



ارزیابی رفتار سایشی بر ریزساختار و مشخصات مکانیکی یاتاقان کشویی هیدرودینامیکی

محسن قدیانی^{1*}، ولی انجیلالی²

1- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یادگار امام (ره) شهرری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

* عهده دار مکاتبات، تهران، صندوق پستی: 1815163111، m.ghadyani@srbiau.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 مهر 1399

داوری اولیه: 15 فروردین 1400

پذیرش: 25 اردیبهشت 1400

کلیدواژگان:

روان کاری هیدرودینامیکی

تابع شکاف

نانوذرات

روش اجزای محدود

این یک واقعیت است که شکل تابع شکاف یاتاقان یکی از اجزای مهم طراحی است. از سوی دیگر، بررسی‌های تجربی حاکی از آن است که یاتاقان‌های با صفحات ناهموار و یا دارای انحناء، عملکرد هیدرودینامیکی بهتری دارند. بنابراین در مقاله حاضر اثرات عملکرد تابع شکاف نمایی به عنوان شکاف یاتاقان کشویی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ابتدا فرمول‌بندی جدیدی از یک یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی تحلیل شده است و سپس با توجه به سایش در سطح یاتاقان و تغییر هندسی سطح به سطحی انحنادار، یک یاتاقان با سطح سایش یافته، مورد تحلیل قرار گرفته است. معادلات حاکم با استفاده از روش اجزای محدود حل شده و نتایج مربوطه حاصل شده‌اند. همچنین ذرات آزاد شده از سایش یاتاقان به صورت افزودن نانوذره به سیال روغن در نظر گرفته شده و مورد تحلیل قرار گرفته است. داده‌های تحلیل حاضر نشان می‌دهد بدون در نظر گرفتن نانو ذرات جامد، نیروی ظرفیت تحمل بار در یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی 3/1 درصد نسبت به شکاف خطی بهینه افزایش نشان می‌دهد. همچنین تحلیل نقش نانوذرات نشان داده است که ظرفیت تحمل بار یاتاقان کشویی اگر درصد حجمی نانوذرات به 2% برسد در مقایسه با نتایج عملکرد شکاف خطی بهینه تا 13/1 درصد افزایش را نشان می‌دهد.

Evaluation of the wear behavior on nanostructure and mechanical characteristics of hydrodynamic sliding bearings

Mohsen Ghadyani^{1*}, Vali Enjilela²

1- Department of Mechanical Engineering, Yadegar - e- Imam Khomeini (RAH) Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Karaj branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

* P.O.B. 1815163111 Tehran, Iran, m.ghadyani@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 20 October 2020
First Decision: 4 April 2021
Accepted: 15 May 2021

Keywords:

Hydrodynamic lubrication
Gap function
Nanoparticles
Finite element method

Abstract

It is a fact that the shape of the bearing's gap is one of the important elements of design. Also, experimental studies have shown that bearings with curved or rugged plates have better hydrodynamic performance. In the present paper, the effects of exponential gap-function as the sliding bearing's gap have been studied on the bearing performance. For this purpose, new formulations of sliding bearing with a linear gap function have been developed. Then eroded slider bearing (since erosion provides curved surface) has been simulated. The governing equations are solved using the Finite Element Method (FEM) and the results have been presented. Besides, erosion adds debris to the oil which is simulated as additive nanoparticles in this study. The results of this analysis show that without considering solid nanoparticles, the load-bearing capacity force in the sliding bearing with exponential gap function increases 3.1% compared to the optimal linear gap. Furthermore, the nanoparticles analysis has shown that if the volume percentage of nanoparticles reaches 2%, the load-bearing capacity of sliding bearings shows an increase up to 13.1% compared to the optimal linear gap.

1- مقدمه

روکش کاری شده پرداخته‌اند [1]. معرف و ربیعی‌زاده ضمن بررسی رفتار سایشی و خواص تریبولوژیکی مس نشان دادند که فرآوری اصطکاکی اغتشاشی باعث کاهش ضریب اصطکاک تا حدود 48 درصد نسبت به فلز پایه می‌شود [2]. حاجیان نیا و همکاران [3] رفتار سایشی حاصل از عملیات حرارتی مختلف در یک فولاد کم آلیاژ با استحکام بالا را مورد بررسی قرار دادند. تقی‌پور به بررسی تجربی عملکرد ضد سایشی نانو روان کارها در

روان کاری و استفاده از یاتاقان‌ها در صنایع پیشرفته امروزی نقش بسیار حساس و مهمی به خود اختصاص داده است. رشد روز افزون دانش بشری باعث توجه بسیاری از محققان علم روان کاری به بهبود یاتاقان‌های هیدرودینامیکی شده است و در سال‌های اخیر محققان، توجه زیادی به موضوع سایش داشته‌اند. برمکی و امینی به بررسی رفتار سایشی فولاد ساده کربنی

Please cite this article using:

M. Ghadyani, V. Enjilela, Evaluation of the wear behavior on nanostructure and mechanical characteristics of hydrodynamic sliding bearings, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 20- 34, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

یک سطح تخت عریض بر روی یک سطح کمی شیبدار کشیده می‌شود، روغن، به دلیل لزجت و مقاومتش در برابر جریان (ویسکوزیته)، به صفحات لغزنده یاتاقان می‌چسبد و با حرکت کشویی، فیلم گوه‌شکل روغن به فضای بین سطوح یاتاقان کشیده می‌شود [6]. رینولدز همچنین نشان داد که مکانیزم گوه‌شکل فیلم روان کار یک توزیع فشار به وجود می‌آورد که موقعیت حداکثر فشار، کمی جلوتر از مرکز صفحات در جهت حرکت است. این توزیع فشار می‌تواند از حل معادله رینولدز تعیین شود [6، 7]. حل‌های معادله رینولدز برای وضعیت‌های واقعی یاتاقان معمولاً به شکل تقریب عددی به دست می‌آیند و توزیع فشار توسط حل معادله رینولدز با روش‌های عددی قابل استخراج می‌باشد [8]. روان کاری هیدرودینامیکی، روان کاری مخلوط و روان کاری مرزی به‌عنوان سه محدوده برای یاتاقان‌ها شناخته می‌شود و تغییر محدوده روان کاری از روان کاری هیدرودینامیکی به روان کاری مخلوط و یا مرزی با پایش شرایط روان کاری به دست می‌آید [9]. یک یاتاقان روان کاری شونده هیدرودینامیکی، یاتاقانی است که ظرفیت حمل بار را به واسطه حرکت نسبی دو سطح جدا شونده توسط فیلم سیال به وجود می‌آورد. هندسه فیلم سیال روان کار در یاتاقان، نقش مهمی برای تحمل نیرو، کنترل حرکت غیر بالانس، و ارتعاشات شافت‌ها دارد.

حل معادله رینولدز برای وضعیت‌های مختلف یاتاقان کشویی در تئوری یاتاقان‌های کف‌گرد نیز استفاده می‌شود. در این تئوری‌ها معمولاً تابع شکل فیلم روغن به عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود، و بهینه‌سازی فیلم سیال، براساس بیشینه کردن ظرفیت تحمل بار و کمینه کردن نیروهای اصطکاک در یاتاقان صورت می‌گیرد. با لحاظ کردن متغیرهایی مثل طول یاتاقان و نسبت لقی و دمای اولیه روان کار، سعی در بهینه‌سازی تابع هدف می‌شود. کمترین ضخامت لایه روغن، توان اصطکاکی و دما به‌ازای مقادیر خاصی از متغیرها برحسب لقی رسم می‌شود و میزان بهینه لقی به دست می‌آید [10]. در زمینه یاتاقان‌ها تحقیقات زیادی انجام شده‌است تا بتوان ظرفیت حمل بار آنها را افزایش و ضریب اصطکاک را کاهش داد. زابو و همکارانش [11] نشان دادند برای وجود فیلم روان کار، تابع شکاف باید به صورت یکنواخت کاهش یابد به طوری که یک شکاف باریک شونده بین صفحات لغزنده در جهت حرکت نسبی به وجود آید. بررسی‌های تجربی حاکی از آن است که اگر در یاتاقانی یکی از صفحات، ناهموار باشد عملکرد هیدرودینامیکی آن بهبود می‌یابد. معمولاً این ناهمواری‌ها با ایجاد حفره یا برآمدگی‌های ریز روی سطوح

ماشین‌آلات با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی پرداخته است [4]. در میان روش‌های عددی برای تحلیل مسائل، روش اجزای محدود دارای مزایای بیشتری در هندسه‌های نامنظم است، بر همین اساس برخی محققان بعد از شبیه‌سازی عددی مدل اجزای محدود با انجام آزمایش‌های تجربی صحت‌گذاری می‌کنند [5]. بسیاری از نیروهایی که توسط ماشین‌های چرخشی تحمل می‌شوند، مؤلفه‌هایی دارند که در امتداد جهت طول محور اصلی اعمال می‌شوند. این بارهای کف‌گرد عموماً توسط یاتاقان‌های هیدرودینامیکی نمایش داده شده در شکل 1 تحمل می‌شوند. صفحه کف‌گرد می‌تواند قسمتی متصل شده به محور دوار باشد که توسط فیلم روان کار از المان‌های قطعی یاتاقان، جدا نگهداشته می‌شود. گاهی نیز صفحه کف‌گرد، قسمتی از خود محور چرخنده است. ظرفیت تحمل بار این یاتاقان از برآیند نیروهای فشاری تولید شده توسط مجموع یاتاقان‌های کشویی محاسبه می‌شود.

یاتاقان‌های کشویی مطابق شکل 2 شامل دو صفحه تماس هستند که یکی از این صفحات با سرعت نسبی U حرکت می‌کند. فرض می‌شود که شکاف بین صفحات لغزنده با روان کار پر شده‌است. در حالتی که شکاف بطور کامل با روان کار پر شود (حالت اصطکاک سیالی) صفحات با یکدیگر در تماس نیستند.

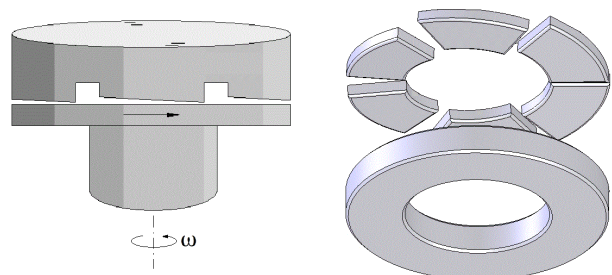


Fig. 1 The thrust hydrodynamic bearing

شکل 1 یاتاقان هیدرودینامیکی کف‌گرد

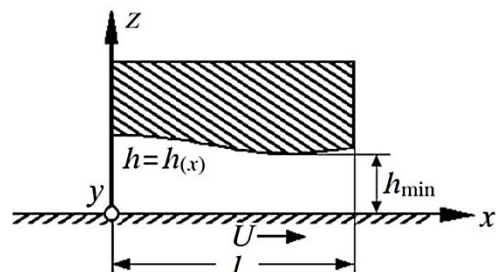


Fig. 2 Sliding bearing

شکل 2 یاتاقان کشویی

آزبورن رینولدز نشان داد که در صورت وجود روغن، وقتی

می‌کند. معادله انیشتین که در 1952 به‌وسیله برینکمن [21] توسعه داده شد، اساس مدل دیگری قرار گرفت و امروزه مدل برینکمن نامیده می‌شود. علاوه بر این، زمانی که به سیال پایه، درصدی از نانوذرات اضافه می‌شود از مدل دیگری به نام بکلر [22] برای محاسبه ضریب لزجت استفاده می‌گردد.

بر اساس داده‌های آزمایشگاهی مفید، برخی از مدل‌های نظری تصحیح شده‌اند [23، 24] یا مدل‌های جدید تجربی پیشنهاد شده‌اند تا مقادیر دقیق‌تری از خصوصیات ترموفیزیکی برای نانوسیالات ارائه دهند [25، 26]. برخی از کارهایی که می‌توان در زمینه نانو سیال در یاتاقان‌ها به آن اشاره نمود عبارت است از پژوهش بریکی و نوسونوویسکی [27] که با استفاده از مدل انیشتین برای نانو سیال، جریان در یاتاقان را مورد مطالعه قرار دادند. رازاک و همکاران [28] اثر افزودن نانو رس در روغن پالم را در روغن کاری یاتاقان ژورنال مورد مطالعه قرار دادند. نالام و همکاران [29] تأثیر زبری در مقیاس نانو را بر روان کاری مورد بررسی قرار دادند. سعدآبادی و صنعتی نژاد [30] عملکرد نانوسیال در بهبود یاتاقان‌های ژورنال در ماشین‌های سنگین را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که تقریباً 20 درصد ظرفیت حمل بار در کسر وزنی 5 درصد در نانوسیال روغن- WS_2 افزوده می‌شود. همچنین می‌توان به کارهای عبدالله و همکاران [31] و دولت آبادی و همکاران [32] اشاره نمود که نانو سیال‌ها را در یاتاقان‌ها مورد بررسی قرار دادند.

با مرور بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه عملکرد یاتاقان‌های کشویی ملاحظه می‌گردد که تاکنون اثر برخی پارامترهای مهم از جمله نقش نانوذرات ناشی از سایش و انحناء سطح مورد بررسی توأمان قرار نگرفته‌است. در بیشتر تحلیل‌های صورت گرفته یاتاقان کشویی با شیب ثابت در نظر گرفته شده است در صورتی که در حالت سایش واقعی این شیب به‌صورت انحناء دار است. با توجه به وجود سایش در سطح یاتاقان و تغییر هندسه سطح به سطحی انحناء دار، در پژوهش حاضر به‌منظور مطالعه دقیق‌تر، از یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی، برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. به‌علاوه، به‌منظور بررسی نقش سایش در این تحقیق، از مدل‌های ریزساختار نظری و یک مدل تجربی استفاده شده‌است و مسأله روان کاری یاتاقان‌های کشویی هیدرودینامیکی با اعمال تغییرات ضریب لزجت ناشی از ورود نانوذرات ناشی از سایش یاتاقان در فیلم روان کار، تحلیل می‌شود. در ادامه، تأثیر افزایش یک تا سه درصد ذرات جامد نانو به سیال روان کار پایه، بر مقدار بهبود ظرفیت تحمل بار یاتاقان، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

داخلی یاتاقان به‌وجود می‌آید [12]. راشد در سال 1988 نیز با بررسی اثر تموج سطحی به‌صورت حل عددی نشان داده است ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌ها افزایش می‌یابد [13]. قربانی و موحدی به مطالعه اثر انحناهای سطح بر تغییر نیروهای فرزندکاری پرداختند [14]. در سال 2012 بررسی اثر ترکیب پارامترهای زبری سطوح، حرارت و اینرسی بر مشخصه‌های یاتاقان هیدرودینامیکی توسط پراساد و همکارانش صورت گرفت [15]. در این پژوهش معادله رینولدز بر اساس پارامترهای زبری سطوح، تغییرات لزجت، افزایش دمای روغن و اینرسی سیال به منظور دستیابی به توزیع فشار تولیدی در فیلم روان کار اصلاح گردیده‌است.

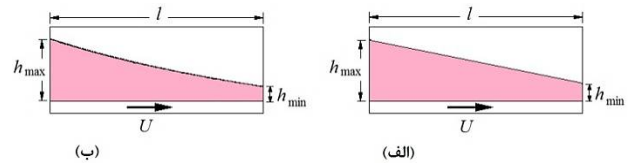
حل‌های معادله رینولدز برای وضعیت‌های واقعی یاتاقان معمولاً به شکل تقریب عددی به‌دست می‌آیند. حل‌های تحلیلی نیز برای شکل متداول یاتاقان‌های کشویی قابل دسترس می‌باشند. از آنجا که حل‌های دو بعدی منجر به تصویر فیزیکی واضحی از عملکرد فیلم‌های روان شونده می‌شوند و مقدار زیادی اطلاعات درباره مشخصه‌های عمومی یاتاقان‌ها به‌دست می‌دهند، بسیار ارزشمند هستند [16]. در سایر تحقیقات صورت گرفته در زمینه عملکرد یاتاقان‌های کشویی نیز اثر برخی پارامترهای مهم مورد بررسی قرار گرفته است [17، 18].

امروزه با پیشرفت و گسترش تحلیل‌های مرتبط با نانوسیالات، محاسبه مشخصه‌های کاربردی یاتاقان با اضافه شدن درصد حجمی معینی از نانوذرات در روان کار پایه، قابل انجام می‌باشد. در روش متداول، نانو سیال را به‌صورت تک فازی در نظر می‌گیرند. از آنجایی که نانو سیال‌های مورد استفاده بسیار رقیق هستند، و ذرات جامد، بسیار ریز هستند براحتی در سیال غوطه ور می‌شوند، لذا با تقریب خوبی می‌توان آنها را به‌عنوان سیال در نظر گرفت. با این فرض که هیچگونه لغزشی بین مرز ناپیوسته ذرات ریز پراکنده و مایع پیوسته سیال پایه وجود ندارد و همچنین بین نانوذرات و سیال، تعادل حرارتی برقرار است می‌توان نانوسیال را مانند یک سیال خالص در نظر گرفت. بنابراین تمام معادلات بقاء شامل پیوستگی، حرکت و انرژی که برای سیال خالص کاربرد دارد مستقیماً برای نانوسیال نیز می‌تواند مورد استفاده قرارگیرد. ضریب ویسکوزیته سیال و ضریب هدایت حرارتی به درصد حجمی نانوذرات بستگی دارد و با درصد حجمی ذرات رابطه مستقیم دارد. مدل‌های نظری مختلفی [19] برای محاسبه ویسکوزیته نانو سیالات پیشنهاد شده‌اند. انیشتین [20] رابطه‌ای برای محاسبه ویسکوزیته موثر یک نانوسیال پیشنهاد کرد که به‌طور خطی با غلظت ذرات تغییر

2- معادلات حاکم، شبیه‌سازی و بیان نوآوری

یاتاقان روان کاری شونده هیدرودینامیکی، یاتاقانی است که ظرفیت حمل بار را به واسطه حرکت نسبی دو سطح جدا شده توسط فیلم سیال به وجود می‌آورد. مطابق شکل 2 مدل مورد نظر از دو قسمت تشکیل شده است، قسمت ثابت در بالا و یک صفحه تخت افقی متحرک با سرعت ثابت U در پایین. فضای بین این دو قسمت را روغن پر کرده است.

روغن به‌عنوان سیال روان کار، از چپ به راست در امتداد محور x و در حالت وجود سطوح عریض، به‌طور یک‌بعدی جریان می‌یابد. ضخامت h فیلم روغن نسبت به x متغیر بوده و حداقل ضخامت با h_{min} و حداکثر آن با h_{max} مشخص می‌شود. شکل 3- الف، یک یاتاقان کشویی با سطوح تخت را پیش از سایش نمایش می‌دهد. شکل 3- ب، همین یاتاقان را پس از مدتی کارکرد و نمایان شدن اثرات سایش روی سطح مورب نشان می‌دهد.



شکل 3 هندسه یاتاقان کشویی هیدرودینامیکی: (الف) پیش از سایش، (ب) پس از سایش

شکل 3 هندسه یاتاقان کشویی هیدرودینامیکی: (الف) پیش از سایش، (ب) پس از سایش

معادله رینولدز معادله‌ی دیفرانسیل حاکم بر گستره‌ی فشار در روان کاری هیدرودینامیکی است. مطابق این معادله، توزیع فشار هیدرودینامیکی در طول کشویی، بستگی به شکل تابع شکاف، $h(x)$ ویسکوزیته روان کار، μ و سرعت نسبی U دارد [7]. معادله رینولدز در حالت دو بعدی با روان کار تراکم‌ناپذیر را می‌توان به‌صورت بیان شده با رابطه (1) در نظر گرفت.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6U\mu \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

با فرض اینکه سطوح کشویی در جهت y دارای عرض بی‌نهایت باشند می‌توان از جریان روان کار در این جهت که نشت جانبی نام دارد، صرف‌نظر کرد. در این حالت، معادله حاصل می‌تواند برای تابع فشار $p(x)$ حل شود. از تعادل این فشار و بار خارجی در جهت z ، ظرفیت تحمل بار در واحد عرض، طبق رابطه (2) تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر ظرفیت تحمل بار یاتاقان کشویی با انتگرال‌گیری از تابع توزیع فشار در طول

یاتاقان به‌صورت زیر حاصل می‌گردد.

$$w_z = \int_0^l p dx \quad (2)$$

طبق نتایج تحلیلی، برای دستیابی به بیشینه ظرفیت حمل بار در یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی، باید شیب سطح مورب کم باشد به‌گونه‌ای که نسبت ضخامت بیشینه به ضخامت کمینه فیلم روان کار برابر $\frac{h_{max}}{h_{min}} = 2/189$ باشد. این وضعیت، «حالت نسبت ضخامت بهینه» نامیده می‌شود.

نیروی ناشی از فشار $p(x)$ بر المان مورب (ثابت) در جهت حرکت وارد می‌شود. مقدار این نیروی مماسی در واحد عرض با محاسبه انتگرال رابطه (3) حاصل می‌شود.

$$w_x = \int_{h_{min}}^{h_{max}} p dh \quad (3)$$

علاوه بر این، مقاومتی در مقابل حرکت در اثر اصطکاک لزجت هنگامی که سطح متحرک نسبت به سطح ثابت حرکت می‌کند، به‌وجود می‌آید. مقادیر نیروهای اصطکاک برشی در واحد عرض یاتاقان بترتیب برای سطوح متحرک و ثابت با روابط (4) و (5) محاسبه می‌شوند.

$$f_m = \int_0^l \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=0} dx \quad (4)$$

$$f_c = - \int_0^l \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right)_{z=h} dx \quad (5)$$

که در آنها u سرعت محلی جریان روان کار بین سطوح و تابعی از z است که ترکیبی از جریان کوئت و جریان پویزول مسطح است.

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} [z^2 - hz] + U \left[1 - \frac{z}{h} \right] \quad (6)$$

دبی حجمی عبوری در واحد عرض یاتاقان کشویی از رابطه (7) تعیین می‌شود، این مقدار مشخص کننده مقدار روان کار مورد نیاز در یاتاقان ایده‌آل بدون نشت جانبی می‌باشد.

$$q_x = \int_0^h u dz = \frac{Uh}{2} - \frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

امروزه با توسعه علم نانو و گسترش تحلیل‌های مرتبط با نانو سیالات، امکان بررسی نقش ذرات جامد ریز در سیال روان کار، میسر شده است [19]. در گذشته، معمولاً برای پیش‌بینی ضریب ویسکوزیته یک نانو سیال، از سه مدل به‌طور عمده نظری، استفاده می‌گردید که برای غلظت‌های حجمی پایین نانو ذرات حدود $\phi < 0.05$ کاربرد دارد.

نخستین مدل که به مدل انیشتین معروف است دارای فرمول‌بندی بیان شده با رابطه (8) می‌باشد [20].

$$\mu_{nf} = \mu_0 (1 + k\phi) \quad (8)$$

در این رابطه μ_0 و μ_{nf} به‌ترتیب ویسکوزیته سیال پایه و

[33] ارائه شد. در این الگوریتم ابتدا فشار از معادلات مومنوم حذف می‌شود و با حل این معادلات مؤلفه‌های سرعت میانی به دست خواهد آمد. سپس با استفاده از معادله پیوستگی یک معادله پواسون برای فشار به دست می‌آید که از حل آن فشار به دست خواهد آمد. در گام آخر سرعت میانی توسط این فشار اصلاح شده و مؤلفه‌های سرعت صحیح به دست خواهند آمد. جزئیات این الگوریتم را می‌توان در مراجع [33-35] یافت. برای صحت سنجی مدل عددی، از نتایج تحلیلی برای یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی استفاده گردید. همان‌گونه که ذکر شد یک یاتاقان کشویی متشکل از دو سطح است که یکی از این سطوح، کمی مورب است. فاصله بین سطوح این امکان را می‌دهد که شکاف بین سطوح با روان‌کار پر شود. معادله تابع شکاف در یک یاتاقان کشویی قبل از سایش را با فرض اینکه $h_{min} = h_0$ و $h_{max} = h_0 e^m$ باشد، به کمک معادله خط بیان شده با رابطه (12) می‌توان نوشت.

$$\frac{h}{h_0} = (1 - e^m) \frac{x}{l} + e^m \quad (12)$$

به منظور دستیابی به یاتاقان کشویی پس از سایش که از لحاظ هندسی، نزدیک به یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی باشد، یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی با فرض وجود سایش در سطوح یاتاقان، مطابق رابطه (13) در نظر گرفته شده است.

$$\frac{h}{h_0} = e^{m(1-\frac{x}{l})} \quad (13)$$

پدیده‌ی سایش، معمولاً از کناره‌های یک سطح تخت آغاز می‌شود و به همین علت، سبب ایجاد تحذب در هندسه سطح تخت خواهد شد. به عبارت دیگر هنگامی که تغییری در ضخامت فیلم می‌نیمم و ماکزیمم وجود نداشته باشد چنین به نظر می‌رسد که تحذب تابع شکاف نمایی، در سیال روان‌کار پیشروی کرده است. در شکل 4 توابع شکاف بی‌بعد برای یاتاقان‌های کشویی خطی و نمایی روی یک نمودار مقایسه شده‌اند. هندسه این حالت برای تابع شکاف خطی و تابع شکاف نمایی، به صورت بی‌بعد رسم شده است. محور افقی در این شکل، پارامتر بی‌بعد $\frac{x}{l}$ و محورهای عمودی، عبارت بدون بعد $0/1 \frac{h}{h_0}$ می‌باشد. باید توجه داشت که چون محورها بدون بعد هستند، در واقع واحدهای آنها با یکدیگر حذف شده و در نمودارها واحدی نشان داده نشده است. معادلات حاکم توصیف شده در بخش 2، با استفاده از روش اجزای محدود گسسته شده است. مهمترین مزیت عملی روش اجزای محدود، توانایی تحلیل دامنه‌های با هندسه‌ی دلخواه است [36]. علاوه بر این، روش اجزای محدود بر اساس یک نظریه دقیق بنا شده است. بنابراین، برای هندسه

ویسکوزیته نانوسیال هستند و ثابت $k = 2$ فرض می‌شود. در واقع ویسکوزیته موثر در این مدل به طور خطی با غلظت ذرات صلب نانو در یک محلول رقیق تغییر می‌کند [19]. مدل غیر خطی برای محاسبه ضریب لزجت نانو سیال، مدل برینکمن است که با رابطه (9) بیان می‌شود [21].

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_0}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (9)$$

در رابطه (9) نیز μ_0 و μ_{nf} بترتیب ویسکوزیته سیال پایه و ویسکوزیته نانوسیال و ϕ درصد حجمی ذرات نانو می‌باشد. روش دیگر برای تخمین ضریب لزجت نانو ذرات، استفاده از مدل بکلر با رابطه (10) است که متداول‌ترین روش برای تعیین ضریب لزجت نانو سیال می‌باشد [22].

$$\mu_{nf} = \mu_0 (1 + k_1 \phi + k_2 \phi^2) \quad (10)$$

در رابطه (10)، ϕ درصد حجمی ذرات نانو، μ_0 ویسکوزیته سیال پایه و مقادیر ثابت $k_1 = 2.5$ بوده و مقدار دیگر برای نانو ذرات Al_2O_3 به $k_2 = 6$ تصحیح شده است [23، 24]. با این وجود بر اساس دستاوردهای اخیر علم نانو، مدل‌های نظری ذکر شده مقادیر دقیقی از خصوصیات ترموفیزیکی برای نانو سیالات ارائه نمی‌دهند. داده‌های آزمایشگاهی مفید امکان می‌دهد تا از مدل‌های دقیق‌تری برای تعریف خصوصیات ترموفیزیکی نانو سیال استفاده کرد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، یکی از نزدیکترین معادلات به داده‌های تجربی، استفاده از رابطه (11) برای تقریب ضریب لزجت نانو سیالی است که از اضافه کردن ϕ درصد حجمی ذرات نانو به سیال پایه با ضریب لزجت μ_0 حاصل می‌شود [25].

$$\mu_{nf} = \mu_0 \left[1 + b \left(\frac{\phi}{1-\phi} \right)^n \right] \quad (11)$$

در رابطه (11) مقادیر $b = 5300$ و $n = 2/8$ به عنوان ثابت‌های نانو ذرات Al_2O_3 داده شده‌اند [26]. در این تحقیق از رابطه بیان شده با معادله (11) به عنوان مدل آزمایشگاهی، یاد خواهد شد.

1-2- مدل المان محدود

در این مطالعه، یک مدل المان محدود جهت پیش‌بینی توزیع فشار روان‌کار و مقادیر مشخصه یاتاقان کشویی طراحی شده است. معادلات حاکم بر مسأله که معادلات ناویر استوکس می‌باشد در مقاله حاضر با استفاده از روش اجزای محدود، گسسته و مورد حل قرار گرفته است. الگوریتم گسسته‌سازی معادلات، الگوریتم جداسازی بر پایه مشخصه می‌باشد که اولین بار در چهارچوب اجزای محدود توسط زینکوویچ و همکاران

یک زیر برنامه به الگوریتم عددی اعمال می شود و معادله حاکم و معادله ساختاری با شرایط مرزی مربوطه حل می شوند.

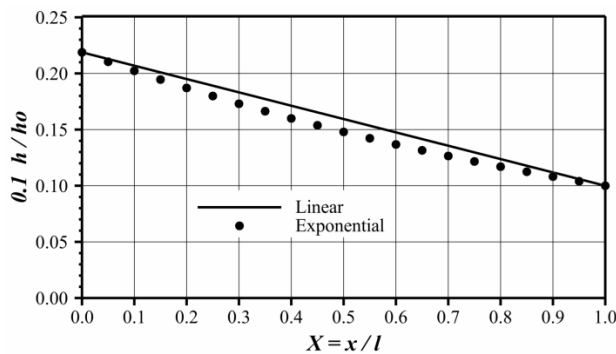


Fig. 4 Comparison of sliding bearing gap functions with linear and exponential functions in optimal thickness ratio mode

شکل 4 مقایسه دو تابع شکاف در یاتاقان کشویی با توابع خطی و نمایی در حالت نسبت ضخامت بهینه

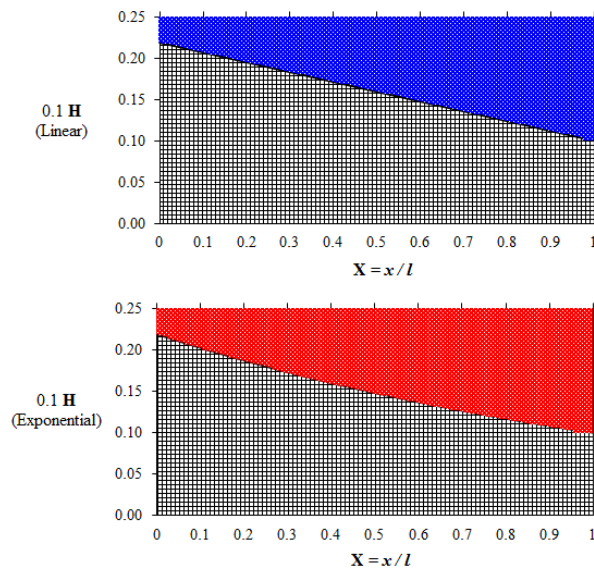


Fig. 5 Simulation model of sliding bearing with linear gap function and exponential gap function in optimal thickness ratio mode

شکل 5 مدل شبیه سازی یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی و تابع شکاف نمایی در حالت نسبت ضخامت بهینه

3- نقش هندسی سایش سطح

تحلیل این بخش، بررسی تأثیر تغییر هندسه یاتاقان کشویی - به تنهایی - نسبت به یاتاقان کشویی با سطوح تخت است. نقش ذرات ریز ناشی از سایش، در بخش بعدی بررسی می شود.

در شکل 6 توابع توزیع فشار بی بعد $P(x)$ برای یاتاقان های کشویی با تابع شکاف خطی و نمایی مقایسه شده اند. لازم به ذکر است که این نمودارها در حالت نسبت ضخامت بهینه یعنی به ازای $\frac{h_{max}}{h_{min}} = 2/189$ یا $e^m = 2/189$ رسم شده اند. حالت نسبت ضخامت بهینه، بیشترین ظرفیت تحمل بار را در یک

نامنظم این مقاله، روش اجزای محدود مناسب تر است. الگوریتم گسسته سازی کد با استفاده از زبان برنامه نویسی ++C ساخته شده است و در تمام دیواره ها، شرط مرزی بدون لغزش اعمال می شود [37].

مزیت انتخاب توابع شکاف خطی و نمایی طبق معادلات (12) و (13) این است که در هر دو یاتاقان کشویی، ضخامت فیلم می نیمم و ضخامت فیلم ماکزیمم برای مقایسه های بعدی برابر می باشند. علاوه بر این، فرض رابطه نمایی برای شکاف یاتاقان کشویی با توجه به وجود رابطه بسته ی (13)، امکان محاسبه دقیق مقادیر مشخصه را با استفاده از توابع درونیاب در روش اجزای محدود فراهم می کند. همان طور که شکل 4 نشان می دهد، هندسه یاتاقان کشویی پس از سایش، بسیار نزدیک به یاتاقان کشویی با شکاف خطی است.

معمولاً پارامترهای بدون بعد مختلفی برای ارزیابی عملکرد یاتاقان های کشویی استفاده می شوند. این پارامترها از عبارت هایی مانند ویسکوزیته روان کار، سرعت، بار و غیره تشکیل شده است. اینجا مقادیر مشخصه معرفی شده برای یاتاقان های کشویی به صورت بدون بعد $P = \frac{ph_0^2}{\mu Ul}$ ، $H = \frac{h}{h_0}$ ، $X = \frac{x}{l}$ ، $Q = \frac{2q_x}{U h_0}$ و $F_m = \frac{f_m h_0}{\mu Ul}$ ، $F_c = \frac{f_c h_0}{\mu Ul}$ ، $W_x = \frac{w_x h_0}{\mu Ul}$ ، $W_z = \frac{w_z h_0^2}{\mu Ul^2}$ در نظر گرفته شده است. در تمام این روابط $h_0 = h_{min}$ ضخامت کمینه فیلم روان کار و l طول کشویی می باشد. برای به دست آوردن شبکه بندی مناسب، در چند حالت مختلف، معادلات حاکم حل عددی شده و نتایج با حل تحلیلی مقایسه شدند. برای شبکه بندی ناحیه محاسباتی، المان های از نوع مربعی چهار گرهی با توابع درونیاب خطی، استفاده شده است. با توجه به آزمایش های عددی صورت گرفته در زمینه توزیع فشار در یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی، المان های مذکور در مش بندی نتایج نزدیکتری را به نتایج تحلیلی نشان دادند. معیار همگرایی که برای اطمینان از رسیدن به حل پایا در معادلات حاکم استفاده می شود از مرتبه $10e - 5$ در نظر گرفته شده است. شکل 5 یک شبکه بندی مدل شبیه سازی شده را بترتیب برای یاتاقان های کشویی دارای تابع شکاف خطی و تابع شکاف نمایی، نمایش می دهد.

برای به دست آوردن استقلال جواب از شبکه، از آزمایش های عددی در شیب های مختلف یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی و مقایسه جواب ها با حل های تحلیلی استفاده می شود. سپس در 10 نسبت ضخامت مختلف، حل های عددی با شبیه سازی به - دست می آید. به منظور در نظر گرفتن تغییرات خصوصیات فیزیکی نانوسیال که توابعی از غلظت حجمی نانوذرات هستند

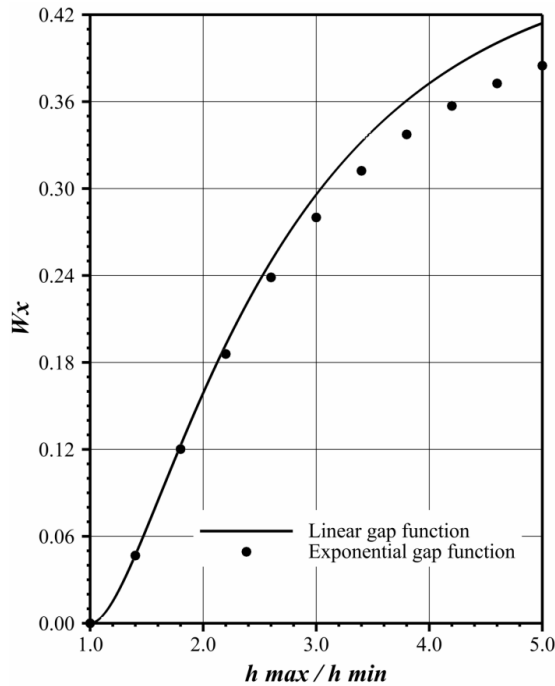


Fig. 8 Comparison of the dimensionless tangential force of sliding bearings with linear and exponential gap functions

شکل 8 مقایسه نیروی مماسی بی‌بعد دریاتاقان کشویی با توابع شکاف خطی و نمایی

همان‌طور که نمودارهای ظرفیت تحمل بار و نیروی مماسی نشان می‌دهند عموماً یاتاقان کشویی با شکاف نمایی دارای ظرفیت تحمل بار بیشتر و نیروی مماسی کمتری است که هر دو باعث عملکرد مطلوب‌تر این یاتاقان نسبت به یاتاقان کشویی با شکاف خطی است. دبی حجمی عبوری در واحد عرض یاتاقان‌های کشویی با تابع شکاف خطی و نمایی در شکل 9 مقایسه شده‌اند. طبق این نمودار، نیاز به روان‌کار در یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی به ازای مقادیر عمومی نسبت ضخامت، کمتر از یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی است.

خلاصه‌ای از نتایج تحلیلی و عددی بی‌بعد شده در دو نوع یاتاقان کشویی هیدرودینامیکی با توابع شکاف خطی و نمایی با حالت نسبت ضخامت بهینه در جدول 1 ارائه شده‌است. با مقایسه اعداد جدول می‌توان به این ارزیابی رسید که کدام یاتاقان از جهاتی مناسب‌تر و دارای مزیت است. طبق داده‌های جدول 1، تنها مزیت یاتاقان با سطوح تخت این است که نیروهای اصطکاک آن در حالت نسبت ضخامت بهینه در مقایسه با یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی، کمتر است.

داده‌های جدول 1 نشان می‌دهند که در حالت نسبت ضخامت بهینه، جمع جبری نیروی مماسی و نیروهای اصطکاک، برابر با صفر است (شرط تعادل استاتیکی). به همین جهت، در

یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی ایجاد می‌کند. همان‌گونه که این شکل، نشان می‌دهد محل و مقدار فشار ماکزیمم در دو یاتاقان کشویی، کمی متفاوت است. نمودارهای ظرفیت تحمل بار و نیروی مماسی یاتاقان‌های کشویی با توابع شکاف خطی و نمایی به ازای مقادیری از نسبت ضخامت به ترتیب در شکل‌های 7 و 8 مقایسه شده‌اند.

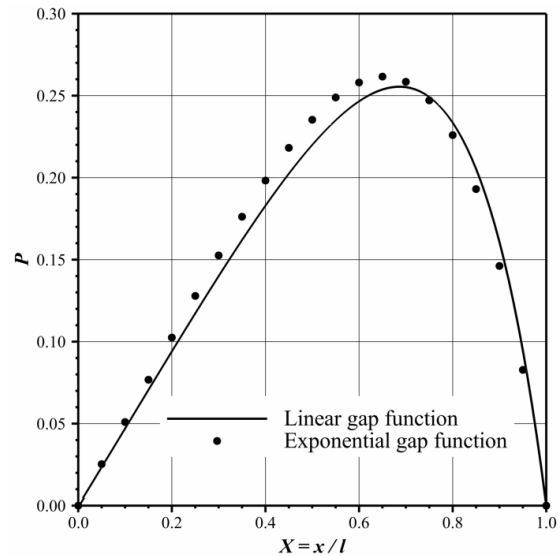


Fig. 6 Comparison of the dimensionless pressure distribution of sliding bearings with linear and exponential gap functions in optimal thickness ratio mode

شکل 6 مقایسه توزیع فشار بی‌بعد دریاتاقان کشویی با توابع شکاف خطی و نمایی در حالت نسبت ضخامت بهینه

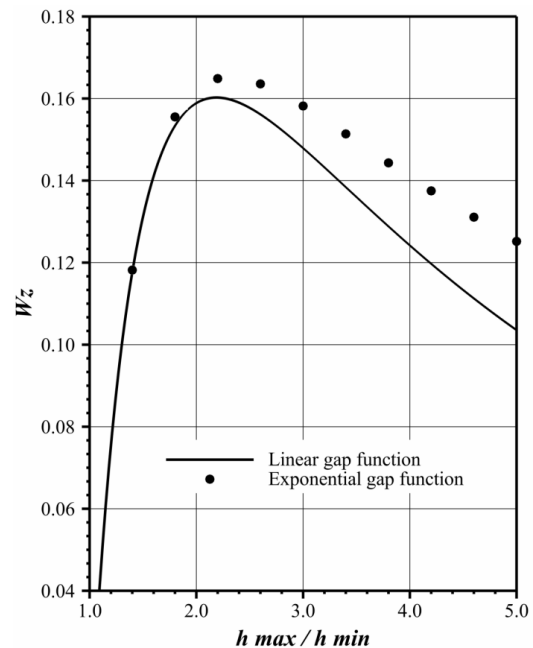


Fig. 7 Comparison of the dimensionless load-carrying capacity of sliding bearings with linear and exponential gap functions

شکل 7 مقایسه ظرفیت تحمل بار بی‌بعد دریاتاقان کشویی با توابع شکاف خطی و نمایی

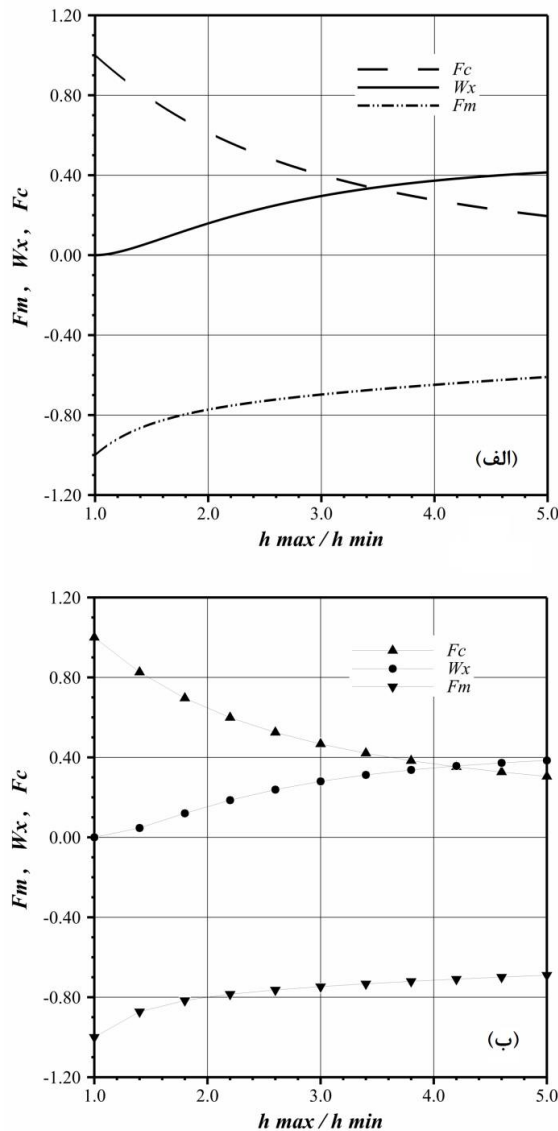


Fig. 10 Comparison of tangential force (W_x), fixed surface friction force (F_c), and moving surface friction force (F_m) in (a) sliding bearing with linear gap function (b) sliding bearing with exponential gap function

شکل 10 مقایسه نیروی مماسی (W_x)، نیروی اصطکاک روی سطح ثابت (F_c)، و نیروی اصطکاک روی سطح متحرک (F_m) در (الف) یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی (ب) یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی

4- نقش ساختاری ذرات ناشی از سایش

در بخش قبلی تنها به نقش تغییر هندسه یاتاقان کشویی پس از سایش پرداخته شد. در این بخش با توجه به پیشرفت در تحلیل‌های مرتبط با ریزساختار، نقش ذرات جامد نانو در سیال روان کار، در نظر گرفته می‌شود. در اینجا به منظور بررسی اثر نانو ذرات حاصل از سایش، مشخصات روان کار پایه در دمای کارکرد ثابت در نظر گرفته می‌شود. ذرات جامد ریز ناشی از سایش در یاتاقان‌ها دارای ابعاد متفاوتی هستند. بنابراین، با توجه به مدل‌های نظری و آزمایشگاهی معرفی شده در این شبیه‌سازی

یاتاقان‌های کشویی مقایسه نیروی مماسی و نیروهای اصطکاک برشی، به‌ازای مقادیر مختلف نسبت ضخامت، در یک نمودار نمایش داده می‌شود. برای این منظور در شکل‌های 10-الف و ب، مقایسه نیروی مماسی و نیروهای اصطکاک برشی در یاتاقان کشویی با توابع شکاف خطی و نمایی مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که جمع جبری نیروهای اصطکاک برشی و نیروی مماسی در حالت بدون بعد، به ازای هر نسبت ضخامت، صفر است. ارضای شرایط تعادل استاتیکی، به ازای هر مقدار نسبت ضخامت، نشان دهنده اعتبار مدل‌سازی و صحت نتایج است.

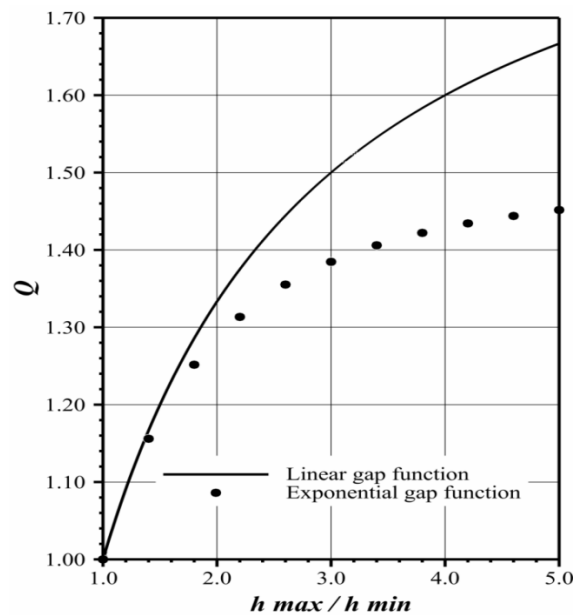


Fig. 9 Comparison of the dimensionless volumetric flow rate of lubricant in sliding bearings with linear and exponential gap functions
شکل 9 مقایسه دبی حجمی بدون بعد روان کار در یاتاقان کشویی با توابع شکاف خطی و نمایی

جدول 1 برآورد کمی اثر تغییر هندسی سطح در یاتاقان کشویی از تابع شکاف خطی به تابع شکاف نمایی در حالت نسبت ضخامت بهینه

Table 1 Quantitative estimation of the effect of surface geometric change on sliding bearings from linear gap function to exponential gap function in optimal thickness ratio mode

مقدار مشخصه	تابع شکاف خطی	تابع شکاف نمایی	درصد تغییر
$\frac{h_{max}}{h_{min}}$	2/189	2/189	0/0
P_m	0/255	0/262	2/7
W_z	0/160	0/165	3/1
W_x	0/190	0/184	-3/2
F_m	-0/754	0/758	4/1
F_c	0/564	0/601	6/6
Q	1/373	1/312	-4/4

نقش نانوذرات در کاهش اصطکاک و رفتارهای ضد سایشی تاکید دارند [38-40]. آنها در تحقیقات خود، مشخصات اصطکاکی ذرات در روغن را به سه عامل نسبت داده‌اند. اولین عامل، مکانیزم غلتشی شکل کروی ذرات نانو است. عامل دوم مکانیزم جداکنندگی ذرات نانو است که با حذف تماس فلز- فلز عمل می‌کند. سومین عامل نیز به مخلوط روغن با ذرات سایشی نسبت داده می‌شود [39]. راپوپورت و همکارانش در تحقیقات خود، کاهش اصطکاک و رفتارهای ضد سایشی نانوسیال را به اندازه (محدوده 20 – 120 nm)، شکل و غلظت نانوذرات مرتبط می‌دانند [40].

بر خلاف نیروهای اصطکاک، پیش‌بینی تحلیل‌های مرتبط با نانوسیالات از بهبود ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌ها هنگام افزودن نانوذرات در روغن پایه اثبات شده است [41]. نمودار شکل 11 پیش‌بینی سه مدل نظری بررسی شده از تغییر ظرفیت تحمل بار در یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی را با اضافه شدن 1 تا 3 درصد نانوذرات در روغن پایه بر حسب نسبت‌های ضخامت نمایش می‌دهد. مقادیر محاسبه شده با هر سه مدل نظری بسیار نزدیک به هم بوده و حتی افزایش کم نانوذرات ظرفیت تحمل بار یاتاقان کشویی را افزایش می‌دهند.

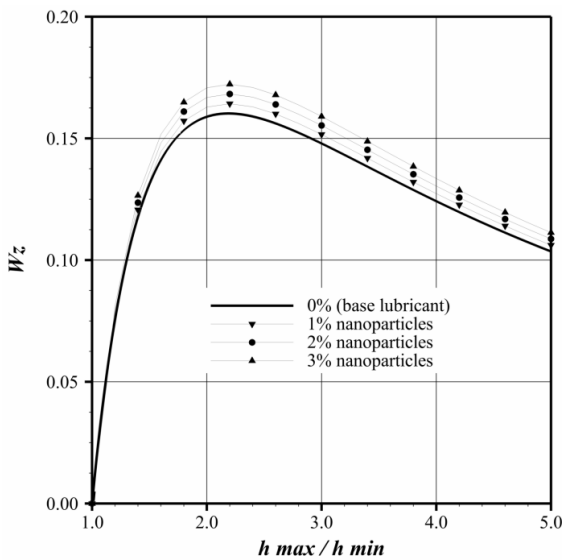


Fig. 11 Predicting theoretical models of increasing the load-carrying capacity of a linear sliding bearing by adding 1 to 3% nanoparticles to the base lubricant

شکل 11 پیش‌بینی مدل‌های نظری از افزایش ظرفیت تحمل بار در یاتاقان‌های کشویی با تابع شکاف خطی هنگام افزودن 1 تا 3 درصد نانوذرات در روان کار پایه

در نسبت‌های ضخامت نزدیک به حالت نسبت ضخامت بهینه، حل‌های عددی بیشتری از سایر مناطق اجرا شده‌است

می‌توان ضریب لزجت مؤثر را محاسبه نمود. ضریب لزجت مؤثر در هر مدل با اضافه کردن درصد‌های حجمی مختلف نانو ذرات Al_2O_3 قابل محاسبه خواهد بود. بدیهی به نظر می‌رسد که افزایش ضریب لزجت مؤثر روان کار، به‌تنهایی سبب افزایش نیروی تحمل بار یاتاقان و افزایش اصطکاک و اتلاف انرژی می‌گردد که خود یک عامل سایش در روان کاری می‌باشد.

پیش‌بینی مدل‌های نظری و آزمایشگاهی پس از افزودن نانو-ذرات، یک افزایش در میزان سایش یاتاقان می‌باشد که به دلیل افزایش نیروهای اصطکاک روی سطوح متحرک و ثابت یاتاقان کشویی است. نتایج این پیش‌بینی با اضافه شدن 1 تا 3 درصد نانو ذرات به سیال پایه، نسبت به روغن خالص، در جداول 2 و 3 در حالت نسبت ضخامت بهینه، خلاصه شده‌است.

جدول 2 پیش‌بینی مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی از نیروی بی‌بعد اصطکاک روی سطح متحرک یاتاقان کشویی خطی با اضافه کردن 1 تا 3 درصد نانو ذرات به روان کار پایه

Table 2 Prediction of theoretical and experimental models of dimensionless force of friction on the moving surface of a linear sliding bearing by adding 1 to 3% nanoparticles to the base lubricant

درصد حجمی نانوذرات	نیروی اصطکاک سطح متحرک در مدل‌های نظری	نیروی اصطکاک سطح متحرک در مدل آزمایشگاهی
$\phi = 0.0\%$	-0/754	-0/754
$\phi = 1.0\%$	-0/773	-0/764
$\phi = 2.0\%$	-0/792	-0/828
$\phi = 3.0\%$	-0/811	-0/991

جدول 3 پیش‌بینی مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی از نیروی بی‌بعد اصطکاک روی سطح ثابت یاتاقان کشویی خطی با اضافه کردن 1 تا 3 درصد نانو ذرات به روان کار پایه

Table 3 Prediction of theoretical and experimental models of dimensionless force of friction on the fixed surface of a linear sliding bearing by adding 1 to 3% nanoparticles to the base lubricant

درصد حجمی نانوذرات	نیروی اصطکاک سطح ثابت در مدل‌های نظری	نیروی اصطکاک سطح ثابت در مدل آزمایشگاهی
$\phi = 0.0\%$	0/564	0/564
$\phi = 1.0\%$	0/578	0/572
$\phi = 2.0\%$	0/592	0/619
$\phi = 3.0\%$	0/606	0/741

پیشرفت‌های اخیر در تحلیل‌های مرتبط با نانو سیالات، داده‌های جداول 2 و 3 را تایید نمی‌کنند. حتی گزارش‌هایی روی نقش نانوذرات در کاهش اصطکاک و رفتارهای ضد سایشی تاکید می‌کنند [38]. راپوپورت و همکارانش طی گزارش‌هایی از پیشرفت‌های اخیر در تحلیل‌های مرتبط با نانوسیالات، روی

در حالت نسبت ضخامت بهینه، هنگام اضافه شدن یک تا سه درصد حجمی نانو ذرات مقایسه شده اند.

جدول 4 پیش‌بینی مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی از ظرفیت تحمل بار بی‌بعد یاتاقان کشویی خطی با اضافه کردن 1 تا 3 درصد نانو ذرات به روان‌کار پایه در حالت نسبت ضخامت بهینه

Table 4 Predicting theoretical and experimental models of dimensionless load carrying capacity of linear sliding bearings by adding 1 to 3% nanoparticles to the base lubricant in the optimal thickness ratio mode

درصد حجمی نانو ذرات	ظرفیت تحمل بار در مدل‌های نظری	ظرفیت تحمل بار در مدل آزمایشگاهی
$\phi = 0.0\%$	0/160	0/160
$\phi = 1.0\%$	0/164	0/162
$\phi = 2.0\%$	0/168	0/176
$\phi = 3.0\%$	0/172	0/211

جدول 5 پیش‌بینی مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی از نیروی مماسی بی‌بعد در یاتاقان کشویی خطی با اضافه کردن 1 تا 3 درصد نانو ذرات به روان‌کار پایه در حالت نسبت ضخامت بهینه

Table 5 Predicting theoretical and experimental models of dimensionless tangential force of linear sliding bearings by adding 1 to 3% nanoparticles to the base lubricant in the optimal thickness ratio mode

درصد حجمی نانو ذرات	نیروی مماسی بی‌بعد در مدل‌های نظری	نیروی مماسی بی‌بعد در مدل آزمایشگاهی
$\phi = 0.0\%$	0/190	0/190
$\phi = 1.0\%$	0/195	0/193
$\phi = 2.0\%$	0/199	0/209
$\phi = 3.0\%$	0/204	0/250

مشابه جدول 1 که در آن رشد مقادیر مشخصه در یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی نسبت به تابع شکاف خطی برآورد شد، در اینجا، رشد مقادیر مشخصه در یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی را تحت اثر نانوسیال، مورد ارزیابی کمی قرار می‌گیرد. پیشتر مشاهده شد که در شکل 11 برای مدل‌های نظری افزایش درصد نانو ذرات مقدار W_z را تقریباً به طور یکنواخت افزایش می‌دهد ولی در شکل 12 برای مدل آزمایشگاهی مقدار افزایش W_z از 2 به 3 درصد خیلی بیشتر از افزایش 1 به 2 درصد است. مقایسه مقدار پیش‌بینی ضریب لزجت نانو سیال در مدل تجربی با مدل‌های نظری، تفاوت چشمگیری بخصوص در درصدهای حجمی نانو ذرات بالاتر را نشان می‌دهد. از طرف دیگر معمولاً افزایش درصد حجمی نانو ذرات باعث می‌شود که فرض رقیق بودن نانوسیال نقض گردد و ذرات جامد نتوانند براحتی در سیال غوطه‌ور شوند، لذا تقریب به کار رفته در سیال که هیچگونه لغزشی بین مرز ناپیوسته

به‌طوری که در مناطقی که شیب تغییرات زیاد است نمودارهای دقیق‌تری ترسیم گردد. شکل 12 پیش‌بینی مدل آزمایشگاهی از بهبود ظرفیت تحمل بار در یاتاقان کشویی خطی با اضافه شدن 1 تا 3 درصد نانو ذرات در روغن پایه را بر حسب نسبت‌های ضخامت نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در مدل آزمایشگاهی که در آن، ضریب ویسکوزیته مؤثر نانو سیال به صورت آزمایشگاهی، صحنه‌گذاری شده است با افزودن 3 درصد نانو ذرات، مقدار افزایش ظرفیت تحمل بار در یاتاقان چشمگیر می‌باشد. باید توجه داشت که در شکل 11 از مدل‌های نظری استفاده شده و مقدار W_z به صورت یکنواخت با درصد حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد، در حالی که در شکل 12 که از مدل آزمایشگاهی استفاده شده تغییرات غیر یکنواخت می‌باشد. دلیل این امر این است که مقدار پیش‌بینی ضریب لزجت در مدل‌های نظری با مدل آزمایشگاهی متفاوت می‌باشد و مدل‌های آزمایشگاهی نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. همچنین همه مدل‌ها چه نظری و چه آزمایشگاهی در نسبت حجمی صفر مقدار ویسکوزیته را ویسکوزیته سیال پایه ارائه می‌دهند و نتایج برای همه مدل‌ها در نسبت حجمی صفر یکسان است.

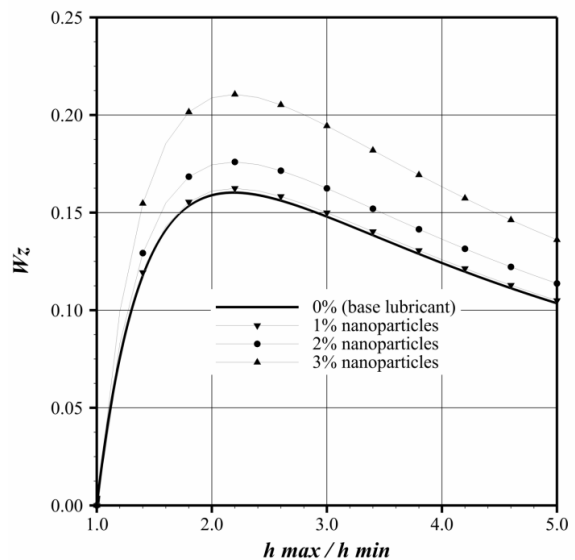


Fig. 12 Predicting experimental model of increasing the load-carrying capacity of a linear sliding bearing by adding 1 to 3% nanoparticles to the base lubricant

شکل 12 پیش‌بینی مدل آزمایشگاهی از افزایش ظرفیت تحمل بار در یاتاقان‌های کشویی با تابع شکاف خطی هنگام افزودن 1 تا 3 درصد نانو ذرات در روان‌کار پایه

در داده‌های جداول 4 و 5 مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل‌های نظری و آزمایشگاهی از کمیت‌های بی‌بعد ظرفیت تحمل بار و نیروی مماسی یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی

5- برهم‌نهی اثر ساختاری ذرات و اثر هندسی

در این بخش، به منظور برآورد کمی برهم‌نهی اثر هندسی سایش سطح و اثر ساختاری نانوذرات بر یاتاقان کشویی هیدرودینامیکی، رشد مقادیر مشخصه در دو یاتاقان کشویی مورد مقایسه قرار گرفته است. یاتاقان اول، با تابع شکاف خطی و حاوی روان کار خالص (متناظر با یاتاقان قبل از سایش) و یاتاقان دیگر، با تابع شکاف نمایی و حاوی روان کار پایه بعلاوه 2% نانوذرات (متناظر با یاتاقان بعد از سایش) در نظر گرفته شده است. این مقایسه در جداول 8 و 9 بترتیب با پیش‌بینی مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی انجام شده است. یک ستون از جداول، مربوط به مقادیر مشخصه در یاتاقان با شکاف خطی است که از روان کار خالص استفاده می‌کند و ستون دیگر، مقادیر مشخصه در یاتاقان با شکاف نمایی است که 2% نانوذرات در روان کار پایه وجود دارد. داده‌های جداول 8 و 9 نشان می‌دهند که وجود 2 درصد حجمی نانو ذرات Al_2O_3 ناشی از سایش در روغن پایه، باعث افزایش 8/1 تا 13/1 درصدی در ظرفیت تحمل بار یاتاقان کشویی سایش یافته نسبت به یاتاقان کشویی اولیه می‌شود. از این مقدار، 3/1 درصد مربوط به اثر هندسی و 5 تا 10 درصد مربوط به اثر ساختاری نانوذرات است. همچنین، وجود 2 درصد حجمی نانو ذرات ناشی از سایش در روغن پایه، فقط باعث افزایش 1/6 تا 6/3 درصدی در نیروی مماسی یاتاقان کشویی سایش یافته می‌شود.

در اینجا یک یادآوری تاریخی درباره نشت جانبی لازم است. در حدود سال 1950 میلادی، یاتاقان‌های کفگرد و ژورنال که دارای تابع شکاف پله‌ای بودند، به‌طور موقت جای تابع شکاف مورب را گرفتند. تحلیل معادله رینولدز یک‌بعدی در یاتاقان کشویی برای دستیابی به بیشینه ظرفیت تحمل بار، منجر به یک تابع پله‌ای برای شکل شکاف یاتاقان می‌گردد.

جدول 8 برآورد کمی مدل‌های نظری از برهم‌نهی اثرات سایش بر یاتاقان کشویی در حالت نسبت ضخامت بهینه و دارای 2 درصد نانوذرات ناشی از سایش

Table 8 Quantitative estimation of theoretical models of superposition of abrasion effects on sliding bearings in optimal thickness ratio mode with 2% nanoparticles due to abrasion

مقدار مشخصه	روان کار خالص	روان کار با 2% نانوذرات	درصد تغییر
$\frac{h_{max}}{h_{min}}$	2/189	2/189	0/0
P_m	0/255	0/275	7/8
W_z	0/160	0/173	8/1
W_x	0/190	0/193	1/6
Q	1/373	1/312	-4/4

ذرات پراکنده و مایع پیوسته سیال پایه وجود ندارد دچار خطا خواهد شد، زیرا نمی‌توان نانوسیال را مانند یک سیال خالص در نظر گرفت. به این دلایل که شرح آن گذشت در اینجا یک فرض محافظه‌کارانه این است که فرض شود فقط 2 درصد حجمی ذرات ناشی از سایش که به روان‌کننده پایه افزوده شود دارای محدوده ابعاد نانو باشد. پس از حل عددی، این ارزیابی در جداول 6 و 7 بترتیب با مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی ارائه شده است. یک ستون از این جداول، مربوط به مقادیر مشخصه در یاتاقانی است که از روان کار خالص استفاده شده است و ستون دیگر، مقادیر مشخصه در یاتاقانی است که 2% نانوذرات در روان کار پایه اضافه شده است.

جدول 6 برآورد کمی مدل‌های نظری از اثر نانوذرات بر یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی در حالت نسبت ضخامت بهینه پس از اضافه کردن 2 درصد نانوذرات در روان کار پایه

Table 6 Quantitative estimation of theoretical models of the effect of nanoparticles on sliding bearings with a linear gap function in the optimal thickness ratio mode after adding 2% nanoparticles in the base lubricant

مقدار مشخصه	روان کار خالص	روان کار با 2% نانوذرات	درصد تغییر
$\frac{h_{max}}{h_{min}}$	2/189	2/189	0/0
P_m	0/255	0/268	5/1
W_z	0/160	0/168	5/0
W_x	0/190	0/199	4/7
Q	1/373	1/373	0/0

جدول 7 برآورد کمی مدل آزمایشگاهی از اثر نانوذرات بر یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی در حالت نسبت ضخامت بهینه پس از اضافه کردن 2 درصد نانوذرات در روان کار پایه

Table 7 Quantitative estimation of experimental model of the effect of nanoparticles on sliding bearings with a linear gap function in the optimal thickness ratio mode after adding 2% nanoparticles in the base lubricant

مقدار مشخصه	روان کار خالص	روان کار با 2% نانو ذرات	درصد تغییر
$\frac{h_{max}}{h_{min}}$	2/189	2/189	0/0
P_m	0/255	0/280	9/8
W_z	0/160	0/176	10/0
W_x	0/190	0/209	10/0
Q	1/373	1/373	0/0

برآورد جدول 1، ارزیابی کمی اثرات تغییر هندسی ناشی از سایش سطح بر یاتاقان کشویی هیدرودینامیکی است. برآورد جداول 6 و 7، ارزیابی کمی اثرات نانوذرات ناشی از سایش در همان یاتاقان کشویی هیدرودینامیکی است.

جدول 9 برآورد کمی مدل آزمایشگاهی از برهم‌نهی اثرات سایش بر یاتاقان کشویی در حالت نسبت ضخامت بهینه و دارای 2 درصد نانوذرات ناشی از سایش

جدول 9 Quantitative estimation of experimental model of superposition of abrasion effects on sliding bearings in optimal thickness ratio mode with 2% nanoparticles due to abrasion

درصد تغییر	روان کار با 2% نانو ذرات	روان کار خالص	مقدار مشخصه
0/0	2/189	2/189	$\frac{h_{max}}{h_{min}}$
12/5	0/287	0/255	P_m
13/1	0/181	0/160	W_z
6/3	0/202	0/190	W_x
-4/4	1/312	1/373	Q

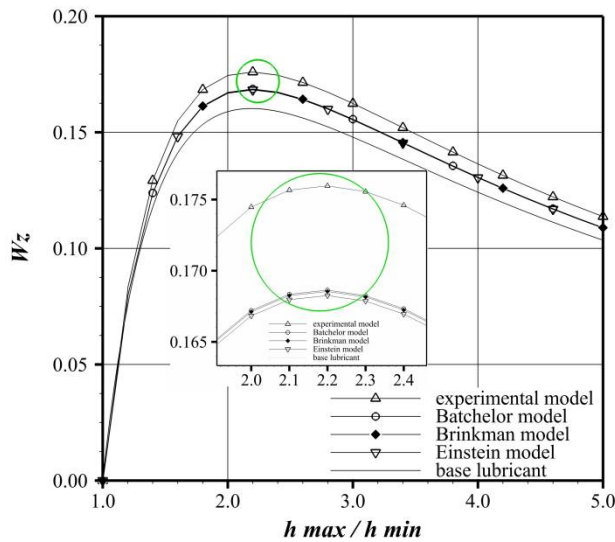


Fig. 13 Comparison of the dimensionless load-carrying capacity of sliding bearing with linear gap function and presence of 2% nanoparticles in base lubricant in theoretical and experimental models

شکل 13 مقایسه ظرفیت تحمل بار بی‌بعد در یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی با اضافه کردن 2 درصد نانوذرات در روغن پایه در مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی

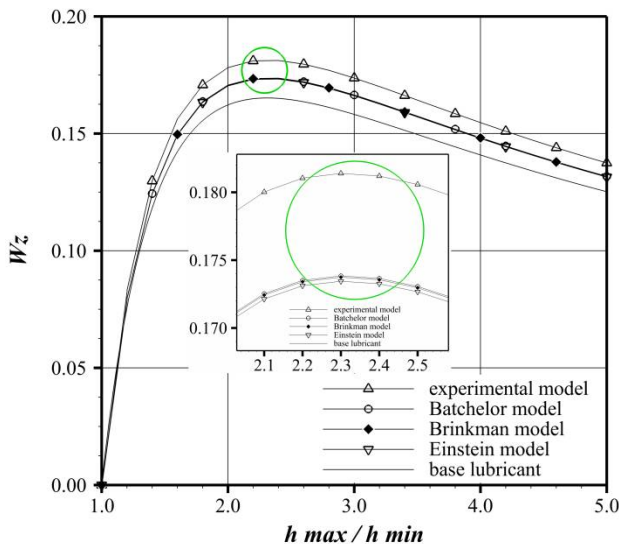


Fig. 14 Comparison of the dimensionless load-carrying capacity of sliding bearing with exponential gap function and presence of 2% nanoparticles in base lubricant in theoretical and experimental models

شکل 14 مقایسه ظرفیت تحمل بار بی‌بعد در یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی و وجود 2 درصد نانوذرات در روغن پایه در مدل‌های نظری و مدل آزمایشگاهی

6- نتیجه‌گیری

در اثر سایش یاتاقان و تغییر شکل در هندسه‌ی یاتاقان کشویی

در واقع، اولین بار رایلی نشان داد که برای ایجاد ماکزیمم فشار هیدرودینامیکی، مسیر جریان روان کار، می‌بایست به شکل یک شکاف پله‌ای باشد. بعدها به دلیل عملکرد پیچیده یاتاقان‌ها مشخص شد که بین مشخصه‌های تحلیلی یاتاقان‌ها و مشخصه‌های عملی آنها در شرایط کاری اختلاف وجود دارد و شکل شکاف پله‌ای در عمل باعث نشت جانبی زیادی می‌شود که اعتبار معادله رینولدز یک‌بعدی را نقض می‌کند [10].

در شکل 13 ظرفیت تحمل بار یاتاقان کشویی با تابع شکاف خطی (یاتاقان کشویی بدون سایش) با اضافه شدن 2 درصد نانوذرات در روغن پایه به‌ازای نسبت‌های ضخامت، با سه مدل نظری و یک مدل آزمایشگاهی مقایسه شده‌است.

در شکل 14 ظرفیت تحمل بار یاتاقان کشویی با تابع شکاف نمایی (یاتاقان کشویی سایش یافته) ضمن وجود 2 درصد نانوذرات ناشی از سایش در روان کار پایه به‌ازای نسبت‌های ضخامت، با سه مدل نظری و یک مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته‌است. اگرچه ملاحظه می‌شود که در مدل آزمایشگاهی با افزودن نانوذرات، مقدار افزایش ظرفیت تحمل بار در یاتاقان چشمگیر است، با این وجود، اثر برهم‌نهی نانوسیال و سایش سطح -صرفنظر از نوع مدل استفاده شده- سبب باثباتی یاتاقان کشویی نسبت به تغییرات نسبت ضخامت شده‌است.

به عبارت دیگر حساسیت یاتاقان کشویی، پس از گذشت مدت زمانی از شروع کارکرد و پدیدار شدن اثرات سایش در آن، به مقدار عددی نسبت ضخامت بهینه از سمت راست کاسته می‌شود. به عنوان نتیجه‌ی دیگری می‌توان پیشنهاد داد که در هنگام ساخت یاتاقان‌های هیدرودینامیکی کفگرد، نسبت ضخامت، بیشتر از نسبت ضخامت بهینه طراحی شود (به عنوان پیشنهاد، نسبت ضخامت 3) تا اثرات کارکرد و سایش یاتاقان، عملکرد آنرا بهبود بخشد.

همچنین باید توجه داشت که اضافه کردن درصد‌های

تشکر صمیمانه خود را از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج و به‌ویژه حامی مالی این پژوهش، واحد یادگار امام (ره) شهرری اعلام می‌دارند.

8- مراجع

- [1] M. Barmaki, K. Amini, The effect of the presence of the middle layer of 309-stainless steel on microstructure and mechanical properties of St-52 carbon steel clad by high chromium-carbon electrode produced by fusion welding, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 34-42, 2018. (in Persian فارسی)
- [2] A. Moaref, A. Rabiezhadeh, Evaluation of the effect of underwater friction stir welding on microstructure and tribological properties of copper and its alloy, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 42-51, 2019. (in Persian فارسی)
- [3] I. Hajannia, M. R. Pakmanesh, M. Shamanian, M. Atapour, Comparison of wear behavior of an alloy developed as TRIP steel and DP steel, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 48- 54, 2020. (in Persian فارسی)
- [4] A. Taghipoor, Experimental study of anti-wear performance of nano lubricants in rotary machines gearboxes, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 30-38, 2019. (in Persian فارسی)
- [5] Y. Javid, Numerical and experimental analysis of laser welding process parameters on weld bead geometry, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 63- 71, 2020. (in Persian فارسی)
- [6] O. Reynolds, On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 177, No. 1, pp. 157-234, 1886.
- [7] B. J. Hamrock, *Fundamentals of fluid film lubrication*, McGraw-Hill, Singapore, pp.142-178, 1994.
- [8] W. Wang, Y. He, J. Zhao, Y. Li, J. Luo, Numerical optimization of the groove texture bottom profile for thrust bearing, *Tribology International*, Vol. 109, pp. 69-77, 2017.
- [9] S. Hosseini, M.A. Najafabadi, M. Akhlagi, Classification of acoustic emission signals generated from journal bearing at different lubrication conditions based on wavelet analysis in combination with artificial neural network and genetic algorithm, *Tribology International*, Vol. 95, pp. 426-434, 2016.
- [10] C. K. Desai, D. C. Patel, Experimental analysis of pressure distribution of hydrodynamic journal bearing: a parametric study, *Proceedings of International Conference in Mechanical Engineering (ICME05)*, Dhaka Bangladesh, AM-30, pp. 1-4, 2005.
- [11] J. F. Szabo, Optimized gap shapes for sliding bearings, *Proceedings of 3rd World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*

که موجب انحناء سطح می‌گردد ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های کفگرد افزایش می‌یابد. در این پژوهش، برای به‌دست آوردن خواص نانوذرات اکسید آلومینیوم از دو دسته مدل، شامل سه مدل نظری و یک مدل آزمایشگاهی استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهند که اثرات انحنای سطوح ناشی از سایش در بهبود مشخصه‌های کاربردی یاتاقان‌ها از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. دلیل این امر آن است که اگرچه افزودن ذرات نانو باعث افزایش ظرفیت تحمل بار یاتاقان می‌شود، اما همچنین منجر به افزایش نیروی مماسی و در نتیجه کاهش سرعت سیال در جهت حرکت نسبی سطوح یاتاقان می‌شود. استفاده از مدل‌های انیشتین، برینکمن و بکلر برای تعیین ضریب لزجت موثر نانوسیال که فقط تابعی از کسر حجمی نانوذرات است خطاهایی را به همراه دارد، زیرا این مدل‌ها اثرات دما و قطره‌های نانوذرات را در نظر نمی‌گیرند. ولی در مدل آزمایشگاهی که این اثرات در نظر گرفته شده‌است نتایج به‌دست آمده با نتایج مدل‌های نظری متفاوت است. بنابراین، این مقاله نشانگر وابستگی بیشتر حل به نتایج حاصل از تحلیل توأمان هندسه‌ی یاتاقان سایش‌یافته و مدل ریزساختار است. در این تحلیل توأمان، افزوده شدن نانوذرات ناشی از سایش در روغن پایه، باعث نمی‌شود افزایش چشمگیری در نیروی مماسی یاتاقان کشویی و نشت جانبی، مشاهده شود و بیان می‌کند که عموماً یاتاقان‌های کفگرد پس از گذشت مدت‌زمانی از شروع کارکرد، خصوصیات کاربردی بهتری نشان می‌دهند. نتیجه‌ی دیگر از پژوهش حاضر این است که اثر برهم‌نهی نانوسیال و سایش سطح (صرفنظر از نوع مدل ریزساختار استفاده شده) سبب کاهش حساسیت یاتاقان کشویی، به مقادیر بیشتر نسبت ضخامت بهینه شده‌است. به عنوان یک پیشنهاد می‌توان نسبت ضخامت در یاتاقان‌های کفگرد هیدرودینامیکی را در هنگام ساخت بیشتر از نسبت ضخامت بهینه، طراحی کرد تا اثرات کارکرد و سایش یاتاقان، عملکرد آنرا بهبود بخشد و طول عمر یاتاقان افزایش یابد. می‌توان نتیجه گرفت که برای تعیین مشخصه‌های کاربردی یاتاقان‌ها، مدل‌های آزمایشگاهی که شامل در نظرگیری اثرات بیشتری هستند دقیق‌تر می‌باشند.

7- تقدیر و تشکر

تحقیق فوق بر گرفته از طرح پژوهشی «دینامیک سیالات محاسباتی با حل عددی شبکه بولتزمن به روش مربعات تفاضلی» می‌باشد که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) به اجرا در آمده است. نویسندگان مراتب

- conductivity and viscosity of ZnO nanofluid and development of new correlations, *Transport Phenomena in Nano-Micro Scale*, Vol. 2, No. 2, pp. 149-160, 2014.
- [26] M. Chandrasekar, S. Suresh, A.C. Bose, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al_2O_3 /water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, No. 2, pp. 210-216, 2010.
- [27] A. Breki, M. Nosonovsky, Einstein's Viscosity Equation for Nanolubricated Friction, *Langmuir*, Vol. 34, No. 43, pp. 12968-12973, 2018.
- [28] I. H. A. Razak, M. A. Ahmad, N. N. N. A. Fuad, The Effects of Palm Oil with Nanoclay Additive in Hydrodynamic Journal Bearing Lubrication, *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 5936-5942, 2019.
- [29] P. C. Nalam, A. Sheehan, M. Han, R. M. E. Espinosa-Marzal, Effects of Nanoscale Roughness on the Lubricious Behavior of an Ionic Liquid, *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 7, No. 17, pp. 2000314(1-11), 2020.
- [30] H. Sadabadi, A. S. Nezhad, Nano fluids for Performance Improvement of Heavy Machinery Journal Bearings: A Simulation study, *Nanomaterials*, Vol. 10, No. 11, pp. 2120(1-13), 2020.
- [31] M. F. B. Abdollah, H. Amiriddin, M. A. Azmi, N. A. M. Tahir, Lubrication mechanisms of hexagonal boron nitride nano-additives water-based lubricant for steel-steel contact, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, DOI: 10.1177/1350650120940173, 2020.
- [32] N. Dolatabadi, R. Rahmani, H. Rahnejat, C. P. Garner, C. Brunton, Performance of Poly Alpha Olefin Nanolubricant, *Lubricants*, Vol. 8, No. 2, pp.17(1-18),2020.
- [33] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, P. Nithiarasu, *The Finite Element Method for Fluid Dynamics*, 6th Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [34] O.C. Zienkiewicz, R. Codina, A General Algorithm for Compressible and Incompressible Flow-Part I. The Split, Characteristic-Based Scheme, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 20, pp. 869-885, 1995.
- [35] M. Najafi, A. Arefmanesh, V. Enjilela, Meshless Local Petrov-Galerkin Method-Higher Reynolds Numbers Fluid Flow Applications, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 36, pp. 1671-1685, 2012.
- [36] S. M. Abedi, S. M. H. Seyedkashi, Kh. Khalili, A. Ashrafi, Experimental and Numerical Study of Double Y-Shaped Hydroforming Using Analysis of Variance Method, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 7, pp. 34-41, 2019. (in Persian فارسی)
- [37] A. Tajyar, Investigating the effect of different parameters on the occurrence of collapse defect in re-shape rolling of circular pipe into a square tube, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. (WCSMO-3), Buffalo, USA, Vol. 2, pp. 484-486, 1999.
- [12] N. Tala-Ighil N, P. Maspeyrot, M. Fillon, A. Bounif Effect of surface texture on journal-bearing characteristics under steady-state operating conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 221, No. 6, pp. 623-633, 2007.
- [13] H. E. Rasheed, Effect of surface waviness on the hydrodynamic lubrication of a plain cylindrical sliding element bearing, *Wear*, Vol. 223, No. 1, pp. 1-6, 1998.
- [14] M. Ghorbani, M. R. Movahhedy, Investigating the effect of sculptured surface curvatures on milling forces, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 6, pp. 34- 43, 2019. (in Persian فارسی)
- [15] E. S. Prasad, T. Negarajn, J. P. Sagar, Thermohydrodynamic performance of a journal bearing with 3D-surface roughness and fluid inertia effect, *International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering (IJARME)*, Vol. 1, No. 4, pp. 243-249, 2012.
- [16] M. Dobrica, M. Fillon, Reynolds' model suitability in simulating Rayleigh step bearing thermohydrodynamic problems, *Tribology Transactions*, Vol. 48, pp. 522-530, 2005.
- [17] W. Ochonsky, Sliding bearings lubricated with magnetic fluids, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 59, No. 6, pp. 252-265, 2007.
- [18] O. Pourmehran, M. Rahimi-Gorji, M. Gorji-Bandpey, M. Baou, Comparison between the volumetric flow rate and pressure distribution for different kinds of sliding thrust bearing. *Propulsion and power research*, Vol. 4, No. 2, pp. 84-90, 2015.
- [19] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Investigations of thermal conductivity and viscosity of nano fluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, No. 5, pp. 560-568, 2008.
- [20] A. Einstein, N.B.D. Eine, Moleküldimensionen, *Annals of Physics*, Vol. 324, pp. 289-306, 1906.
- [21] H. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, pp. 571, 1952.
- [22] G. Batchelor, The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 83, pp. 97-117, 1977.
- [23] S. Suresh, K. P. Venkitaraj, P. Selvakumar, M. Chandrasekar, Synthesis of Al_2O_3 -Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 388, pp. 41-48, 2011.
- [24] B. Takabi, H. Shokouhmand, Effects of Al_2O_3 -Cu/water hybrid nanofluid on heat transfer and flow characteristics in turbulent regime, *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 26, No. 4, 2015.
- [25] S. Akbarzadeh, M. Farhadi, K. Sedighi, M. Ebrahimi, Experimental investigation on the thermal

- [40] L. Rapoport, Y. Feldman, M. Homyonfer, H. Cohen, J. Sloan, J.L. Hutchison, R. Tenne, Inorganic Fullerene-like material as additives to lubricants: structure–function relationship, *Wear*, Vol. 225–229, No. 2, pp. 975-982, 1999.
- [41] S. Kalakada, P. Kumarapillai, R. Perikinalil, Analysis of static and dynamic performance characteristics of THD journal bearing operating under lubricants containing nanoparticles, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, pp. 1869-1876, 2012.
- 6, No. 4, pp. 14-22, 2019. (in Persian فارسی)
- [38] L. Rapoport, M. Lvovsky, I. Lapsker, W. Leshchinsky, Yu. Volovik, Y. Feldman, R. Tenne, Friction and wear of Bronze powder composites Fullerene-like WS_2 , nanoparticles, *Wear*, Vol. 249, pp. 150-157, 2001.
- [39] L. Rapoport, V. Leshchinsky, M. Lvovsky, I. Lapsker, Yu. Volovik, Y. Feldman, R. Popovitz-Biro, R. Tenne, Superior tribological properties of powder materials with solid, lubricant nanoparticles, *Wear*, Vol. 255, pp. 794-800, 2003.