







Investigation on the Effect of Different Parameters in Lubrication Conditions in the Roller Bearings of the Rotary Kiln of Pelletizing Plant of Butia Iranian Steel Company

Davood Beyralvand¹, Farzad Banazadeh², Hossein Ghazizade-Ahsaei^{3*}, Rasoul Moghaddas⁴

^{1,2}MSc Student, Engineering Technical Services, Butia Iranian Steel Complex, Kerman, Iran.

³Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

⁴MSc Student, Engineering Technical Services Manager, Butia Iranian Steel Complex, Kerman, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:

Original Research

Received: 09.01.2021

Revised: 12.03.2021

Accepted: 02.19.2022

Keyword:

Rotary Kiln

Pelletizing

Grease

Lubricant Film Thickness

Elastohydrodynamics

*Corresponding Author:

Hossein Ghazizade-Ahsaei

Email: h-ghazizade@tvu.ac.ir

Roller bearings are one of the most widely used mechanical components. The load on the bearing is supported by the pressure that is developed in fluid-film and thus the lubricant is less able to escape and a longer-lasting lubricant film is generated called elastohydrodynamics lubrication (EHL). In general, to understand the lubrication regimes, it is important to consider the thickness of the lubrication layer. Lubricant film thickness is one of the most important parameters affecting the performance of bearings. In the present study, using theoretical equations and using MATLAB programming software, the load distribution along the rotary kiln was investigated and calculated, and then the film thickness of the lubricant (base oil and grease) in the roller bearings of the rotary kiln of Butia Iranian Steel Pelletizing Complex was calculated. Finally, the effect of various parameters such as rotary kiln speed, lubricant operating temperature, fill ratio, base oil viscosity and viscosity index of base oil were deliberated. The results showed that by increasing the base oil viscosity from 150 cst to 1000 cst, the film thickness increased by 239%. Furthermore, increasing the viscosity index caused small changes in the base oil viscosity in the operating temperature and reduced the starting torque at the beginning of application.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

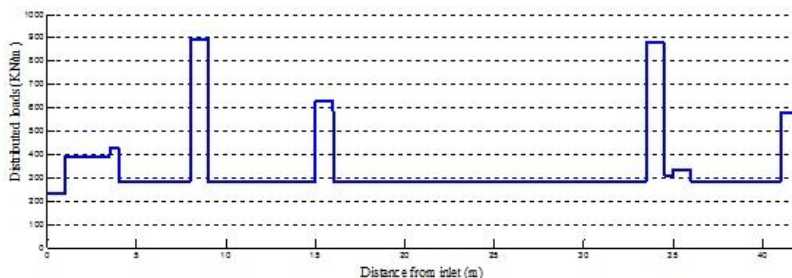
Lubrication is an essential factor in ensuring proper performance and longevity of bearings. The load on the bearing is supported by the pressure developed in fluid-film and thus the lubricant is less able to escape and a longer-lasting lubricant film is generated, called elastohydrodynamics lubrication (EHL). In the present study, using theoretical equations and MATLAB programming software, the load distribution along the rotary kiln was investigated and calculated and then the film thickness of the lubricant (base oil and grease) in the roller bearings of the rotary kiln of Butia Iranian Steel Pelletizing Complex was calculated.

Methodology

The Reynolds equation, which is derived from the continuity and momentum equations, can be considered as the core of lubricant equations in the control volume of the entry into the space between the ball and the bearings. The minimum film thickness for the inner and outer ring of roller bearings was obtained by solving coupled Reynolds equations and elasticity equations and least squares approximation. To calculate the load distribution of the rotary kiln assuming rigidity, alignment and the absence of any dynamic imbalance force in the rotary kiln, the loading included the weight of the different shells of the kiln along its length, the weight of the kiln tools (including tires (rings), open gear, and hood) according to the manufacturer's plan, the weight of bricks and refractory masses at different points according to the fireproofing plan, the mass of the chunk (assuming 10 cm) and the feed rate of the input pellets at the rate of 6% with the manufacturer's specifications such as density and dimensions were investigated.

Results and discussion

According to Figure 1, the load distribution along the rotary kiln was investigated and calculated. The effect of various parameters such as rotary kiln speed, lubricant operating temperature, fill ratio, base oil viscosity and viscosity index of base oil were examined. Figure 2 indicates that by increasing the base oil viscosity from 150 cst to 1000 cst, the film thickness increased by 239%. Furthermore, increasing the viscosity index caused small changes in the base oil viscosity in the operating temperature and reduced the starting torque at the beginning of application.



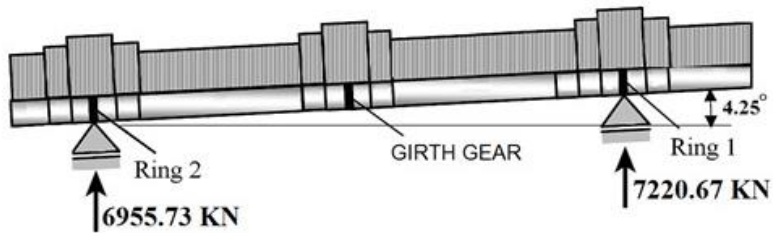


Figure 1. Schematic of the load distribution along the rotary kiln.

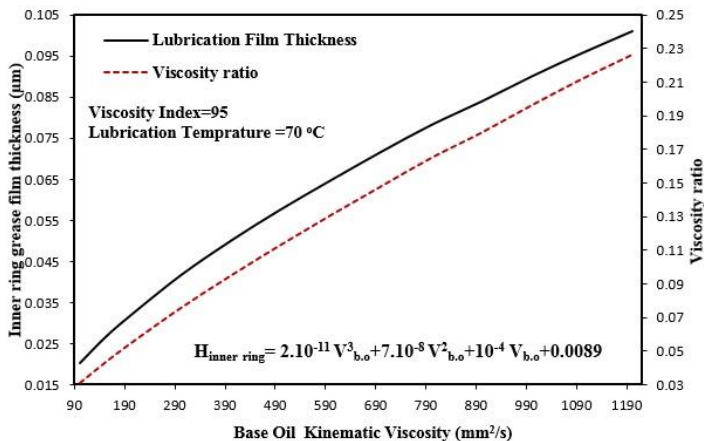


Figure 2. Lubricant film thickness and viscosity ratio variations with base oil viscosity.

Conclusion

In the present study, using the theoretical equations and using MATLAB programming software, the load distribution along the rotary kiln was investigated and calculated and then the film thickness of the lubricant (base oil and grease) in the roller bearings of the rotary kiln of Butia Iranian Steel Pelletizing Complex was calculated. Finally, the effect of various parameters such as rotary kiln speed, lubricant operating temperature, fill ratio, base oil viscosity and viscosity index of base oil were examined. The results show that by increasing the base oil viscosity from 150 cst to 1000 cst, the film thickness increased by 239%. Furthermore, increasing the viscosity index caused small changes in the base oil viscosity in the operating temperature and reduced the starting torque at the beginning of application.

Acknowledgement

This work/research was supported by the Butia Iranian Steel Complex. The authors greatly appreciate the assistance of Butia Iranian Steel Complex.



بررسی تأثیر عوامل مختلف بر شرایط روان کاری در رولربیرینگ‌های کوره دوار کارخانه گندله‌سازی مجتمع فولاد بوتیای ایرانیان

داوود بیرالوند^۱، فرزاد بناءزاده^۲، حسین قاضی‌زاده احساسی^{۳*}، رسول مقدس^۴

۱ و ۲- کارشناسی ارشد، امور خدمات فنی مهندسی، مجتمع فولاد بوتیای ایرانیان، کرمان، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۴- کارشناسی ارشد، مدیر امور خدمات فنی مهندسی، مجتمع فولاد بوتیای ایرانیان، کرمان، ایران.

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

کلید واژگان:

کوره دوار

گندله‌سازی

گریس

ضخامت فیلم روانکار

الاستوهیدرونیامیک

رولربیرینگ‌ها از پرکاربردترین قطعات مکانیکی هستند که روان‌کار این قطعات در رژیم‌های از روان کاری که الاستوهیدرونیامیک نامیده می‌شود قرار دارد. به‌طور کلی برای درک رژیم‌های روان کاری، در نظر داشتن ضخامت لایه روان کاری از اهمیت بسیاری برخوردار است. ضخامت فیلم روان کار، یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در عملکرد بیرینگ‌هاست. در مطالعه حاضر با به‌کارگیری روابط تئوری و استفاده از نرم‌افزار متلب، در ابتدا به بررسی و محاسبه کامل توزیع بار در طول کوره دوار و سپس به محاسبه ضخامت فیلم روان کار (روغن پایه و گریس) در بیرینگ‌های ساپورت^۱ رولر کوره دوار مجتمع گندله‌سازی فولاد بوتیای ایرانیان پرداخته شده است. در ادامه تأثیر عوامل مختلف نظیر سرعت کوره، دمای عملیاتی روانکار، حجم گندله ورودی به کوره، درصد حرکت خطی جک هیدرولیک، ویسکوزیته^۲ روغن پایه گریس و شاخص گرانروی روغن پایه بر عملکرد روانکاری مورد بحث قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ویسکوزیته روغن پایه از ۱۵۰ سانتی‌استوک به ۱۰۰۰ سانتی‌استوک ۲۳۹ درصد ضخامت فیلم روانکار افزایش پیدا می‌کند. همچنین از نتایج مشاهده گردید که افزایش شاخص گرانروی سبب می‌شود در محدوده دمایی کارکرد، در ویسکوزیته روغن پایه تغییرات کمی پیدا شود و در شروع به‌کارگیری میزان گشتاور استارت کاهش یابد.

*نویسنده مسئول: حسین قاضی‌زاده احساسی

پست الکترونیکی:

h-ghazizade@tvu.ac.ir

¹ Support

² Viscosity



مقدمه

عموماً در تمامی بلبرینگ‌ها و رولبرینگ‌ها از روان کارها استفاده می‌شود و علت آن کاهش اصطکاک و در نتیجه بهبود عملکرد سیستم است. روان کاری عاملی اساسی در تضمین عملکرد مناسب و طول عمر بلبرینگ و رولبرینگ‌ها می‌باشد.

در تماس ناهم‌دیس دو جسم سخت همراه با روان کاری، با افزایش بار وارد بین دو جسم، سطح تماس، تغییر چندان‌ی ندارد ولی فشار در لایه روان کار افزایش پیدا می‌کند به طوری که مشاهده می‌شود فشار می‌تواند تا دو گیگا پاسکال افزایش یابد. در چنین فشارهایی، سطوح تماس، تغییر شکل الاستیک می‌دهند و دیگر صلب نخواهند بود. این تغییر شکل، فضای بیشتری به روان کار می‌دهد تا دو سطح را از هم جدا کند که به آن رژیم روان کاری الاستوهیدرودینامیک^۱ یا به صورت مخفف لاتین EHL می‌گویند. رژیم روان کاری الاستوهیدرودینامیک می‌تواند بر اساس شرایط فقر^۲ روان کار یا در شرایط کامل روان کاری^۳ بررسی شود. در شرایط فقر روان کاری که ناشی از جدایی روان کار از سطح بلبرینگ در اثر سرعت، نیروی گریز از مرکز بالا، گرمای شدید و نیروی زیاد است، ضخامت روان کار در نواحی دور از تنش‌های هرتز، در بعضی مواقع به حدی پایین است که هیچ‌گونه روان کاری در ناحیه هرتز انجام نمی‌شود [۱]. نبود یک فیلم روان کننده می‌تواند باعث سایش و حتی خرابی نهایی یاتاقان شود [۲].

بسیاری از محققان، رفتار روان کاری فیلم‌های روغن روی یاتاقان غلتکی را از دهه ۱۹۴۰ مطالعه کرده‌اند. داوسون [۳] درک اساسی از عملکرد روان کاری را ایجاد کرد و پیشنهاد تئوری روان کاری الاستوهیدرودینامیک را ارائه داد. بعد از آن، مطالعات گسترده‌ای در مورد روان کاری با روغن و گریس با تمرکز بر روش الاستوهیدرودینامیک به صورت تئوری و آزمایشگاهی انجام شده است [۴-۶]. جابلونکا و همکارانش [۷] به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از ظرفیت خازنی الکتریکی و هم به صورت تئوری به محاسبه ضخامت فیلم روان کار برای دو نوع روغن معدنی و سینتیک پایه پلی‌آلفا اولفین، در سه دامنه ۲ و ۴ و ۶ کیلو نیوتنی، در رینگ‌های داخلی و خارجی بی‌رینگ شیار عمیق پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که نتایج تئوری و آزمایشگاهی در بعضی نقاط حداکثر تا حدود ۱۵ درصد اختلاف داشتند. ویتک و همکارانش [۸] با توجه به اهمیت بلبرینگ‌های موتورهای الکتریکی به بررسی شرایط روان کاری و محاسبه ضخامت فیلم روان کاری در بلبرینگ‌های شیار عمیق موتور الکتریکی پرداختند. نتایج نشان داد که موتور الکتریکی در عملیات میدانی معمولاً توسط نیروهای دینامیکی حاصل از تغییر جریان، بارگذاری می‌شود که باعث ارتعاش عناصر یاتاقان می‌شود. به همین دلیل ضخامت لایه روان کننده به صورت دینامیکی تغییر می‌کند. لوت و همکارانش [۹] با استفاده از مفاهیم دینامیک غیرخطی و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های سری زمانی، شکست دما و فیلم نسبی را ارائه دادند و با استفاده از این معادلات به بررسی شرایط روان کاری در بلبرینگ‌ها پرداختند. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ضخامت فیلم گریس در یک بلبرینگ تنها با ضخامت فیلم روغن تراوش شده آن محاسبه نمی‌شود و نوع و میزان نفوذ قوام‌دهنده گریس در تشکیل فیلم روان کار کاملاً مؤثر است. در همین راستا زو و همکاران [۱۰] با مطالعه آزمایشگاهی به مطالعه ضخامت فیلم گریس روی یک بلبرینگ شیار عمیق پرداختند و مشاهده کردند که ضخامت فیلم گریس ممکن است از ضخامت فیلم الاستوهیدرودینامیکی نظری محاسبه شده از روغن پایه منحرف شود و ضخامت فیلم از نظر زمانی ثابت نباشد و این

¹ Elastohydrodynamic

² Starvation

³ Fully Flooded

موضوع را در ۱۰۰ ساعت آزمون مشاهده کردند. همچنین نشان داده شده است که ضخامت فیلم برای مدت زمان طولانی تر نه تنها با خواص کلاسیک مانند گرانیروی روغن و میزان تراوش روغن از گریس بلکه با تخریب برش ریزساختار آن تعیین می‌شود. زنگ و همکاران [۱۱] به صورت آزمایشگاهی، تأثیر شرایط بارگذاری و میزان ارتعاشات وارد بر بیرینگ را روی ضخامت فیلم گریس مطالعه کردند. در این مطالعه، شرایط بارگذاری تا ۲۹ نیوتن و دامنه ۶۰ هرتز متغیر و نتایج آزمایشگاهی و تئوری تا ۱ درصد به هم نزدیک شدند. کولیوند و همکارانش [۱۲] ایجاد شکستگی قطعه در اثر فقر روان کاری و کاهش فیلم روان کار را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در شرایط فقر روانکاری برخلاف روانکاری کامل، کاهش ویسکوزیته سبب افزایش عمر خستگی در بیرینگ می‌شود.

با توجه به مرور برخی از مهم ترین مطالعات در خصوص روانکاری تجهیزات مختلف صنعتی، از آنجا که کوره‌های دوار به عنوان قلب تپنده کارخانه‌های گندله‌سازی و سیمان شناخته می‌شوند به همین دلیل مطالعه بر روی عوامل تأثیرگذار بر روی عملکرد آنها بسیار حائز اهمیت است. یکی از موارد تأثیرگذار بر عملکرد کوره دوار، مطالعه شرایط روانکاری بیرینگ‌های ساپورت رولر کوره است که نیاز به بررسی و تحلیل عملکرد دقیقی دارد. در همین راستا مطالعه حاضر پس از محاسبات مربوط به شرایط بارگذاری در بیرینگ، به محاسبه کامل شرایط روان کاری از جمله: ضخامت فیلم روانکار، شاخص روغن‌رسانی و گشتاور اصطکاکی می‌پردازد و تأثیر عوامل مختلف بر این عوامل را بررسی می‌کند.

مواد و روش‌ها

در رژیم روانکاری الاستوهیدرودینامیک، تعاملی بین معادلات پیوستگی، مومنتوم، تغییر شکل سطح و الاستیسیته، رئولوژی روانکار و خواص سطح برقرار است و معادلات کوپل شده با یکدیگر باید حل شوند. معادله رینولدز که از معادلات پیوستگی و مومنتوم گرفته می‌شود را می‌توان به عنوان هسته اصلی معادلات روانکار در حجم کنترل ورود به فضای بین ساچمه و کنس^۱ های بیرینگ‌ها در نظر گرفت [۱]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12 \left(u_m \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + v_m \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} \right) \quad (1)$$

u_m, v_m به ترتیب متوسط سرعت در جهت x, y هستند. ضخامت فیلم روغن از هندسه منحنی شکل رولرها و کنس‌های داخلی و خارجی $S(x,y)$ و تغییر شکل الاستیک $\delta(x,y)$ در اثر تنش‌های فشاری هرتزی در منطقه $A(x,y)$:

$$H(x,y) = h_0 + \left(\frac{x^2}{2b} + \frac{y^2}{2a} \right) + \frac{2}{\pi} \iint_{A(x,y)} \frac{P_e(x',y') dx' dy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} = h_0 + S(x,y) + \delta(x,y) \quad (2)$$

h_0 ضخامت فیلم روان کاری، مرجع و یک عدد ثابت است.

به‌طور معمول نمی‌توان از روش‌های تحلیلی در حل معادلات کوپل شده استفاده کرد و روش‌های عددی بسیار مؤثرتر هستند. از این رو مطالعاتی در این خصوص انجام شده است [۱۳; ۱۴]. یکی از جالب‌ترین عوامل

¹ Ring

خروجی، حداقل ضخامت فیلم است. گروبین [۱۵] جزو اولین کسانی بود که ضخامت فیلم الاستوهیدرودینامیک را پیش بینی کرد. حداقل ضخامت فیلم روان کاری برای رینگ داخلی و خارجی رولر بیرینگ‌ها با حل معادلات کوپل شده رینولدز و معادلات الاستیسیته و تقریب حداقل مربعات مطابق رابطه (۳) به دست می آید [۱]:

$$H_{min} = R_{i\&o} \times 1.714 \times U^{*0.694} \times G^{*0.568} \times W^{*-0.128} \quad (3)$$

به طوری که U^* , G^* , w^* به ترتیب عوامل بی بعد مربوط به اثرات خواص سطح و روان کار، نیرو و بارگذاری و سرعت را ارائه می دهند و در مرجع [۱] به خوبی توضیح داده شده اند. زمانی که روان کار از نوع گریس باشد، علاوه بر روغن ماده قوام دهنده، پرکن‌هایی نظیر گرافیت و مولیبدن دی‌سولفاید نیز وارد فضای بین رولر و کنس‌ها می شوند و این مواد علاوه بر روغن پایه (که نقش اصلی در ایجاد فیلم روانکار را دارد)، در شکل‌گیری و ضخامت فیلم روان کار مؤثر می باشند؛ از این رو روابط بالا که فقط تأثیر روغن پایه در ایجاد فیلم روان کاری را بررسی می کنند باید تصحیح شوند. در همین راستا مطالعات تجربی و عددی فراوانی برای تخمین ضخامت فیلم گریس صورت گرفت؛ برای نمونه کاوزلاریچ و گرین وود، معادله‌ای را برای تعیین نرخ برش گریس‌ها و به تبع، تخمین ضخامت فیلم گریس ارائه دادند [۱۶]. دانگ و همکارانش [۱۷] با مطالعه آزمایشگاهی و عددی مدلی برای تخمین ضخامت فیلم گریس کردند و نتایج آنها حاکی از این است که نسبت ضخامت فیلم گریس به ضخامت فیلم روغن پایه، نسبت مستقیم با نسبت ویسکوزیته ظاهری گریس به توان ۰.۷۴ دارد. در مطالعه حاضر از این روش برای تخمین ضخامت فیلم گریس استفاده شده است. برای به دست آوردن ویسکوزیته ظاهری گریس از نتایج مرجع [۱۸] و روابط آن استفاده شده است:

$$\eta_g = \eta_{oil} \left[1 + \eta \left(\frac{\varphi}{1 - \varphi} \right) \right] \quad (4)$$

درصد حجمی قوام دهنده و پرکن گریس مورد استفاده (مولیبدن دی‌سولفاید) در بیرینگ‌ها به ترتیب ۱۸.۴ درصد و ۳ درصد می باشد. از طرفی میزان حضور قوام دهنده و پرکن در منطقه تماس ساچمه و کنس طبق مطالعه [۱۸] برای گریس لیتیم کمپلکسی حدود ۶۸.۵ درصد می باشد؛ بنابراین φ به عنوان درصد حجمی قوام دهنده و ذرات پرکن در منطقه تماس برابر ۱۴.۶ درصد می باشد.

η ویسکوزیته طبیعی و ذاتی و برای توزیع فاز مواد پراکنده است و کاملاً وابسته به شکل ذرات قوام دهنده می باشد. برای ذرات کروی مثل گریس‌های پایه کلسیم برابر ۲.۵ و برای گریس لیتیم کمپلکس که ذرات آن شکل استوانه‌ای دارند [۱۸] این پارامتر برابر است با :

$$\eta = \frac{14}{15} + \frac{f^2}{15(\log 2f - 3/2)} + \frac{f^2}{5(\log 2f - 1/2)} \quad (5)$$

f نسبت متوسط اندازه بزرگترین ذرات به متوسط اندازه کوچکترین آنها است. این مقدار بسته به نوع گریس و همچنین تکنولوژی ساخت، کاملاً متفاوت است. بیشتر سازندگان داخلی این نسبت را به طور میانگین دو در نظر می‌گیرند.

با فرض شرایط روان کاری کامل، ضخامت فیلم روانکار (گریس) برابر است با [۱۷]:

$$\frac{H_{grease}}{H_{oil}} = \left(\frac{\eta_{effective,grease}}{\eta_{oil}} \right)^{0.74} \quad (۶)$$

روانکار بیرینگ بسته به شرایط، مطابق استاندارد ISO ۲۸۱ [۱۹] باید دارای یک حداقل ویسکوزیته در شرایط کاری باشد. شاخص روغن‌رسانی^۱ یا کاپا (K)، شرایط روغن‌رسانی به بیرینگ در دمای کاری، دور کاری معمول (n) و قطر متوسط بیرینگ (قطر متوسط بیرینگ (dm) عبارت است از حاصل جمع قطر خارجی و قطر داخلی تقسیم بر دو) را بیان می‌کند. هرچه مقدار شاخص روغن‌رسانی بالاتر باشد، شرایط روانکاری بلبرینگ و عمر نامی موردانتظار آن بهتر است. این باید براساس افزایش اصطکاک احتمالی به دلیل ویسکوزیته روغن بالاتر قضاوت شود. بنابراین، بیشتر کاربردهای بلبرینگ برای شرایط روان کاری در محدوده شاخص روغن‌رسانی ۱ تا ۴ طراحی شده است. برای شاخص روغن‌رسانی ۴ یعنی جدایش کامل بین سطوح بیرینگ به وسیله روانکار اتفاق افتاده است. برای شاخص روغن‌رسانی بزرگ‌تر از ۴ به دلیل ایجاد اصطکاک معمولاً پیشنهاد نمی‌شود مگر اینکه دستگاه بارگذاری ضربه‌ای و خاموش و روشن کردن متناوب داشته باشد که در این مورد شاخص روغن‌رسانی تا عدد ۶ هم مانعی ندارد. برای شاخص روغن‌رسانی کمتر از ۱ شرایط بیرینگ به نحوی است که جدایش کامل نداریم و رژیم روان کاری مخلوط و مرزی است و در این حالت، استفاده از افزودنی‌های AW و EP توصیه می‌شود.

افزودنی‌های EP روغن شامل ترکیبات مولکولی هستند که با سطوح فلزی در شرایط اصطکاک زیاد واکنش نشان می‌دهند و تشکیل لایه تبدیلی ناشی از واکنش شیمیایی بین ترکیب پایه اکتیو و سطح فلز و تشدید فعالیت بر اثر گرما را می‌دهند که مانع از جوش خوردگی و آسیب سطوح فلزی درگیر به هم می‌شود. در اثر درگیری و ضربه مداوم قطعات به یکدیگر به دلیل شرایط بارگذاری و سرعت‌های کم در حین کار، دما بالا می‌رود که باعث فعال شدن این افزودنی‌ها می‌شود و در صورت کاربرد صحیح، توانایی سیال روانکاری را برای دفع ضربات بهبود می‌بخشد و در نتیجه باعث طول عمر بیشتر قطعات می‌شود. مرجع SKF توصیه می‌کند اگر شاخص روغن‌رسانی کمتر از ۱ باشد استفاده از این نوع افزودنی‌ها برای جلوگیری از صدمه بیرینگ، ضروری است. در حالتی که شاخص روغن‌رسانی کمتر از ۰/۱ می‌باشد بیرینگ در رژیم روانکاری مرزی کار می‌کند و باید ویسکوزیته روانکار درست انتخاب شود و شرایطی مانند خنک کاری و شاخص گرانروی بالا علاوه بر افزودنی‌های مورد نیاز در نظر گرفته شود.

شاخص روغن‌رسانی مطابق رابطه (۷) از حاصل تقسیم ویسکوزیته سینماتیک عملکردی یا حقیقی روغن (V) بر حداقل ویسکوزیته نامی (V_1) آن که براساس نمودار وابسته به قطر متوسط، دور کاری معمول و دمای کاری و روابط ارائه شده در استاندارد ایزو ۲۸۱ است تعیین و محاسبه می‌گردد. به منظور تشکیل یک فیلم روان کننده مناسب بین

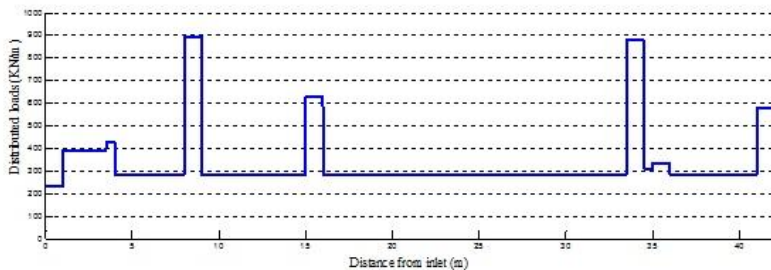
¹ Viscosity ratio

سطوح تماس ساچمه و کنس‌های داخلی و خارجی، روان کننده باید هنگامی که روان کننده در دمای کار است، حداقل ویسکوزیته خاصی را حفظ کند [۱۹].

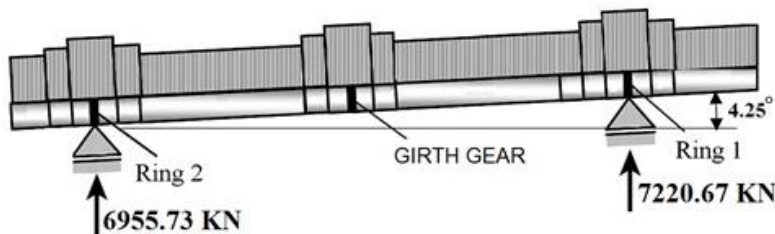
$$\kappa = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (7)$$

محاسبه توزیع بار در کوره دوار

به منظور محاسبه بار وارد به بیرینگ‌ها، نحوه بارگذاری در کوره دوار باید بررسی و محاسبه گردد. برای این کار با فرض صلب بودن، تراز بودن و نبود هیچ گونه نیروی آنبالانسی دینامیکی در کوره دوار، بارگذاری شامل وزن پوسته‌های مختلف کوره در طول آن، وزن ادوات کوره (شامل تایرها (رینگ‌ها)، چرخ دنده اصلی، هود و ...) مطابق نقشه سازنده، وزن آجرها و جرم‌های نسوز در نقاط مختلف مطابق نقشه نسوزکاری، میزان جرم چانک (کوتینگ) (با فرض ۱۰ سانتی‌متر) و میزان تغذیه گندله ورودی به میزان ۶ درصد با مشخصات سازنده نظیر چگالی، ابعاد و ... بررسی گردید و نحوه بارگذاری و توزیع بار در طول کوره مطابق شکل ۱ محاسبه شد. در نهایت میزان نیروها بر روی ساپورت رولرها با نرم‌افزار LinPro۲۷ (نرم‌افزار برای محاسبه مسائل استاتیکی) مطابق شکل ۲ محاسبه گردید. نیروی محوری کوره ناشی از مؤلفه محوری نیروی وزن کوره به علت وجود شیب، نیروهای ناشی از موازی نبودن محورهای رینگ و ساپورت رولر، سایش رینگ یا ساپورت و ... ایجاد می‌گردد. در حالت عادی و نرمال فرض بر این است که فقط نیروی محوری ناشی از وزن کوره وجود داشته باشد که در بالانس محوری کوره طراحی به شکلی صورت می‌گیرد که غلطک‌های ساپورت رولر ۵۰ درصد و ۵۰ درصد باقی مانده را تراست هیدرولیکی جذب کند [۲۰].

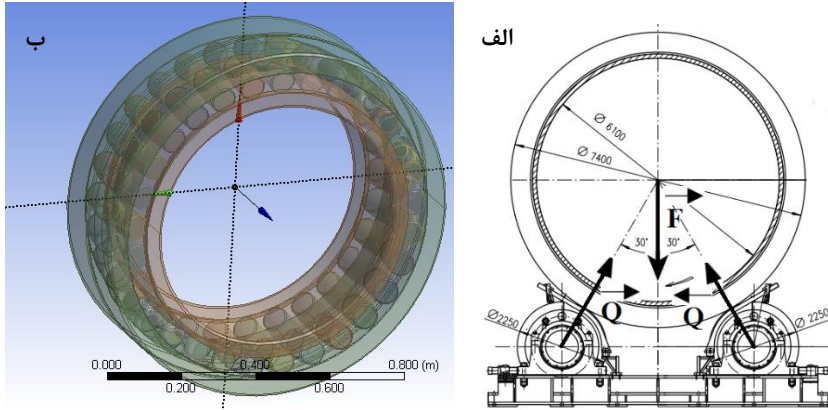


شکل ۱. شماتیک نحوه توزیع بار در طول کوره دوار.



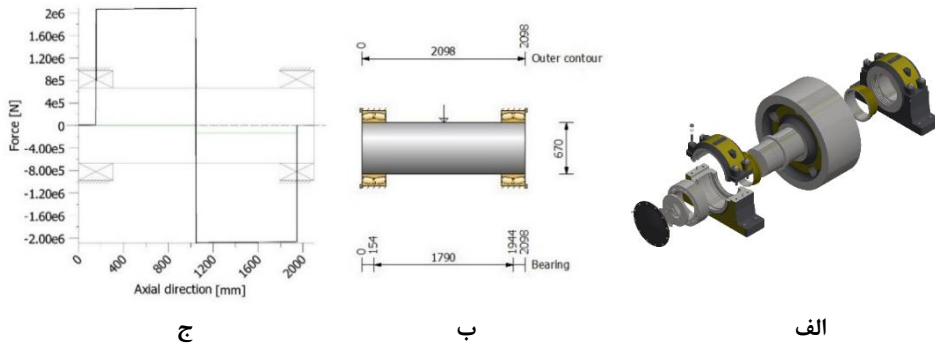
شکل ۲. مقدار بار نهایی به دست آمده در ساپورت رولرها.

پس از محاسبه توزیع بار و میزان نیرو در ساپورت‌ها، میزان نیروی شعاعی در هر ساپورت مطابق رابطه (۸) و براساس شکل ۳ به‌دست می‌آید [۲۱]. در نهایت مقدار نیرو و نحوه توزیع بار در بیرینگ‌ها به‌صورت شکل ۴ خلاصه می‌شود.



شکل ۳. الف) شماتیک تعادل نیرویی در ساپورت رولرها. ب) نمای ۳ بعدی بیرینگ ساپورت رولرها.

$$Q = \frac{F}{2 \cos 30^\circ} \quad (۸)$$

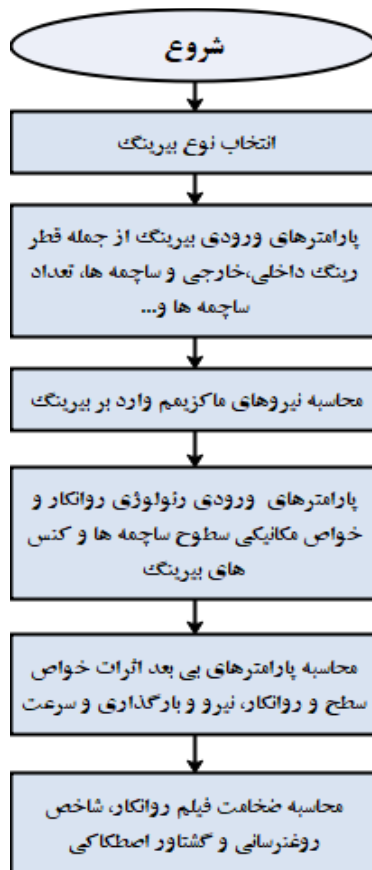


شکل ۴. الف) مدلسازی ساپورت رولر و بیرینگ‌ها. ب) قیود بارگذاری در ساپورت رولر. ج) توزیع بار در بیرینگ‌ها.

نیروی کلی وارد بر بیرینگ‌های بشکه‌ای از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$\begin{cases} P = F_r + Y_1 \cdot F_a & \text{for } F_a/F_r \leq e \\ P = 0.67 \cdot F_r + Y_2 \cdot F_a & \text{for } F_a/F_r > e \end{cases} \quad (۹)$$

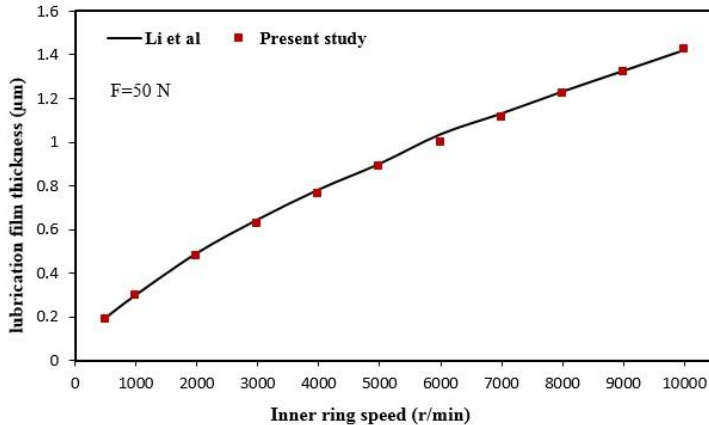
مقادیر Y_1 و Y_2 و e بسته به نوع بیرینگ در جداول استاندارد FAG موجود می باشد. در مطالعه حاضر محاسبه حداقل ضخامت فیلم روان کار با اعمال حداکثر بار وارد بر بیرینگ و شرایط روان کاری کامل و با فرض نبود فقر روان کار در محدوده تماس بررسی شده است. روند محاسبات مطابق فلوجارت شکل ۵ خلاصه می گردد.



شکل ۵. فلوجارت تخمین ضخامت فیلم روان کار، شاخص روغنرسانی و گشتاور اصطکاکی در رولر بیرینگ.

اعتبارسنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل سازی مطالعه موجود، نتایج به دست آمده با نتایج مرجع [۲۳] مقایسه شده است. در شکل ۶ مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۲۳] قابل مشاهده است که حاکی از توافق مناسب نتایج برای محاسبه ضخامت فیلم روان کاری است.



شکل ۶. مقایسه نتایج ضخامت فیلم روغن مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۲۳].

پس از اطمینان از نتایج صحت‌سنجی برای بررسی محاسبات مسئله پژوهش حاضر که با استفاده از روان‌کار (گریس) دارای مشخصات مطابق جدول ۱ و بیرینگ با کد FAG SN۰۰۱۵۲۴۰/۶۷۰ B-MB مطابق با مشخصات جدول ۲ که در کاتالوگ شفلر موجود می‌باشد، نیاز به تعیین شرایط مرزی و میزان نیروی وارد به بیرینگ‌ها می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات گریس مورد استفاده در رولر بیرینگ‌ها.

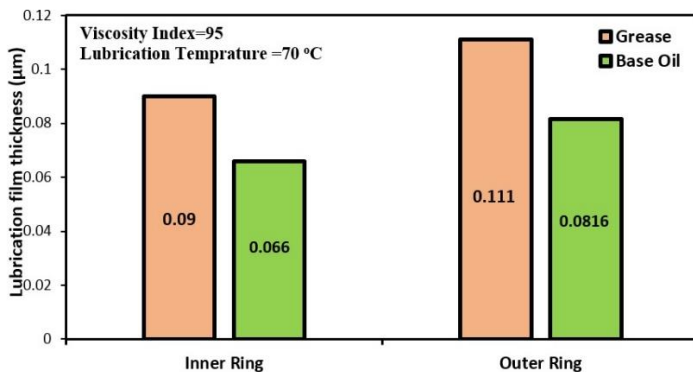
نوع قوام دهنده	لیتیم کمپلکس
درجه NLGI	۲
میزان نفوذ پذیری (۱۰ - ۱ mm)	۲۸۶
ویسکوزیته روغن پایه (cSt) @ ۴۰°C	۱۰۰۰
ویسکوزیته روغن پایه (cSt) @ ۱۰۰°C	۵۰
درصد حجمی قوام دهنده (%)	۱۸.۴
درصد حجمی پرکن مولیبدن دی سولفید (%)	۳

جدول ۲. مشخصات بیرینگ مورد استفاده در ساپورت رولرهای کوره دوار.

کد بیرینگ	FAG SN۰۰۱۵۲۴۰/۶۷۰ B-MB
بار استاتیک اصلی (KN)	۲۰۵۰۰
قطر کنس داخلی (mm)	۶۷۰
قطر کنس خارجی (mm)	۹۸۰
تعداد ردیف	۲
ضریب الاستیسیته (Pa)	۲*۱۰ ^{۱۱}
تعداد ساچمه	۲۹
قطر ساچمه (mm)	۶۲

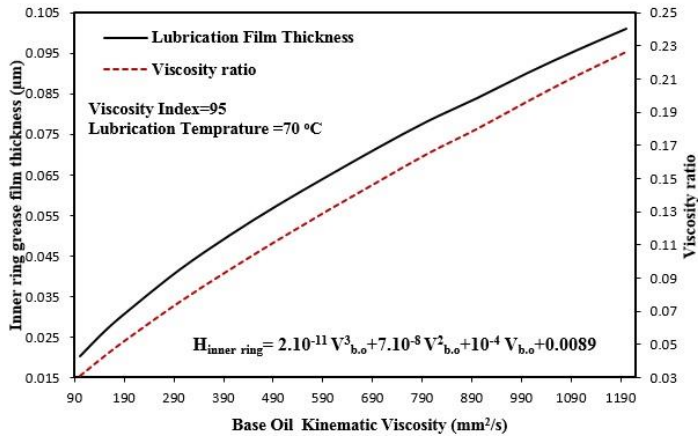
تحلیل پارامتری ضخامت فیلم روانکاری

براساس نتایج قابل مشاهده در شکل ۷، ضخامت فیلم گریس نسبت به روغن پایه حدود ۳۶ درصد بیشتر است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی مختلف، بسته به نوع گریس و قوام‌دهنده درخصوص درصد افزایش ضخامت فیلم گریس به فیلم روغن پایه اعداد مختلفی را ثبت کرده‌اند؛ برای مثال در مرجع [۱۸] افزایش ضخامت گریس پایه لیتیم کمپلکس (مشابه قوام‌دهنده گریس مطالعه حاضر) ۳۹.۱ گزارش گردیده است.



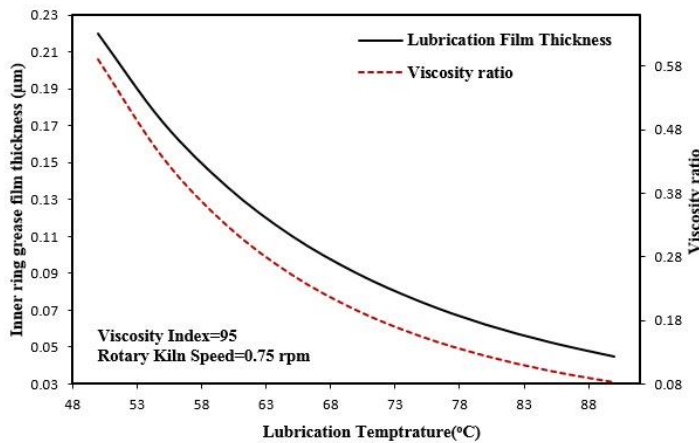
شکل ۷. مقایسه ضخامت فیلم روغن و گریس تشکیل شده در کنس‌های داخلی و خارجی.

ویسکوزیته مشخصه مکانیکی روان کار است که با ایجاد اصطکاک بین زنجیره‌های مولکولی تشکیل دهنده ساختار شیمیایی روان کار و میزان حرکت آنها در پاسخ به آن می‌باشد. هرچه میزان ویسکوزیته بیشتر و نیروی بین مولکولی آن قوی‌تر باشد ضخامت فیلم روان کار بیشتر و دارای استحکام بیشتری خواهد بود. شکل ۸ نشان می‌دهد با افزایش ویسکوزیته روغن پایه، میزان ضخامت فیلم گریس به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند؛ به‌طوری که با افزایش مقدار ویسکوزیته روغن پایه از ۱۵۰ سانتی‌استوک به ۱۰۰۰ سانتی‌استوک ضخامت فیلم روانکار ۲۳۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین میزان شاخص روغن‌رسانی که با ویسکوزیته رابطه مستقیم دارد افزایش پیدا می‌کند. از طرفی با توجه به اینکه میزان شاخص روغن‌رسانی کمتر از ۱ می‌باشد، استفاده از گریس با ویسکوزیته روغن پایه زیر ۱۰۰۰ سانتی‌استوک توجهی ندارد و قطعاً استفاده از افزودنی‌های فشارپذیری (EP) و پرکن‌های جامد نظیر گرافیت یا مولیبدن دی سولفاید برای کمک به تشکیل فیلم روان کار، ضروری است.

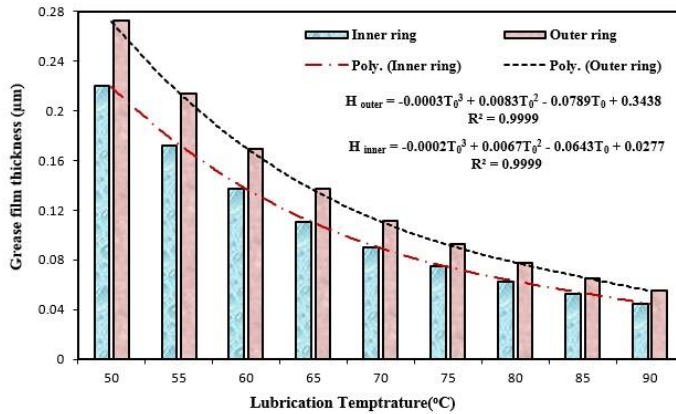


شکل ۸. نمودار تغییرات ضخامت فیلم روان کار با تغییرات ویسکوزیته روغن پایه.

شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که با افزایش دمای روان کار به دلیل کم شدن نیروی بین مولکولی روغن، میزان ویسکوزیته روغن پایه کم می‌شود. از آنجایی که ویسکوزیته، عامل اصلی تشکیل فیلم روان کار می‌باشد؛ این عامل سبب می‌شود ضخامت فیلم روانکار در کنس‌های داخلی و خارجی و میزان شاخص روغن‌رسانی کاهش پیدا کند. گریس‌ها به دلیل اینکه مانند روغن جریان ندارند و این عامل باعث می‌شود حرارت به بیرون منتقل نشود؛ از این رو افزایش دما و ایجاد حرارت سبب ایجاد شرایط اکسیداسیون روغن پایه و گریس خواهد شد و در نهایت به بیرینگ آسیب می‌رساند.

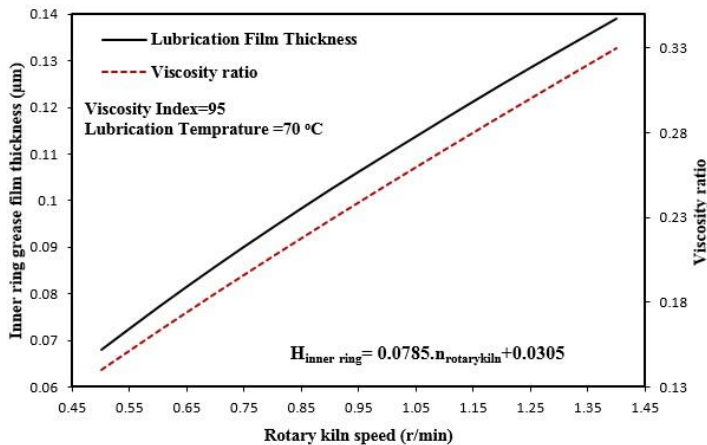


شکل ۹. نمودار تغییرات ضخامت فیلم روان کار با تغییرات دمای روغن پایه.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات ضخامت فیلم روان کار در کنس‌های داخلی و خارجی با تغییرات دمای روغن پایه.

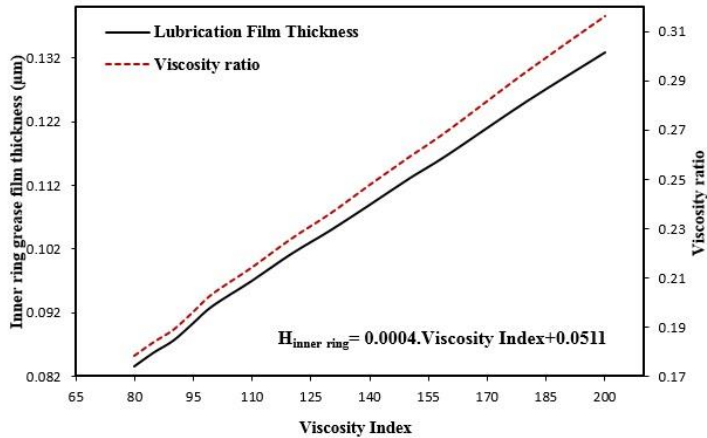
افزایش سرعت کوره دوار موجب افزایش سرعت بیرینگ می‌شود و این عامل مطابق شکل ۱۱ به صورت خطی سبب افزایش ضخامت فیلم روان کار می‌شود. دلیل این امر این است با افزایش سرعت، تلاطم جریان بیشتر و جریان بیشتری به فضای تماس وارد می‌شود و منجر به افزایش ضخامت می‌گردد. البته در سرعت‌های بسیار زیاد، انتخاب اشتباه روان کار ممکن است به علت نیروی گریز از مرکز سبب پخش و جدا شدن روان کار از بیرینگ و ایجاد شرایط فقر روان کاری گردد. همچنین با افزایش سرعت، میزان حداقل ویسکوزیته مورد نیاز بیرینگ مطابق استاندارد ایزو ۲۸۱ کاهش و در نتیجه شاخص روغن‌رسانی افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات ضخامت فیلم روان کار با تغییرات سرعت کوره دوار.

افزایش شاخص گرانروی به عنوان پارامتری که حساسیت ویسکوزیته روان کار به دما را نشان می‌دهد سبب می‌شود در دماهای کاری ویسکوزیته روغن پایه تغییرات کمی پیدا کند و همین موضوع مطابق شکل ۱۲ سبب افزایش

ضخامت فیلم روان کار و شاخص روغن رسانی می‌گردد؛ برای مثال با افزایش شاخص گرانروی از ۹۵ به ۱۲۰ میزان ضخامت فیلم روان کار حدود ۱۲/۵ درصد افزایش می‌یابد.



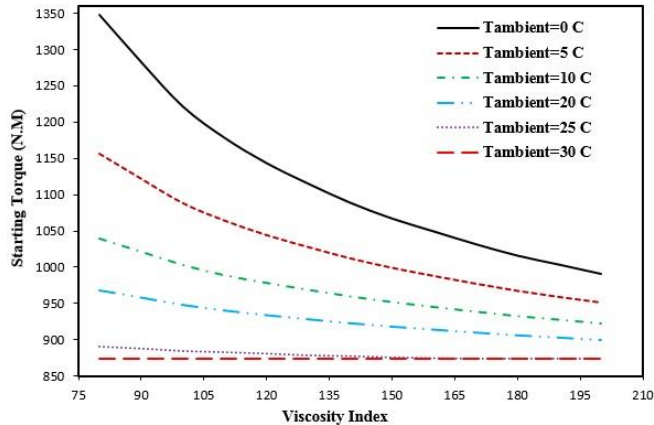
شکل ۱۲. نمودار تغییرات ضخامت فیلم روان کار با تغییرات شاخص گرانروی روغن پایه.

گشتاور استارت بیرینگ به‌عنوان گشتاوری تعریف می‌شود که برای شروع چرخش باید توسط یاتاقان در دمای محیط بر اصطکاک که از نیروهای وارد بر بیرینگ و روانکار ناشی می‌شود، غلبه کند. اصطکاک همواره به هر میزانی، مقاوم به حرکت و سبب اتلاف انرژی می‌شود. گشتاور استارت در بیرینگ‌ها ناشی از چندین عامل می‌باشد که مهم‌ترین عوامل در تعیین آن گشتاور ناشی از اصطکاک روانکار (M_f) و گشتاور ناشی از بارهای وارد بر بیرینگ است (M_l) [۲۴].

$$M_{start,tot} = M_f + M_l$$

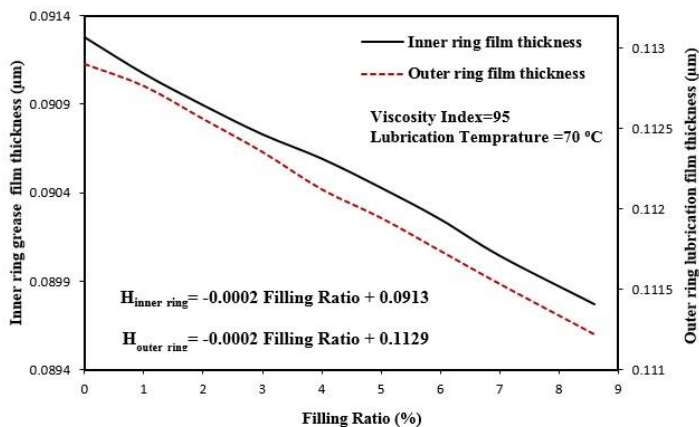
نحوه محاسبه مقادیر M_f و M_l در مرجع [۲۴] به‌خوبی توضیح داده شده است. در واقع گشتاور استارت بالا علاوه بر اینکه موجب آسیب جدی به بیرینگ می‌شود، سبب تلفات زیاد انرژی نیز می‌شود، در این خصوص استفاده از تکنولوژی‌های جدید و مواد اولیه بهتر و سازگار با محیط زیست، از مواردی است که باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود [۲۵؛ ۲۶] ولی در بسیاری از موارد نیز می‌توان با بهینه کردن شرایط تجهیز نظیر بحث روان کاری، اصطکاک و گرما و در نتیجه میزان مصرف انرژی را بهینه کرد.

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با کاهش دمای محیط، میزان گشتاور راه‌اندازی بیشتر می‌شود، دلیل این امر افزایش قابل توجه گرانروی روغن پایه در دماهای محیطی پایین است. همچنین وقتی روغن پایه ویسکوزتر شود؛ میزان تراوش روغن گریس کمتر و در نتیجه فقر روان کاری و کاهش عمر بیرینگ به‌وجود می‌آید. راه‌حل این مشکل استفاده از روغن پایه با شاخص ویسکوزیته بالاتر می‌باشد که میزان گشتاور استارت را مطابق شکل ۱۳ به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.



شکل ۱۳. نمودار تغییرات گشتاور اولیه وارد بر بیرینگ با تغییرات شاخص دمای محیط و شاخص گرانیوی روغن پایه.

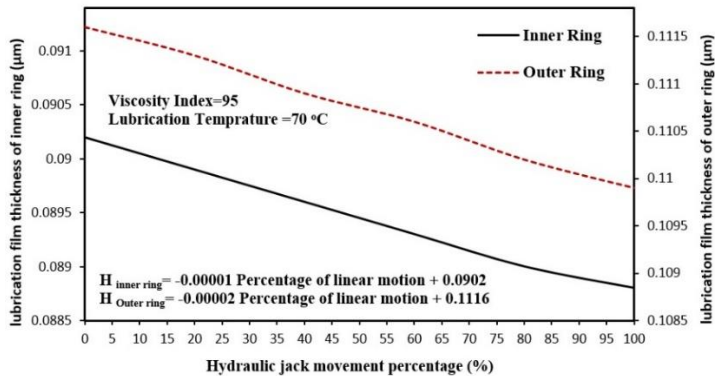
با افزایش درصد فید ورودی (گندله سنگ آهن) میزان بار وارد بر بیرینگ‌ها نیز تغییر می‌کند و این موضوع مطابق شکل ۱۴ سبب تغییر در میزان ضخامت فیلم روان کار در بیرینگ می‌شود. هرچند که تأثیر آن در ایجاد نیرو و در نتیجه تغییر شرایط روانکاری چندان بالا نیست. عواملی نظیر: تراز نبودن کوره، هم‌محور نبودن ساپورت رولر و تایر، سایس و ایجاد نیروی محوری زیاد علاوه بر تغییر اساسی و ایجاد تنش در بیرینگ سبب برهم‌زدن تعادل شرایط روان کاری و فقر و کاهش ضخامت فیلم روان کار می‌شود.



شکل ۱۴. نمودار تغییرات ضخامت فیلم روان کار با درصد فید (گندله) ورودی به کوره دوار.

حرکت خطی کوره دوار با توجه به میزان انبساط طولی پوسته کوره در دمای بهره‌برداری و سایز ساپورت رولرها محاسبه می‌شود. در واقع هدف این است که در طول زمان بهره‌برداری، رینگ (تایر) و ساپورت رولر در یک سطح معین روی هم حرکت نکنند. شکل‌گیری این حرکت سبب ایجاد پله و به تبع تماس نقطه‌ای تایر و ساپورت رولر می‌شود که در نهایت سبب افزایش نیرو، فشار شدید و در نهایت شکست بیرینگ می‌شود. در واقع حرکت خطی کوره برای ایجاد

نشدن پله در روی سطوح است. وقتی جک هیدرولیک آزاد می‌شود، این موضوع روی نیروی محوری تأثیر می‌گذارد. در واقع با آزاد شدن جک هیدرولیک نیروی محوری می‌تواند از ۵۰ درصدی که توسط جک هیدرولیک تحمل شود تا ۱۰۰ درصد بر بیرینگ‌ها تأثیر بگذارد که اثر این موضوع بر ضخامت فیلم روان‌کار در کنس‌های داخلی و خارجی در نمودار شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



شکل ۱۵. نمودار تغییرات ضخامت فیلم روان‌کار با درصد حرکت خطی جک هیدرولیک.

نتیجه‌گیری

گزارش آماری نشان می‌دهد درصد بالایی از خرابی تجهیزات دوار ناشی از خرابی بیرینگ‌هاست که خرابی ناشی از مشکلات روان‌کاری در صدر آنهاست. ضخامت فیلم روان‌کار از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد بیرینگ‌هاست. در مطالعه حاضر به‌صورت تئوری با استفاده از نرم‌افزار متلب پس از محاسبه و بررسی کامل توزیع بار در طول کوره دوار به محاسبه ضخامت فیلم روان‌کار (روغن پایه و گریس) در بیرینگ‌های ساپورت رولر کوره دوار مجتمع گندله‌سازی فولاد بوتیای ایرانیان که مهم‌ترین تجهیز در کارخانه گندله‌سازی محسوب می‌شود، پرداخته شد و در مورد تأثیر پارامترهای مختلف نظیر سرعت کوره، دمای عملیاتی روان‌کار، حجم گندله ورودی به کوره، درصد حرکت خطی جک هیدرولیک، ویسکوزیته روغن پایه گریس و شاخص گرانیوی روغن پایه بر عملکرد روان‌کاری مباحثی طرح گردید. در نهایت تأثیر شرایط محیطی و روغن پایه گریس بر میزان گشتاور استارت اولیه بیرینگ بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار ویسکوزیته روغن پایه از ۱۵۰ سانتی‌استوک به ۱۰۰۰ سانتی‌استوک ضخامت فیلم روان‌کار ۲۳۹ درصد افزایش پیدا می‌کند. با افزایش دمای روان‌کار، میزان ویسکوزیته روغن پایه کم می‌شود و این عامل سبب می‌شود ضخامت فیلم روان‌کار در کنس‌های داخلی و خارجی و میزان شاخص روغن‌رسانی کاهش پیدا کند. افزایش سرعت کوره دوار موجب افزایش سرعت بیرینگ می‌شود و این عامل به‌صورت خطی سبب افزایش ضخامت فیلم روان‌کار می‌شود. با کاهش دمای محیط، میزان گشتاور راه‌اندازی بیشتر می‌شود؛ دلیل این امر، افزایش قابل توجه گرانیوی روغن پایه در دماهای محیطی پایین است. همچنین با افزایش درصد فید ورودی (گندله سنگ آهن) میزان بار وارد بر بیرینگ‌ها نیز تغییر می‌کند که سبب تغییر در میزان ضخامت فیلم روان‌کار در بیرینگ می‌شود.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از حمایت‌های شرکت فولاد بوتیای ایرانیان در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را داریم.

References

- [1] Nguyen-Schäfer, H. (2016). *Computational design of rolling bearings*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27131-6>
- [2] Sibley, L. B., & Orcutt, F. K. (1961). Elasto-Hydrodynamic Lubrication of Rolling-Contact Surfaces. *A S L E Transactions*, 4(2), 234-249. <https://doi.org/10.1080/05698196108972435>
- [3] Dowson, D., & Higginson, G. R. (1966). *Elasto-hydrodynamic Lubrication: The Fundamentals of Roller and Gear Lubrication*. Pergamon Press. https://books.google.com/books/about/Elasto_hydrodynamic_Lubrication.html?id=HuMuAAAAIAAJ
- [4] Cann, P. M., & Lubrecht, A. A. (2003). The effect of transient loading on contact replenishment with lubricating greases. *Tribology Series*, 43, 745-750. [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(03\)80102-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(03)80102-5)
- [5] Morales-Espejel, G. E., Lugt, P. M., Pasaribu, H. R., & Cen, H. (2014). Film thickness in grease lubricated slow rotating rolling bearings. *Tribology International*, 74, 7-19. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.01.023>
- [6] Ward, P., Leveille, A., & Frantz, P. (2008, May 7-9). *Measuring the EHD film thickness in a rotating ball bearing*. 39th Aerospace Mechanisms Symposium, Huntsville, Alabama. https://www.semanticscholar.org/paper/Measuring-the-EHD-Film-Thickness-in-a-Rotating-Ball-Ward-Leveille/f3fba03aa539162ba97783788297045d109a_b49
- [7] Jablonka, K., Glovnea, R., & Bongaerts, J. (2018). Quantitative measurements of film thickness in a radially loaded deep-groove ball bearing. *Tribology International*, 119, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.11.001>
- [8] Wittek, E., Kriese, M., Tischmacher, H., Gattermann, S., Ponick, B., & Poll, G. (2010, September 6-8). *Capacitances and lubricant film thicknesses of motor bearings under different operating conditions*. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, Italy <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5608142>
- [9] Lugt, P. M., Velickov, S., & Tripp, J. H. (2009). On the Chaotic Behavior of Grease Lubrication in Rolling Bearings. *Tribology Transactions*, 52(5), 581-590. <https://doi.org/10.1040/2000902825713>
- [10] Zhou, Y., Bosman, R., & Lugt, P. M. (2019). An Experimental Study on Film Thickness in a Rolling Bearing for Fresh and Mechanically Aged Lubricating Greases. *Tribology Transactions*, 62(4), 557-566. <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1539202>
- [11] Zhang, X., Glovnea, R., Morales-Espejel, G. E., & Félix-Quinonez, A. (2020). The Effect of Working Parameters upon Elastohydrodynamic Film Thickness Under Periodic Load Variation. *Tribology Letters*, 68(2), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01303-y>
- [12] Kolivand, A., Li, S., & Zhang, Q. (2021). Modeling on contact fatigue under starved lubrication condition. *Meccanica*, 56(1), 211-225. <https://doi.org/10.1007/s11012-020-01284-1>
- [13] Hamrock, B. J. (1994). *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. McGraw-Hill. https://books.google.com/books/about/Fundamentals_of_Fluid_Film_Lubrication.html?id=7dpSAAAAMAAJ
- [14] Venner, C. H., & Lubrecht, A. A. (2000). *Multi-level methods in lubrication*. Elsevier. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=HQoIZFc_fQIC&oi=fnd&pg=PP

- [1&dq=Multilevel+Methods+in+Lubrication&ots=2EsqVG5fve&sig=o1lWRgeQ-LZYuRRa-V5ebGAPp2Q#v=onepage&q=Multilevel%20Methods%20in%20Lubrication&f=false](https://doi.org/10.1080/05698197208981427)
- [15] Grubin, A. N. (1949). Investigation of the contact of machine components. *Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering*, 337(1), 171-182. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573387449406177536>
- [16] Kauzlarich, J. J., & Greenwood, J. A. (1972). Elastohydrodynamic Lubrication With Herschel-Bulkley Model Greases. *A S L E Transactions*, 15(4), 269-277. <https://doi.org/10.1080/05698197208981427>
- [17] Dong, D., Komoriya, T., Endo, T., & Kimura, Y. (2009, September 6-11). *Formation of EHL Film with Grease in Ball Bearings at Low Speeds*. World Tribology Congress 2009, Kyoto, Japan. https://www.jstage.jst.go.jp/article/tribologist/57/8/57_57.08_568/article/-char/en
- [18] Cyriac, F., Lugt, P. M., Bosman, R., Padberg, C. J., & Venner, C. H. (2016). Effect of Thickener Particle Geometry and Concentration on the Grease EHL Film Thickness at Medium Speeds. *Tribology Letters*, 61(2), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11249-015-0633-z>
- [19] Organización Internacional de Normalización. (2007). *Rolling bearings: Dynamic load ratings and rating life* (ISO 281:2007). International Organization for Standardization. <https://www.iso.org/standard/38102.html>
- [20] Tatari, M. (2016). Mechanical inspection of rotary kiln. *Cement Technology Scientific Monthly journal*, 100(1), 14-26. <http://www.cementtechnology.ir/No.104.html>
- [21] Žiga, A., Karač, A., & Vukojević, D. (2013). Analytical and numerical stress analysis of the rotary kiln ring. *Tehnički vjesnik*, 20(6), 941-946. https://www.researchgate.net/profile/Alma-Ziga/publication/260660937_Analytical_and_Numerical_Stress_Analysis_of_The_Rotary_Kiln_Ring/links/5b9b90ad299bf13e602e6153/Analytical-and-Numerical-Stress-Analysis-of-The-Rotary-Kiln-Ring.pdf
- [22] SKF company. (2010). *SKF catalogue Rolling bearings*. SKF. <https://www.skf.com/groupproducts/rolling-bearings/errata/pages/rbc17000>
- [23] Li, J., Ma, Z., & Chen, W. (2016). Effects of oil film properties on roller bearing with light loads under various slip factors. *Vibroengineering Procedia*, 10, 392-397. <https://www.extrica.com/article/17836>
- [24] Harris, T. A., & Kotzalas, M. N. (2006). *Rolling Bearing Analysis-2 Volume Set* (5 ed.). Crc Press. <https://www.amazon.com/Rolling-Bearing-Analysis-Fifth-Edition/dp/0849381673>
- [25] Farahmand, S., Habibi, A., & Mohammadi, M. (2018). Waste Cooking Oil Conversion to the Biofuel. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 15(2), 67-78. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100524_21a5089f7946dae4bd6c73b64f6245c5.pdf
- [26] Hassani Khorshidi, F., Azizi, M., Zare Hossein Abadi, H., & Faezipour, M. (2020). Identification and Explanation of Cleaner Production Indicators and Solutions in Medium Density Fiberboard (MDF) Factory. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(2), 65-79. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.119213>