۷	۴
۰/۸۸	۰/۰۵۴۷	۱۲	-۱۹/۲۲	۰/۰۴۹۰	۵
۰/۰۶	۰/۰۵۴۷	۱۳	۱۳/۸۳	۰/۰۵۵۸	۶
-۰/۳۷	۰/۰۵۴۵	۱۴	۲/۱۵	۰/۰۵۷۰	۷
-۰/۱۰	۰/۰۵۴۵	۱۵	-۷/۶۳	۰/۰۵۲۷	۸

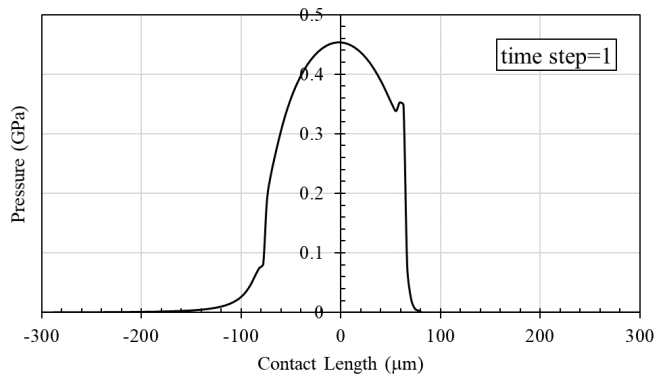
بهرتر نمایان کند ولی از طرفی هزینه محاسبات را بالاتر می‌برد. که بر اساس نتایج بدست آمده از جدول ۳ مشخص شد تعداد ۱۱ گام زمانی می‌تواند تخمین بهتری از شرایط گذرای عبور از حفره بدست دهد. بنابراین در محاسبات و بررسی اثر بار و سرعت از این تعداد گام زمانی بهره گرفته شده است. نکته مهم دیگر در مدل سازی شرایط گذرا این است که در عبور دو سطح از همدیگر و رسیدن به حفره ضخامت لایه روان کار با زمان تغییر می‌کند که اثر عبارت آخر معادله ۱ را با اهمیت خواهد کرد.

شکل ۵ (الف-ث) پنج توزیع فشار را در حین عبور از حفره نشان می‌دهد. حفره با حرکت سطح در ۱۱ مرحله از موقعیت اولیه خود که انتهای سمت راست است به موقعیت نهایی خود که انتهای سمت چپ است می‌رود. این نتایج برای بار ۱۰۰ نیوتن و سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه است. همانطور که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، توزیع فشار به علت نبودن حفره در میدان حل همانند توزیع فشار الاستوهیدرودینامیکی دو سطح بدون حفره است. در لحظه شکل ۵-پ حفره در سمت راست انتهای ناحیه تماس هرگزین قرار دارد و به خاطر حفره نسبتاً بزرگ نسبت به ضخامت لایه روان کار توزیع فشار به سمت راست کشیده شده است و در لحظه شکل ۵-ت حفره در سمت مقابل قرار می‌گیرد و توزیع فشار در این سمت تقریباً ثابت می‌شود. در لحظه شکل ۵-ث حفره سطح تماس را ترک کرده و اثرات

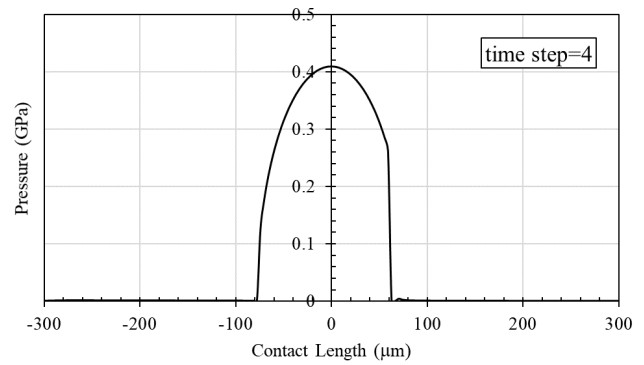
تقسیم‌بندی گام زمانی ۶، ۱۱ و ۱۵ در نظر گرفته شده و نتایج ضریب اصطکاک محاسبه شده در هر گام نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در گام‌های زمانی اولیه و انتهایی حفره در کناره‌های محدوده تماس قرار دارد و اثر محسوسی روی ضریب اصطکاک نمی‌گذارد ولی در گام‌های زمانی میانی این اثر و به طور خاص کاهش ضریب اصطکاک نمایان می‌شود. ضریب اصطکاک به صورت متوسط ضریب اصطکاک همه گام‌ها ارایه می‌شود در حالی که در مطالعات قبلی از این گذار چشم‌پوشی شده است. نکته حایز اهمیت این است که تعداد بیشتر گام زمانی می‌تواند اثر گذر سطح تماس از حفره را



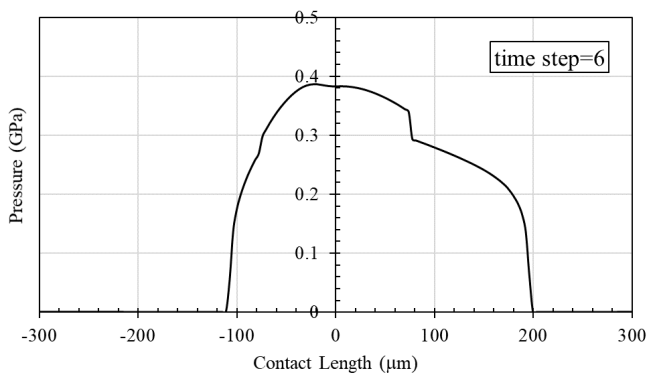
شکل ۴. تغییرات ضریب اصطکاک در حین عبور از حفره به ازای چند تعداد گام زمانی حل
Fig. 4. Variation of friction coefficient during dimple crossing for different time step



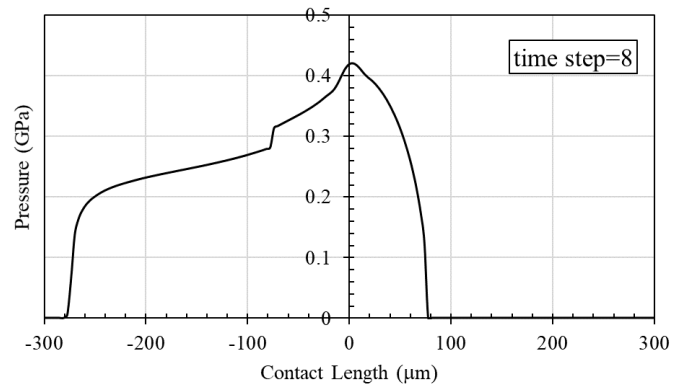
(الف)



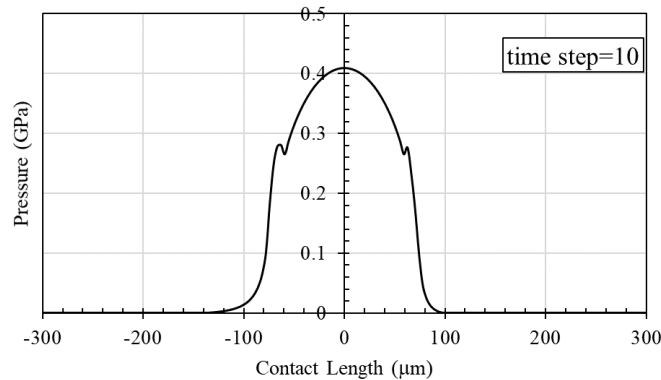
(ب)



(پ)



(ت)



(ث)

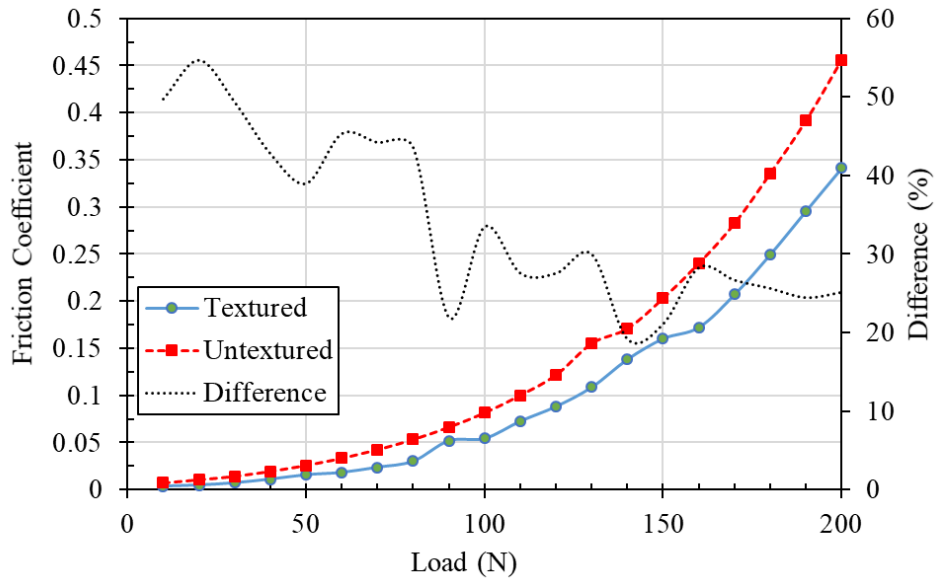
شکل ۵. تغییرات توزیع فشار در حین عبور از حفره

Fig. 5. Variation of pressure distribution during dimple crossing

می‌دهد. اثر وجود حفره‌ها بر بار به خصوص در بارهای پایین بسیار محسوس است. در این بارها ضریب اصطکاک نزدیک به ۴۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد. در حالی که در بارهای بالاتر این بهبود به ۲۵ درصد می‌رسد. علت این پدیده ایجاد توزیع فشار گسترده با حداکثرهای کمتر و ضخامت بیشتر روان کار است. بدین ترتیب تنش برشی در عرض لایه روان کار کمتر شده و ضریب اصطکاک ناشی از

گذرا در شکل‌گیری لایه روان کار در حال تأثیر هستند و در حالی که توزیع فشار تلاش دارد دوباره به سمت توزیع الاستوهیدرودینامیکی بر می‌گردد.

با مشخص شدن الزامات مدل‌سازی اثر بافت سطح برای شرایط مختلف بار و سرعت مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ تغییرات ضریب اصطکاک را برای بارهای مختلف در سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه نشان



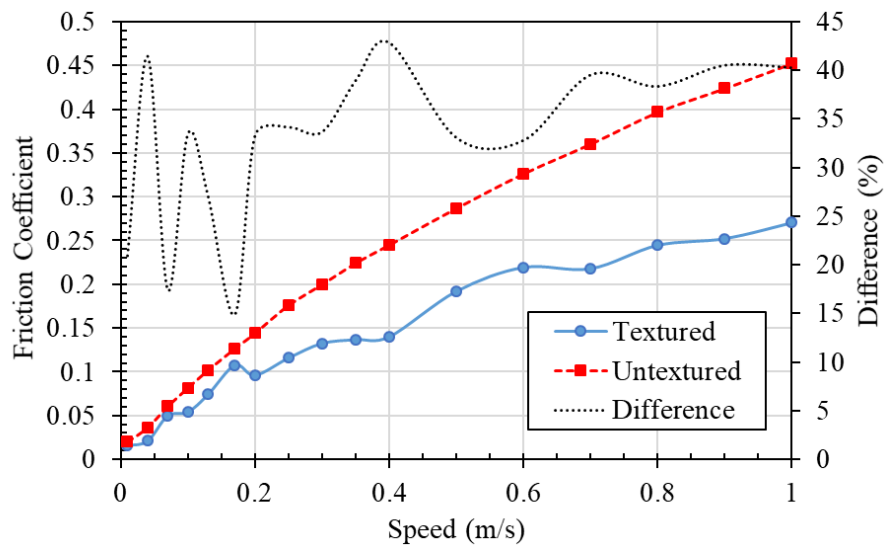
شکل ۶. مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب بار برای سطح صاف و حفره دار

Fig. 6. Comparison of friction coefficient variation with load for plain and textured surface

نیز نسبت به سطح بدون حفره به طور محسوس کمتر است که این نیز ویژگی مطلوب تلقی می‌شود. دلیل بهبود حفره‌دار کردن سطح بر اندازه ضریب اصطکاک را در این حالت باز باید در ضخیم‌شدن لایه روان‌کار و کاهش تنش برشی در عرض لایه روان‌کار جستجو کرد. برای بررسی اثر حفره‌دار کردن سطح به صورت تجربی در مجموع شش تست بر روی دیسک‌های ساده و حفره‌دار برای تماس خطی در حضور روان‌کار صورت گرفت. با توجه به تست‌های انجام‌شده به صورت تجربی، شرایط به صورت عددی نیز بررسی شد و نتایج بدست‌آمده از حالت بدون حفره در جدول ۴ و در صورت وجود حفره در جدول

برش لایه روان‌کار را کاهش می‌دهد.

در شکل ۷ اثر حفره دارشدن سطح در سرعت‌های مختلف سطح نشان داده شده است. انتظار بر این است که در سرعت‌های بالاتر به خاطر برش شدیدتر لایه روان‌کار ضریب اصطکاک افزایش یابد که در شکل نیز این روند دیده می‌شود. اثر حفره در سرعت‌های مختلف نیز همانند بارهای مختلف چشم‌گیر است. البته با این تفاوت که در سرعت‌های پایین بهبودی در حدود ۳۰ درصد دیده شده و در سرعت‌های بالاتر اثر آن قابل ملاحظه‌تر شده و تا ۴۰ درصد بهبود مشاهده می‌شود. شیب افزایش ضریب اصطکاک در سطح حفره‌دار



شکل ۷. مقایسه تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب سرعت برای سطح صاف و حفره دار

Fig. 7. Comparison of friction coefficient variation with speed for plain and textured surface

جدول ۴. شرایط و نتایج آزمایش و مقدار محاسبه شده در دیسک‌های ساده در تماس خطی

Table 4. Test conditions and the results of simulated and experimental data for plain disk in line contact condition

شماره تست	سرعت خطی m/s	نیروی اعمالی N	ضریب اصطکاک تجربی	خطای اصطکاک تجربی	ضریب اصطکاک محاسبه شده
۱	۰/۰۸۵	۵۰	۰/۱۱۵۷۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۲۳۱
۲	۰/۰۸۵	۱۰۰	۰/۱۷۰۵۷	۰/۰۰۱۲	۰/۰۷۱۶
۳	۰/۰۸۵	۱۴۰	۰/۲۱۴۷	۰/۰۰۰۸۲	۰/۱۴۹۵
۴	۰/۲۱۵	۵۰	۰/۱۰۸۰۳	۰/۰۰۱۶	۰/۰۴۴۲
۵	۰/۲۱۵	۱۰۰	۰/۱۵۵۰۳	۰/۰۰۳۹	۰/۱۴۵۷
۶	۰/۲۱۵	۱۴۰	۰/۱۸۸۷	۰/۰۰۱۸	۰/۱۷۳۳

جدول ۵: شرایط و نتایج آزمایش و مقدار محاسبه شده در دیسک‌های حفره‌دار در تماس خطی

Table 5. Test conditions and the results of simulated and experimental data for textured disk in line contact condition

شماره تست	سرعت خطی m/s	نیروی اعمالی N	ضریب اصطکاک تجربی	خطای اصطکاک تجربی	ضریب اصطکاک محاسبه شده
۱	۰/۰۸۵	۵۰	۰/۰۹۴۹۷	۰/۰۰۱	۰/۰۲۲۰
۲	۰/۰۸۵	۱۰۰	۰/۱۴۳۴۳	۰/۰۰۴۱	۰/۰۶۸۷
۳	۰/۰۸۵	۱۴۰	۰/۱۸۸۸۳	۰/۰۰۵۳۵	۰/۱۴۴۲
۴	۰/۲۱۵	۵۰	۰/۰۹۰۵۳	۰/۰۰۲۸۵	۰/۰۴۳
۵	۰/۲۱۵	۱۰۰	۰/۱۲۹۹۷	۰/۰۰۲۲	۰/۱۳۹۴
۶	۰/۲۱۵	۱۴۰	۰/۱۵۲۳	۰/۰۰۱۴۵	۰/۱۶۴۲

در نتیجه آن، ضریب اصطکاک کاهش یافته و بار نیز شرایط تماس را به سمت تماس مخلوط و درگیری بیشتر زبری‌ها و البته اصطکاک بیشتر سوق می‌دهد.

روند تغییرات نتایج عددی و تجربی در مورد بار مشابه یکدیگر است. در نتایج عددی با افزایش بار افزایش ضریب اصطکاک مشاهده شد ولی افزایش سرعت بر خلاف نتایج تجربی که کاهش ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد باعث افزایش این شاخص شده است. این تفاوت آشکار مشخصاً به خاطر فرض جریان الاستوهیدرودینامیک و پرهیز از مدل‌سازی درگیری زبری‌ها در حل عددی است. در حالی که در رژیم روان کاری مخلوط که درگیری جزئی زبری‌ها وجود دارد، افزایش سرعت، افزایش ضخامت لایه روان کار و کاهش درگیری و اصطکاک زبری‌ها را به دنبال خواهد داشت که در قیاس با افزوده شدن به اصطکاک لزج قابل ملاحظه است. نکته جالب توجه این است که در

۵ آورده شده است. توجه شود که در محاسبه ضریب اصطکاک در حالت حفره‌دار باید به چگالی حفره‌ها توجه داشت و بر اساس آن ضریب اصطکاک را به صورت نسبتی از سطح حفره‌دار و بدون حفره محاسبه کرد.

همان‌طور که از آزمایش‌ها مشخص است شرایط تماس به صورت صرفاً هیدرودینامیکی یا الاستوهیدرودینامیکی نبوده است و اثر زبری و اصطکاک ناشی از آن وجود دارد که در مدل عددی دیده نشده است و بنابراین خطایی در بین دو یافته وجود دارد. این خطا در سرعت‌های بسیار کم که سهم اصطکاک لزج نسبت به درگیری زبری‌ها کوچک است بیشتر دیده می‌شود. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان ضریب اصطکاک مربوط به آزمایش شماره ۳ و کمترین میزان مربوط به آزمایش شماره ۴ است. در بار ثابت، افزایش سرعت سبب افزایش ضخامت لایه روان کار می‌شود که

فهرست علائم

علائم انگلیسی

<i>dimple</i>	هندسه حفره که بخشی از یک دایره است، m
D	عمق، m
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
h	ضخامت لایه روان کار، m
p	فشار، Pa
r	شعاع، m
t	زمان، s
U	سرعت، m/s
w	بار، N/m
x	مختصات مکانی، m

سرعت بالا نتایج محاسبات عددی به اندازه‌گیری‌های تجربی نزدیک شده است. خطا در مورد آزمایش ۵ و ۶ به حدود ۸ درصد می‌رسد. این امر به خاطر نزدیک شدن شرایط تماس در شرایط آزمایش به حالت الاستوهیدرودینامیک است.

با مقایسه نتایج تجربی بایکدیگر مشخص شد که میزان ضریب اصطکاک برای دیسک‌های حفره‌دار حدود ۱۴ تا ۲۱ درصد نسبت به دیسک‌های ساده کاهش یافته‌است. این کمیت برای تخمین عددی حدود ۴ درصد است. با وجودی که در بخش قبل بهبود متوسط ۳۰ درصد پیش بینی شده بود ولی این میزان کاهش مربوط به چگالی حفره ۵۰ درصد است و برای چگالی‌های کمتر مانند ۱۲ درصد سهم حفره‌ها کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری:

در این مقاله مدل‌گذاری برای شبیه‌سازی جریان روان کار عبوری از یک حفره ایجادشده در سطح ارایه شد. از آنجا که دهانه حفره در قیاس با ضخامت لایه روان کار بسیار بزرگ است، جریان را به شدت تحت تأثیر می‌گذارد. مدل‌سازی جریان در لحظه‌ای که حفره در وسط ناحیه تماس قرار دارد و تعمیم آن به کل زمان عبور سطح مقابل از روی حفره باعث اشتباه در تخمین ضریب اصطکاک می‌شود و برای بهبود این تخمین در این مقاله روش عبور حفره از سطح تماس بررسی شد و مشخص گردید که مدل‌سازی با یازده گام زمانی نتایج بهتری را در اختیار می‌گذارد. همچنین توانمندی مدل برای استخراج توزیع فشار و ضریب اصطکاک با بررسی اثر سطح حفره‌دار در شرایط بار و سرعت مختلف نشان داده شد. با توجه به اینکه شرایط مدل به صورت الاستوهیدرودینامیک است مشخص گردید که با افزایش بار و سرعت ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.

همچنین در این پژوهش اثر حفره‌ها در شرایط نزدیک به حالت الاستوهیدرودینامیک و مخلوط به صورت تجربی بررسی گردید. حفره‌هایی با روش لیزر با چگالی ۱۲ درصد روی سطح ایجاد شد که نتایج حاکی از کاهش حدود ۱۴ تا ۲۱ درصد ضریب اصطکاک برای دیسک‌های حفره‌دار بود. تخمین نتایج عددی و تجربی در سرعت‌های بالا به یکدیگر نزدیک بود که نشان از برقرار رژیم الاستوهیدرودینامیک و صحت مدل‌سازی دارد.

علائم یونانی

δ	تغییر شکل الاستیک سطح، m
μ	ویسکوزیته، Pa.s
ρ	چگالی، kg/m^3

زیرنویس

•	مقدار اولیه یا مرجع
a	کمیت مربوط به جسم a
b	کمیت مربوط به جسم b
d	حفره
e	مقدار نهایی

مراجع

- [1] I. Etsion, lubrication, Laser surface texturing and applications, Recent developments in wear prevention, friction, (2010) 137-158.
- [2] I. Etsion, State of the art in laser surface texturing, Journal of Tribology, 127(1) (2005) 248-253.
- [3] I. Etsion, L. Burstein, A model for mechanical seals with regular microsurface structure, Tribology Transactions, 39(3) (1996) 677-683.
- [4] Y. Qiu, M. Khonsari, Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless

- model for design and optimization of surface textures for tilting pad thrust bearings, *Tribology International*, 119 (2018) 190-207.
- [13] R. Rahmani, H. Rahnejat, Enhanced performance of optimised partially textured load bearing surfaces, *Tribology International*, 117 (2018) 272-282.
- [14] X. Meng, C. Gu, Y. Xie, Elasto-plastic contact of rough surfaces: a mixed-lubrication model for the textured surface analysis, *Meccanica*, 52(7) (2017) 1541-1559.
- [15] M. Rom, S. Müller, An effective Navier-Stokes model for the simulation of textured surface lubrication, *Tribology International*, 124 (2018) 247-258.
- [16] M. Taei, A. Torabi, S. Akbarzadeh, M. Khonsari, M. Badrossamay, On the performance of EHL contacts with textured surfaces, *Tribology Letters*, 65(3) (2017) 85.
- [17] X.-L. Yan, Y.-Y. Zhang, G.-X. Xie, X.-Q. Du, F. Qin, Effects of texture orientation on the mixed thermal elastohydrodynamic lubrication and fatigue life in point contacts, *Journal of Tribology*, 141(1) (2019).
- [18] B.J. Hamrock, S.R. Schmid, B.O. Jacobson, *Fundamentals of fluid film lubrication*, CRC press, 2004.
- [19] G. Stachowiak, A.W. Batchelor, *Engineering tribology*, Butterworth-Heinemann, 2013.
- [20] B. Antoszewski, The effect of laser surface texturing on frictional performance of sliding pair, *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*, (2012) 14-18.
- steel rings, *Tribology International*, 44(5) (2011) 635-644.
- [5] S. Kango, D. Singh, R. Sharma, Numerical investigation on the influence of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing, *Meccanica*, 47(2) (2012) 469-482.
- [6] D. Xiong, Y. Qin, J. Li, Y. Wan, R. Tyagi, Tribological properties of PTFE/laser surface textured stainless steel under starved oil lubrication, *Tribology International*, 82 (2015) 305-310.
- [7] D. Braun, C. Greiner, J. Schneider, P. Gumbsch, Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication, *Tribology international*, 77 (2014) 142-147.
- [8] R. Chaudhary, R. Pandey, S. Mazumdar, Tribological studies of low and high viscous oils lubricated heavily loaded textured point contacts under the reciprocating motion, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234(2) (2020) 229-246.
- [9] G. Caramia, G. Carbone, P. De Palma, Hydrodynamic lubrication of micro-textured surfaces: Two dimensional CFD-analysis, *Tribology International*, 88 (2015) 162-169.
- [10] J. Han, L. Fang, J. Sun, S. Ge, Hydrodynamic lubrication of microdimple textured surface using three-dimensional CFD, *Tribology transactions*, 53(6) (2010) 860-870.
- [11] D. Gropper, T.J. Harvey, L. Wang, Numerical analysis and optimization of surface textures for a tilting pad thrust bearing, *Tribology International*, 124 (2018) 134-144.
- [12] D. Gropper, T.J. Harvey, L. Wang, A numerical

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. Torabi, S. Akbarzadeh, B. Azami, *Transient numerical modeling and experimental investigation of the effect of surface texture on elastohydrodynamic lubrication*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(Special Issue 5)(2021) 3201-3212.

DOI: 10.22060/mej.2020.18106.6737

