

تأثیر بکارگیری نانوروانکار حاوی ذرات  $TiO_2$  بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دولبابوالفضل رسولی‌زاده شورکی<sup>۱</sup>، مهدی زارع مهرجردی<sup>۲\*</sup>، اصغر دشتی رحمت‌آبادی<sup>۳</sup> و رضا رشیدی میبدی<sup>۴</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اردکان<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه میبد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳

## چکیده

ظهور فناوری نانو و گسترش این شاخه از علم به حوزه روانکاری سبب شده‌است تا افزودن نانومواد به روانکارهای پایه از جمله به‌روزترین راه‌کارهایی باشد که پژوهشگران حوزه تریبولوژی جهت بهبود عملکرد تکیه‌گاه‌های یاتاقانی پیشنهاد داده‌اند. در پژوهش حاضر اثر غلظت نانوذرات  $TiO_2$  ترکیبی با روغن پایه SAE30 بر مشخصه‌های عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی دولب مورد بررسی قرار گرفته‌است. بدین منظور، پس از بازنویسی معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقان با نانوسیال، مسیر جابجایی روتور با فرض حرکت اغتشاشی هارمونیک در قالب مدل دینامیکی خطی جهت تعیین وضعیت پایداری یاتاقان بکار گرفته شده‌است. در نهایت مشخصه‌های عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی یاتاقان به‌ازای مقادیر مختلف غلظت نانوذرات در روانکار پایه بر حسب میزان غیرمُدوری یاتاقان به‌کمک روش اجزاء محدود استخراج گردیده‌اند. نتایج، گویای بهبود مشخصه‌های عملکرد استاتیکی و دینامیکی یاتاقان‌های دولب، شامل افزایش قابلیت حمل بار، کاهش نیروی اصطکاک، افزایش جرم بحرانی و کاهش نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور با افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در روانکار پایه بویژه برای مقادیر درصد حجمی کمتر از ۰/۰۲ بوده و با کاهش غیرمُدوری یاتاقان دامنه این تغییرات تقویت می‌گردند.

**کلمات کلیدی:** یاتاقان ژورنال دولب؛ پایداری دینامیکی؛ نانوروانکار؛ دی‌اکسید تیتانیوم؛ روش اجزاء محدود

### Effect of Using Nano Lubricant Containing $TiO_2$ Particles on the Performance of Noncircular Two Lobe Journal Bearings

Abolfazl Rasoolizadeh Shooroki<sup>1</sup>, Mahdi Zare Mehrjardi<sup>2\*</sup>, Asghar Dashti Rahmatabadi<sup>3</sup> and Reza Rashidi Meybodi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Yazd University<sup>2</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Ardakan University<sup>3</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Yazd University<sup>4</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Meybod University

## Abstract

Development of nanotechnology and related sciences in the field of lubrication has led to applying nanoparticles in combination of the common lubricants as one of the most new solutions proposed by the tribology researchers to improve the performance of this type of support systems. In this study, the effect of  $TiO_2$  nanoparticles concentration combined with the base SAE30 oil on the steady state and dynamic stability performance of hydrodynamic two lobe journal bearings is investigated. For this purpose, after modifying the governing Reynolds equation of hydrodynamic lubrication using nanofluid theory and assuming the harmonic limit cycle oscillation of the rotor center around the static equilibrium point based on the linear dynamic model, the stability performance of two lobe bearings are analyzed. Finally, the static and dynamic stability characteristics for different concentration of the nanoparticle according to the bearing noncircularity are obtained using the finite element method (FEM). The results show that the static and stability performance parameters of the noncircular two lobe bearings, including the load carrying capacity, coefficient of friction, critical mass of the rotor and the whirl frequency ratio improve by increasing the concentration of  $TiO_2$  nanoparticles added to the base oil, especially for solid volume fraction less than 0.02% and the magnitude of performance variations is also amplified by reducing the amount of bearings noncircularity.

**Keywords:** Two Lobe Journal Bearing, Dynamic Stability, NanoLubricant,  $TiO_2$ , Finite Element Method

## ۱- مقدمه

با توجه به توسعه فزاینده بکارگیری یاتاقان‌های ژورنال به‌عنوان تکیه‌گاه اجزاء دوار در ماشین‌آلات صنعتی و سیستم‌های غیر صنعتی، بهبود شاخص‌های رفتاری این اجزای تکیه‌گاهی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گاهی وجود عواملی چون عدم تعادل، ناپایداری روتور دوار در سرعت‌های بالا و بحرانی و وجود محدودیت‌های فضایی سبب می‌شود تا نیاز به بهبود عملکرد مجموعه یاتاقان ژورنال-روتور احساس گردد. دو مشخصه ضخامت فیلم سیال روانکار و ویژگی‌های روغن مورد استفاده، از پارامترهای تعیین‌کننده در عملکرد مجموعه می‌باشند که با بکارگیری اشکال هندسی متفاوت یاتاقان و روانکارهای نو ترکیب می‌توان به عملکرد بهینه این گروه از سیستم‌های تکیه‌گاهی دست یافت.

معرفی یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور اولین بار توسط پینکاس [۱] صورت گرفت. این پژوهشگر طی تحقیقات آزمایشگاهی خود، کیفیت پایداری یاتاقان‌های ژورنال کفشک لولایی نسبت به یاتاقان‌های بیضوی، سه‌لب و شیار محوری را گزارش کرد. از آن سال به بعد پژوهش‌های گسترده‌ای در این حوزه تحقیقاتی جهت بهبود عملکرد سیستم‌های تکیه‌گاهی صورت گرفته‌است که هر یک را می‌توان به‌نحوی مکمل پژوهش‌های قبل از خود دانست. در همین راستا، مالک [۲] با بکارگیری روش حل عددی اجزاء محدود، عملکرد دینامیکی و استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور بیضوی، آفست-هالوز و دو نوع دیگر از یاتاقان‌های دولب را مورد بررسی قرار داد. از بررسی نتایج این تحلیل مشاهده می‌گردد که قابلیت حمل بار در یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور بیضوی از سه نوع دیگر بیشتر بوده و با افزایش میزان نسبت خروج از مرکزی در انواع یاتاقان‌های غیرمُدور دولب، تفاوت در میزان حمل بار آنها کاهش می‌یابد؛ همچنین، در حالت کلی، مناسب‌ترین ضرایب سفتی و میرایی فیلم سیال روانکار در یاتاقان‌های دولب با زاویه خط‌المرکزین ۳۰ درجه‌ای تشکیل شده مابین محور افقی و خط واصل مراکز هندسی یاتاقان و روتور دوار نسبت به یاتاقان‌های دیگر قابل مشاهده است. مطالعه‌ای بر عملکرد پایدار هم‌دمای یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور لب‌دار تحت روانکاری با سیال میکروپلار توسط زارع مهرجردی و همکاران

## [۳] صورت گرفت.

در این پژوهش تأثیر پارامترهای طراحی همچون میزان غیرمُدوری و مشخصه‌های سیال میکروپلار بر نسبت فرکانس چرخش گردابی<sup>۱</sup> و جرم بحرانی<sup>۲</sup> در یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دو، سه و چهارلب مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج این پژوهش بیانگر آنست که در این یاتاقان‌ها، کاهش میزان غیرمُدوری کاهش جرم بحرانی و افزایش فرکانس گردابی نوسانات اغتشاشی مرکز روتور را به‌دنبال دارد. اثر مکان شیارهای محوری و نسبت طول به عرض یاتاقان‌های ژورنال مُدور بر مشخصه‌های پایداری مجموعه توسط دوویدیا و پاتهاک [۴] مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که ظرفیت حمل بار بی‌بعد با افزایش نسبت امتداد شیار به طول یاتاقان، افزایش می‌یابد؛ در حالی که این پارامتر با افزایش نسبت عرض شیار به قطر یاتاقان روند کاهشی خواهد داشت؛ همچنین، نتیجه‌گیری شده‌است که موقعیت شیارها با توجه به خط بار به‌دلیل تداخل شدید شیارها در میدان فشار هیدرودینامیکی، بر اکثر پارامترهای عملکرد استاتیکی و دینامیکی یاتاقان تأثیر می‌گذارد. مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال مُدور روانکاری شده با آب، تحت تأثیر ناهمراستایی<sup>۳</sup> روتور و پوسته و در نظر گرفتن اثرات حرارت و آشفستگی<sup>۴</sup> توسط فنک و همکاران [۵] بررسی شد.

ظرفیت حمل بار، آفت قدرت اصطکاکی، نرخ جریان، توزیع فشار صفحه میانی راستای طولی یاتاقان و ضرایب دینامیکی فیلم سیال بر حسب پارامترهای مختلف، از جمله مشخصه‌های عملکرد یاتاقانی هستند که در این تحقیق بررسی شده‌اند. براساس نتایج بروز آشفستگی برخلاف افزایش دما، ظرفیت حمل بار یاتاقان را بهبود می‌بخشد. تجزیه و تحلیل پایداری دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دولب با رژیم روانکاری تنش کوپل توسط زارع مهرجردی [۶] صورت گرفت. در این تحقیق، مشخصات حالت پایدار یاتاقان‌ها، از جمله ظرفیت حمل بار و زاویه وضعی، برای مقادیر مختلف پارامتر تنش مزدوج تعیین شده‌است. نتایج، نشان می‌دهند که استفاده از مایع تنش کوپل از نظر افزایش ظرفیت حمل بار و کاهش زاویه وضعی مابین محور عمودی و خط واصل مراکز هندسی یاتاقان و روتور دوار، کارایی یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دولب را بهبود

<sup>3</sup> Misaligned<sup>4</sup> Turbulent<sup>1</sup> Whirl Frequency Ratio<sup>2</sup> Critical Mass

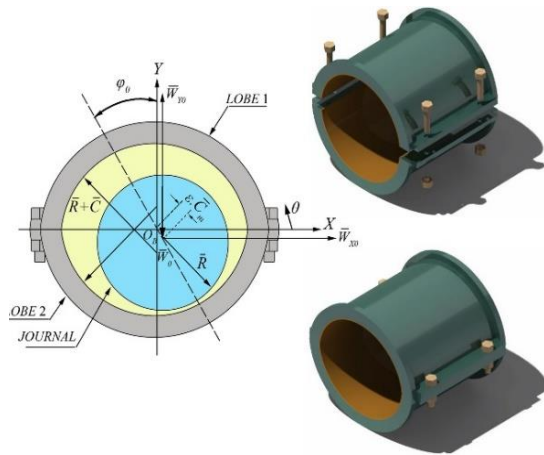
ژورنال مُدور تحت روانکاری با سیال نانو در مقایسه با روانکار پایه حکایت دارد. بررسی عملکرد دینامیکی یاتاقان‌هایی با طول محدود و تحت روانکاری با روغن شامل نانوذرات دی اکسید تیتانیوم توسط بینو و همکاران [۱۰] صورت گرفت. در این پژوهش، تغییرات لزجت روغن با تغییر در غلظت نانوذرات با استفاده از مدل کرایگر-دوگرتی منظور گردید. همچنین، معادله رینولدز تعمیم یافته جهت حصول فشار و ضرایب دینامیکی با استفاده از روش اغتشاش خطی تحلیل گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که با افزایش غلظت نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در روانکار پایه یاتاقان‌های ژورنال مُدور، ضرایب سفتی و میرایی فیلم سیال افزایش یافته و یک بهبود نسبی برای ناپایداری چرخشی روتور ایجاد می‌شود. تحلیل یاتاقان‌های ژورنال فیلم نازک با بکارگیری نانوذرات افزوده شده به روانکار توسط راتو و همکاران [۱۱] صورت گرفت. نتایج این پژوهش از کاهش ضریب اصطکاک و افزایش بار قابل حمل یاتاقان‌های مورد بررسی حکایت دارد. اثر افزودن نانوذرات  $TiO_2$  به روغن پایه بر عملکرد تریبولوژیکی یاتاقان‌های ژورنال مُدور و بیضوی توسط ساریاوانشی و پاتیوار [۱۲] بررسی گردید. در این پژوهش که در سرعت‌های 500-1000 rpm برای روتور دوار و بارگذاری 1000 N انجام شد، نتایج گویای این واقعیت است که بکارگیری یاتاقان بیضوی، عملکرد سیستم را نسبت به یاتاقان ساده با روانکار مشابه، بهبود می‌بخشد. ساریاوانشی و پاتیوار [۱۳] به بررسی تجربی اثر شکل هندسی یاتاقان و نانوذرات  $TiO_2$  افزوده شده به روانکار بر عملکرد حالت گذرای یاتاقان‌های ژورنال مُدور و غیرمُدور بیضوی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که یاتاقان ژورنال غیرمُدور بیضوی عملکردی بهینه نسبت به یاتاقان ساده در شرایط کاری مشابه دارد. بررسی اثر نانوذرات جامد موجود در روانکار یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی مُدور بر عملکرد دینامیکی مجموعه توسط همزه و همکاران [۱۴] صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که از روان‌کننده نانوسیال می‌توان جهت بهبود پارامترهای عملکرد استاتیکی و دینامیکی ماشین‌آلات چرخان از جمله توزیع فشار، زاویه وضعی راستای مرکز روتور، میزان بار قابل حمل، نیرو و ضریب اصطکاک، ضرایب میرایی و سفتی فیلم روانکار و سرعت بحرانی روتور

می‌بخشد؛ همچنین در این تحقیق، عملکرد پایداری یاتاقان‌های مورد بررسی با استفاده از معادلات حرکت روتور بر اساس روش‌های دینامیکی خطی و غیرخطی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج گویای آن است که هر گونه افزایش در پارامتر تنش زوج روان‌کننده، توانایی یاتاقان را در میرایی اغتشاشات روتور افزایش می‌دهد. علاوه بر این، تأثیر تغییر خواص روانکار بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دو لب در مقادیر بالاتر پارامتر تنش مزدوج، به‌ویژه با افزایش میزان غیرمُدوری یاتاقان، بارزتر است. همچنین اثر ناهمراستایی روتور و پوسته یاتاقان بر پایداری یاتاقان‌های ژورنال با عرض محدود توسط عبود و صابر [۷] بررسی شد. در این پژوهش، آنالیز ارتعاشات روتور جهت حصول محدوده پایداری در شرایط کاری گوناگون، استفاده گردیده و گزارش شده که پایداری بحرانی با کاهش زاویه ناهمراستایی روتور و پوسته و یا افزایش خروج از مرکزی روتور، بهبود می‌یابد.

یکی دیگر از روش‌های بهبود مشخصه‌های عملکرد یاتاقان‌های ژورنال، تغییر در لزجت روانکارهای بکار گرفته شده است. استفاده از سیالات نانو در روانکاری یاتاقان‌های ژورنال از جمله روش‌هاست که پژوهشگران حوزه روانکاری جهت بهبود عملکرد سیستم‌های تکیه‌گاهی بکار می‌گیرند. در روانکارهای نانو با اضافه کردن ذرات به روغن‌های پایه می‌توان تغییراتی در خصوصیات ترموفیزیکی از جمله لزجت، چگالی، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمای ویژه روغن ایجاد و عملکرد مجموعه را تغییر داد. در راستای بکارگیری سیالات نانو در روانکاری یاتاقان‌های ژورنال، شنوی و همکاران [۸] به بررسی اثر افزودن نانوذرات اکسید مس<sup>۱</sup>، دی‌اکسید تیتانیوم<sup>۲</sup> و نانوذرات الماس<sup>۳</sup> بر عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال مُدور با روغن API-SF پرداختند.

نتایج این پژوهش بیانگر بهبود بار قابل حمل یاتاقان، کاهش نشتی جانبی و افزایش اصطکاک بین لایه‌های روانکار با تبدیل روغن به نانوروانکار می‌باشد. تجزیه و تحلیل عملکرد یاتاقان‌های ژورنال با سیالاتی شامل نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم با مدل ویسکوزیته کرایگر-دوگرتی<sup>۴</sup> و تنش مزدوج در معادله رینولدز توسط بینو و همکاران [۹] صورت گرفت. نتایج این پژوهش از بهبود چشم‌گیر میزان بار قابل حمل یاتاقان‌های

<sup>۳</sup> Nano-Diamond<sup>۴</sup> Krieger-Dougherty<sup>۱</sup> Copper-Oxide (CuO)<sup>۲</sup> Titanium-Oxide (TiO<sub>2</sub>)



شکل ۱- یاتاقان ژورنال غیرمُدور دوئب با مشخصات

هندسی

از دلایل بکارگیری یاتاقان ژورنال غیرمُدور دوئب به جای انواع مُدور در سیستم‌های تکیه‌گاهی می‌توان به ایجاد شرایط مطلوب‌تر در خنک‌سازی محیط کارکرد، وجود دلایل فنی و شرایط فنی نیازمند وجود یاتاقان ژورنالی متشکل از دو قسمت و بهبود برخی از مشخصه‌های عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی مجموعه روتور و یاتاقان اشاره کرد.

## ۲-۲- نانو روانکارها

در سال‌های اخیر، استفاده از نانومواد با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، در روان‌کننده‌ها به دلیل بهبود خواص سطحی از جمله مقاومت در برابر سایش و اصطکاک، قابلیت بالا در انتقال حرارت و سازگاری اکثر این مواد با محیط زیست، به‌عنوان یک ایده‌ی نو مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه‌های مختلف قرار گرفته‌است. نانوروانکار عنوانی است که به یک سیال پایه حاوی نانوذرات معلق داده می‌شود. نانوذرات علاوه بر استفاده در زمینه تریبولوژی، برای اهداف پزشکی، فضایی و ایجاد کامپوزیت‌های متنوع نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶].

مواد افزودنی به روغن‌های پایه برای حفظ عملکرد کلی روان‌کننده‌ها مانند تشکیل فیلم، تثبیت لزجت، افزایش خاصیت ضد خوردگی، سایش و اصطکاک استفاده می‌شوند. مطالعات اخیر، پتانسیل مواد افزودنی نانوذرات را نشان می‌دهد که به‌طور قابل توجهی خصوصیات ترموفیزیکی و تریبولوژیکی روانکارهای پایه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

استفاده کرد. تأثیر درصد حجمی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم افزوده شده به روانکار پایه SAE30 بر مشخصه‌های عملکرد حالت پایدار یاتاقان‌های ژورنال مُدور بافت‌دار توسط رسولی‌زاده و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش از افزایش بیشینه فشار، قابلیت حمل بار و اصطکاک یاتاقان با افزایش حجم نانوذرات مؤثر بر لزجت نسبی روانکار و بالعکس، کاهش این مشخصه‌ها با افزایش عمق بافت‌های تعیین‌کننده ضخامت فیلم روغن محبوس در فضای یاتاقان حکایت دارد.

با مرور پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که عملکرد حالت پایدار و دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور تحت روانکاری با سیالات نانو تاکنون گزارش نشده و مراجع مرتبط غالباً به بررسی عملکرد یاتاقان‌های مُدور یا انواع دیگر روانکارها پرداخته‌اند؛ لذا در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا پارامترهای عملکرد حالت پایدار و مشخصه‌های رفتار دینامیکی تکیه‌گاه‌های یاتاقانی ژورنال دوئب با نانو روانکار  $TiO_2/SAE30$  ارزیابی گردد با کمک مدل تحلیلی دینامیک خطی و روش حل عددی اجزاء محدود ارائه گردد.

## ۲- تئوری

### ۲-۱- یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور

اختلاف این گروه از یاتاقان‌های ژورنال با انواع مُدور رایج، در نحوه توزیع لقی شعاعی می‌باشد. بر خلاف یاتاقان‌های ژورنال مُدور که میزان لقی شعاعی به‌هنگام قرارگیری مرکز روتور دوار و پوسته بر روی یکدیگر، در تمام نقاط یکسان است؛ در نوع غیرمُدور این لقی برای نقاط مختلف یاتاقان، مقادیر متفاوتی خواهد داشت. وجود لقی شعاعی متغیر در یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور، تغییرات ضخامت فیلم روانکار در نواحی مختلف یاتاقان را سبب شده و در پی آن نواحی فشار همگرا و واگرای متفاوتی در درون فیلم روانکار ایجاد می‌گردد. یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور که بسته به شرایط کارکرد، در اشکال مختلف، طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرند، از ترکیب تعدادی از یاتاقان‌های ژورنال جزئی با شرایط متنوع ایجاد می‌شوند. یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دوئب از انواع متداول یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدوری هستند که در موارد بسیار زیادی در مصارف صنعتی و غیرصنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختار هندسی یاتاقان ژورنال غیرمُدور دوئب به‌همراه مشخصات فنی آن در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

گرانروی با افزودن ذرات نانو، به تجمع ذرات در نانوروان کننده‌ها مرتبط بوده و از حرکت آسان لایه‌های مجاور روغن جلوگیری می‌کند. یکی از عوامل مؤثر بر تغییر لزجت نانوسیال روانکار، غلظت ذرات افزوده شده به آن می‌باشد. با افزودن نانوذرات در غلظت‌های مختلف به روغن پایه، لزجت سیال روانکار، مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرد که استخراج یک رابطه ریاضی جهت بیان لزجت نانوسیال تشکیل شده در غلظت‌های مختلف، موضوعی است که توجه پژوهشگران حوزه تریبولوژی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌است. روابط ریاضی متفاوتی جهت بیان لزجت نسبی نانوسیالات گوناگون بر پایه تعریف نسبت لزجت نانوسیال به لزجت روغن ( $\mu_{rel}$ ) پایه ( $\mu_{nf}/\mu_{bf}$ ) در غلظت‌های مختلف نانوذرات اضافه شده به روغن پایه روانکار بیان شده‌است. یکی از متداول‌ترین روابط بیان شده توسط پژوهشگران حوزه روانکاری، رابطه کرایگر-دوگرتی می‌باشد. بر اساس این رابطه، لزجت نسبی برای نانوسیال تشکیل شده از نانوذرات  $TiO_2$  و روغن پایه SAE 30 بر حسب درصد حجمی نانوذرات در مقادیر مختلف به صورت زیر بیان می‌شود [۹].

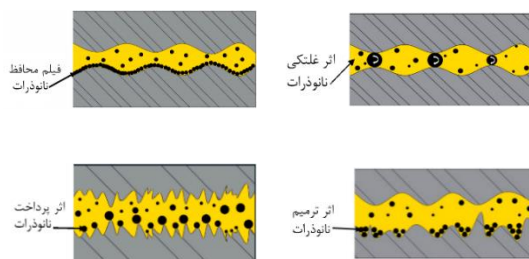
$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi}{0.605} (7.77)^{1.2}\right)^{-1.51} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، پارامتر  $\phi$  به درصد حجمی نانوذرات اضافه شده به روغن روانکار پایه اشاره دارد. با افزودن نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به روغن موتور SAE 30، نانوروانکاری تشکیل می‌شود که با تغییر درصد حجمی ذرات افزوده شده، غلظت‌های متفاوتی به خود می‌گیرد. با بکارگیری لزجت نسبی بیان شده مطابق رابطه (۱) در معادله رینولدز می‌توان اثر درصد حجمی نانوذرات  $TiO_2$  ترکیب شده با روغن SAE 30 پایه بر عملکرد سیستم یاتاقان‌های ژورنال را مورد بررسی قرار داد.

### ۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر روانکاری یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور با نانوسیال در ادامه تشریح شده‌اند.

خواص ترموفیزیکی<sup>۱</sup>، ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی نانو روانکارها را توصیف کرده و خواص تریبولوژیکی<sup>۲</sup>، کلیه فرآیندهای اصطکاکی بین دو جسم در حال تماس با یکدیگر را شامل می‌شوند. نانوذرات پراکنده در روغن پایه، با ساز و کارهای مختلفی مانند اثر غلتکی<sup>۳</sup>، اثر ترمیمی<sup>۴</sup>، تشکیل فیلم محافظ<sup>۵</sup> و اثر پرداخت<sup>۶</sup>، امکان بهبود خواص تریبولوژیکی روان کننده‌های پایه شامل ضریب اصطکاک و خاصیت ضد سایش را فراهم می‌آورند [۱۷]. شکل ۲، نحوه اثرگذاری ذرات نانو بر مشخصه‌های تریبولوژیکی سطوح روانکاری شده توسط روغن نانو را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- اثر ذرات نانو بر مشخصه‌های تریبولوژیکی سطوح روانکاری شده [۱۶]

اما در کنار این موضوع که ترکیب ذرات نانو با روانکارهای پایه در بسیاری از کاربردها سبب بهبود عملکرد سیستم خواهد شد؛ عواملی همچون عدم توافق نتایج به دست آمده توسط محققان مختلف، مشخصات ضعیف تعلیق‌ها و عدم درک نظری از مکانیسم‌های مؤثر بر تغییرات خواص، توسعه این تکنولوژی را با موانع مواجه کرده‌است. از چالش‌های موجود برای توسعه فزاینده نانوروانکارها در صنعت می‌توان به مواردی همچون پایداری طولانی مدت پراکندگی نانوذرات، ویسکوزیته بالاتر، حرارت ویژه پایین‌تر، عدم پیش‌بینی صحیح هدایت حرارتی، هزینه بالای تولید نانوسیال‌ها و موانع موجود در فرآیند تولید، پیشگیری از آلودگی شدن و رسوب‌گذاری و صرفه اقتصادی [۱۸] اشاره کرد.

لزجت سیالات نانو که از خصوصیات ترموفیزیکی آنها محسوب می‌شود، تعیین‌کننده نیروی برشی بین لایه‌های مجاور سیال و مسئول اصطکاک ایجاد شده می‌باشد. افزایش

<sup>4</sup> Mending Effect  
<sup>5</sup> Protective Film Formation  
<sup>6</sup> Polishing Effect

<sup>1</sup> Thermophysical Properties  
<sup>2</sup> Tribological Properties  
<sup>3</sup> Ball Bearing Effect

### ۳-۱- معادله رینولدز

معادله رینولدز بی‌بعد حاکم بر روانکاری هیدرودینامیکی یاتاقان ژورنال با فرض شرایط هم‌دما، تراکم‌ناپذیری سیال روانکار و همراستایی روتور صلب و پوسته یاتاقان، به صورت ذیل بیان می‌گردد [۱۹].

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \bar{h}_n^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \bar{h}_n^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right] = 6\mu_{rel} \frac{\partial \bar{h}_n}{\partial \theta} + 12\mu_{rel} \frac{\partial \bar{h}_n}{\partial \tau} \quad (2)$$

در معادله فوق،  $\bar{P}$  فشار بی‌بعد توزیعی در فیلم سیال روانکار و  $\mu_{rel}$  معرف لزجت نسبی نانوروانکار ترکیبی است. پارامترهای بی‌بعد معادله (۲) به صورت زیر قابل تعریف هستند.

$$\theta = \frac{x}{R}, \quad \bar{z} = \frac{z}{L/2}, \quad \bar{P} = \frac{C_m^2}{\mu_{bf}\omega R^2} P, \quad (3)$$

$$\bar{h}_n = \frac{h_n}{C_m}, \quad u = R\omega, \quad \tau = t\omega$$

همچنین در رابطه (۲)،  $\bar{h}_n$  نشان‌دهنده ضخامت فیلم سیال قرار گرفته مابین روتور و پوسته در هر نقطه از محیط پیرامون یاتاقان غیرمُدور دولب بوده که با توجه به شکل ۱ به فرم رابطه ذیل قابل تعریف است [۱۹].

$$\bar{h}_n = \frac{h_n}{C_m} = \left( \frac{1}{\delta} - \frac{X_j}{C_m} \cos \theta - \frac{Y_j}{C_m} \sin \theta + \left( \frac{1}{\delta} - 1 \right) \cos(\theta - \theta_0^n) \right) \quad (4)$$

در رابطه فوق، اندیس n معرف شماره لب‌های یاتاقان ژورنال غیرمُدور بوده و پارامترهای  $X_j, Y_j$  موقعیت مرکز ژورنال در وضعیت تعادل استاتیکی نسبت به محورهای مختصات و  $\theta_0^n$  زاویه خط‌المركزین لب‌های یاتاقان نسبت به محور X را نشان می‌دهند؛ همچنین پارامتر  $\delta$  بیانگر میزان غیرمُدوری یاتاقان بوده و به صورت نسبت لقی شعاعی کمینه ( $C_m$ ) به بیشینه لقی شعاعی متغیر (C)، هنگام هم‌مرکزی یاتاقان و محور تعریف می‌شود.

### ۳-۲- مشخصه‌های عملکرد استاتیکی یاتاقان

#### الف) بار قابل حمل توسط یاتاقان

مؤلفه‌های بار قابل حمل توسط یاتاقان در راستای محورهای مختصات از رابطه (۵) قابل محاسبه است [۲۰].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{W}_{X0} \\ \bar{W}_{Y0} \end{bmatrix} &= \sum_{n=1}^N \begin{bmatrix} \bar{W}_{X0}^n \\ \bar{W}_{Y0}^n \end{bmatrix} \\ &= \sum_{n=1}^N \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \int_{-1}^{+1} \bar{P}_{0n} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} d\bar{z} d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

لذا برآیند کلی بار قابل حمل توسط یاتاقان عبارتست از:

$$\bar{W}_0 = \frac{2C_m^2}{\mu_{bf}\omega R^3 L} W_0 = \sqrt{\bar{W}_{0x}^2 + \bar{W}_{0y}^2} \quad (6)$$

#### ب) زاویه وضعی

مقدار زاویه وضعی در یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دولب با توجه به تعادل استاتیکی مرکز روتور جهت رسیدن به بار برآیند عمودی از رابطه (۷) قابل محاسبه است [۲۰].

$$\varphi_0 = \text{Arc tan} \left( -\frac{X_{J0}}{Y_{J0}} \right) \quad (7)$$

#### ج) نیروی اصطکاک تولیدی در یاتاقان

نیروی اصطکاک ایجاد شده در یاتاقان ناشی از تنش برشی مابین لایه‌های فیلم روانکار رابطه (۸) تعیین می‌گردد [۲۰].

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \frac{2C_m}{\mu_{bf}\omega R^2 L} F \\ &= \sum_{n=1}^N \int_{-1}^1 \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \left( \frac{\bar{h}_0}{2} \frac{\partial \bar{P}_{0n}}{\partial \theta} + \frac{\mu_{rel}}{\bar{h}_0} \right) d\theta d\bar{z} \end{aligned} \quad (8)$$

همچنین متغیر ضریب اصطکاک یاتاقان را می‌توان از رابطه  $f = \frac{\bar{F}}{W_0} \left( \frac{R}{C_m} \right)$  به دست آورد.

### ۳-۳- تحلیل رفتار دینامیکی یاتاقان با مدل خطی

با توجه به شبیه‌سازی اغتشاشات حرکتی مرکز روتور به صورت نوسانات حلقه بسته با دامنه محدود مطابق شکل ۳ در مدل تحلیلی خطی، مؤلفه‌های جابجایی مرکز روتور در راستای محورهای مختصات عبارتند از [۶]:

$$\bar{X}' = \text{Re}(|\bar{X}'|e^{j\gamma\tau}), \quad \bar{Y}' = \text{Re}(|\bar{Y}'|e^{j\gamma\tau}) \quad (9)$$

در این رابطه  $X'$  و  $Y'$  مؤلفه‌های جابجایی اغتشاشی مرکز روتور در راستای محورهای مختصات منطبق بر نقطه تعادل استاتیکی مرکز روتور بوده و  $|\bar{X}'|$  و  $|\bar{Y}'|$  به دامنه این مؤلفه‌ها اشاره دارند.  $\text{Re}$  نشان‌دهنده بخش حقیقی کمیت‌های داخل پرانتز و  $\gamma$  بیانگر  $\sqrt{-1}$  است. همچنین،  $\gamma$  که نسبت فرکانس چرخش گردابی نامیده می‌شود، بیانگر نسبت سرعت زاویه‌ای

بر اساس معیار گالرکین، توابع شکل  $N_i$  نقش توابع وزنی  $W$  را ایفا کرده و لذا می‌توان رابطه (۱۳) را به صورت زیر نوشت.

$$\iint_{A_e} RN_i dA = 0 \quad (14)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

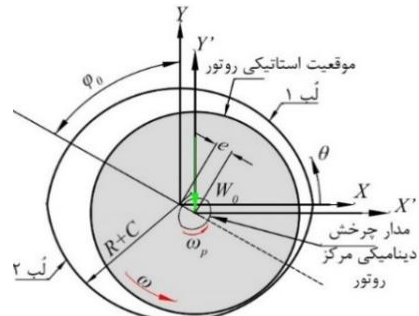
معادله (۱۴)، منجر به  $n$  معادله می‌شود که بدون توجه به شرایط مرزی، به نقاط مرتبط با دامنه مش‌بندی شده مساله قابل اعمال است. به منظور اعمال شرایط مرزی، انتگرال‌گیری جزء به جزء را به معادله (۱۴) اعمال نموده تا انتگرال‌های قابل اعمال به المان مورد نظر و مرز آن حاصل شوند. در کار حاضر از المان‌های مستطیلی چهار گرهی ایزوپارامتریک در شبکه بندی دامنه مساله استفاده می‌شود.

معادله فشار دینامیکی (۱۰)، معادله‌ای خطی و مختلط بوده و روابط بازنویسی شده آن بر اساس روش حل عددی اجزای محدود نیز مختلط هستند. تشکیل فرم انتگرالی معادله دیفرانسیل مورد بررسی جهت دستیابی به فرم ضعیف شده آن در فضای دوبعدی به صورت زیر انجام می‌گیرد.

$$\iint_{A_e} \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \bar{h}_0^3 \frac{\partial \bar{P}'_I}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[ \bar{h}_0^3 \frac{\partial \bar{P}'_I}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \left[ 3\bar{h}_0^2 \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial \theta} - 6\mu_{rel} \right] f(\theta) \right\} - \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[ 3\bar{h}_0^2 f(\theta) \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial z} \right] + 12j\gamma\mu_{rel} f(\theta) \right\} N_k^e d\theta dz = 0 \quad (15)$$

در رابطه فوق  $\bar{P}'_I$  به مؤلفه‌های فشار دینامیکی  $(\bar{P}'_X, \bar{P}'_Y)$ ،  $A_e$  به سطح المان‌های دامنه مسأله و  $N_k^e$  به توابع شکل منتخب روی هر المان اشاره دارند؛ همچنین  $\bar{h}_0$  ضخامت فیلم سیال روانکار در شرایط استاتیکی روتور را نشان می‌دهد. فرم کلی معادلات حاکم بر پایه روش حل عددی اجزای محدود با فرض مقادیر تقریبی برای مؤلفه‌های فشار دینامیکی روی هر المان از دامنه مش‌بندی شده مسأله بصورت  $\bar{P}'_I = \sum_{m=1}^{n_e} N_m^e \bar{P}'_{Im}$  و جایگذاری در رابطه (۱۵) حاصل می‌گردد. در این رابطه  $e$  به یک المان خاص،  $n_e$  تعداد گره‌های آن المان،  $N_m^e$  توابع شکل و  $\bar{P}'_{Im}$  به مقدار گرهی تابع توزیع فشار دینامیکی اشاره دارند. با انتگرال‌گیری جزء به جزء از معادله (۱۵)، امکان انتقال مشتقات از متغیرهای اصلی معادله به توابع تقریب و سپس محاسبه فشار دینامیکی بر روی دامنه مسأله فراهم خواهد شد.

حرکت اغتشاشی مرکز محور حول نقطه تعادل استاتیکی  $(\omega_p)$  به سرعت زاویه‌ای چرخش روتور حول محور طولی  $(\omega)$  خود است. مقادیر مؤلفه‌های فشار دینامیکی  $(P'_X, P'_Y)$  روی دامنه مساله، با مشتق‌گیری از فرم بی‌بعد معادله رینولدز رابطه (۲) نسبت به مؤلفه‌های مختصات دینامیکی  $(X', Y')$  و برابر با صفر قرار دادن  $X'$  و  $Y'$  در معادلات حاصل، به فرم رابطه (۱۰) قابل محاسبه‌اند [۶].



شکل ۳- مدار جابجایی اغتشاشی مرکز روتور در فضای یاتاقان ژورنال غیرمُدور بر پایه مدل دینامیکی خطی

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \bar{h}_0^3 \frac{\partial \bar{P}'_I}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[ \bar{h}_0^3 \frac{\partial \bar{P}'_I}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \left[ 3\bar{h}_0^2 \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial \theta} - 6\mu_{rel} \right] f(\theta) \right\} + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[ 3\bar{h}_0^2 f(\theta) \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial z} \right] - 12j\gamma\mu_{rel} f(\theta) \quad (10)$$

پارامترهای  $\bar{P}'_I$  و  $f(\theta)$  در معادله بالا عبارتند از:

$$\bar{P}'_I = \bar{P}_I + j\gamma\bar{P}_I \quad , \quad I = X, Y \quad (11)$$

$$f(\theta) = \begin{cases} \cos\theta & \text{برای } \bar{P}'_X \\ \sin\theta & \text{برای } \bar{P}'_Y \end{cases} \quad (12)$$

در پژوهش حاضر از روش حل عددی اجزاء محدود بر پایه مدل گالرکین جهت حل معادلات حاکم بر روانکاری یاتاقان ژورنال غیرمُدور دولب با کُدنویسی در نرم‌افزار فُترن استفاده شده‌است [۱۹].

در مسائلی که توسط معادله دیفرانسیل  $R$  قابل تعریف‌اند، با بکارگیری روش‌های باقیمانده وزنی، انتگرال باقی‌مانده وزنی به شکل زیر بیان می‌شود که در آن  $W$  تابع وزنی است.

$$\iint_{A_e} RW dA = 0 \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta F}_X \\ \overline{\Delta F}_Y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \overline{S}_{XX} & \overline{S}_{XY} \\ \overline{S}_{YX} & \overline{S}_{YY} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{X}' \\ \overline{Y}' \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{B}_{XX} & \overline{B}_{XY} \\ \overline{B}_{YX} & \overline{B}_{YY} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{\ddot{X}}' \\ \overline{\ddot{Y}}' \end{Bmatrix} \quad (18)$$

در رابطه فوق پارامترهای  $i, j = X, Y$ ;  $\overline{S}_{ij}, \overline{B}_{ij}$  معرف ضرایب سفتی و میرایی فیلم روانکار در حالت دینامیکی هستند. با فراخوانی روابط (۵)، (۱۶) و (۱۸) و جداسازی متغیرها، صورت بی‌بعد مؤلفه‌های سفتی و میرایی معادل فیلم سیال روانکار مطابق روابط ذیل حاصل می‌گردند.

$$\begin{bmatrix} \overline{S}_{XX} & \overline{S}_{XY} \\ \overline{S}_{YX} & \overline{S}_{YY} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \int_{-1}^{+1} \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \begin{bmatrix} \overline{P}_X \\ \overline{P}_Y \end{bmatrix} \{ \cos \theta \quad \sin \theta \} d\theta d\bar{z} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{B}_{XX} & \overline{B}_{XY} \\ \overline{B}_{YX} & \overline{B}_{YY} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \int_{-1}^{+1} \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \begin{bmatrix} \overline{P}_X \\ \overline{P}_Y \end{bmatrix} \{ \cos \theta \quad \sin \theta \} d\theta d\bar{z} \quad (20)$$

معادلات جابجایی دینامیکی مرکز روتور قرار گرفته بر تکیه‌گاه‌هایی از جنس یاتاقان ژورنال هیدرو دینامیکی، به‌ازای حرکت چرخشی پیرویدیک حول نقطه تعادل استاتیکی در راستای محورهای مختصات  $(X, Y)$  به‌فرم رابطه (۲۱) بیان می‌گردد.

$$\overline{M}_J \begin{Bmatrix} \overline{\ddot{X}}' \\ \overline{\ddot{Y}}' \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{B}_{XX} & \overline{B}_{XY} \\ \overline{B}_{YX} & \overline{B}_{YY} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{\ddot{X}}' \\ \overline{\ddot{Y}}' \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{S}_{XX} & \overline{S}_{XY} \\ \overline{S}_{YX} & \overline{S}_{YY} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{X}' \\ \overline{Y}' \end{Bmatrix} = 0 \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، پارامتر  $\overline{M}_J = M_J(2C_m^3\omega/\mu R^3L)$  به جرم بی‌بعد روتور اشاره دارد. در صورت جایگذاری مقادیر پارامترهای  $X'$  و  $Y'$  و مشتقات آن با توجه به معادله (۹) در رابطه (۲۱)، عبارت ذیل حاصل می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} -\overline{M}_J\gamma^2 + \overline{S}_{XX} + i\gamma\overline{B}_{XX} & \overline{S}_{XY} + i\gamma\overline{B}_{XY} \\ \overline{S}_{YX} + i\gamma\overline{B}_{YX} & -\overline{M}_J\gamma^2 + \overline{S}_{YY} + i\gamma\overline{B}_{YY} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \overline{X}' \\ \overline{Y}' \end{Bmatrix} = 0 \quad (22)$$

وجود جواب غیربدهی برای معادله فوق در صورت منفرد بودن ماتریس ضرایب امکان‌پذیر است؛ بنابراین، معادله مشخصه سیستم دینامیکی خطی با فرض اغتشاشات حرکتی سیکل محدود بسته برای جابجایی مرکز روتور در آستانه ناپایداری عبارت است از:

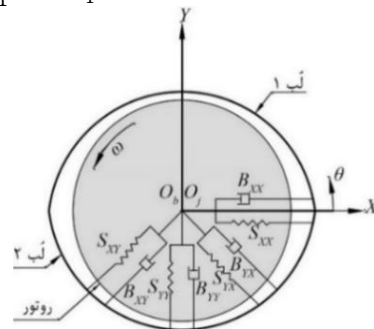
### ۳-۴- مشخصه‌های پایداری دینامیکی بر پایه مدل

#### خطی

عامل تعیین‌کننده بزرگی پارامترهای مشخصه پایداری دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور در مدل خطی، مطابق شکل ۴ به مقادیر ضرایب سفتی و میرایی معادل قابل محاسبه برای فیلم روانکار از حل معادلات حاکم، وابسته است. پس از محاسبه ضرایب سفتی و میرایی، مدل ارتعاشی رفتار روتور همانگونه که در شکل ذیل نمایش داده شده قابل ارائه و بررسی است.

رابطه (۱۶)، نحوه محاسبه مؤلفه‌های نیروی دینامیکی ایجاد شده توسط فیلم روانکار در اثر بروز رفتار اغتشاشی مرکز روتور را بیان می‌کند [۶].

$$\begin{bmatrix} \overline{F}_X \\ \overline{F}_Y \end{bmatrix} = \frac{2C_m^2}{\mu_{bf}\omega R^3L} \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N \int_{-1}^{+1} \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \overline{P}_n \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} d\theta d\bar{z} \quad (16)$$



شکل ۴- مدل دینامیکی خطی فیلم سیال روانکار در فضای یاتاقان ژورنال غیرمُدور دولب

فرم برداری نیروهای فیلم سیال در حالت دینامیکی از مجموع نیروهای تعادلی حالت پایدار و نیروهای ناپایدار اغتشاشی به صورت زیر به‌دست می‌آید [۶].

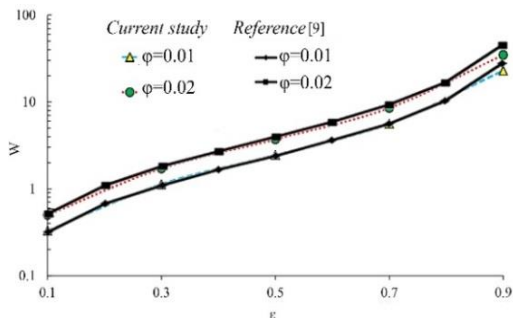
$$\begin{bmatrix} \overline{F}_X \\ \overline{F}_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{F}_{X0} \\ \overline{F}_{Y0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{\Delta F}_X \\ \overline{\Delta F}_Y \end{bmatrix} \quad (17)$$

در رابطه ۱۷،  $(\overline{\Delta F}_X, \overline{\Delta F}_Y)$  به مؤلفه‌های نیروی اغتشاشی ناپایدار اثرگذار بر روتور در حالت دینامیکی در راستای محورهای مختصات اشاره دارند. در مدل تحلیل دینامیکی خطی، نیروهای غیرتعادلی تحمیلی فیلم روانکار به روتور به صورت توابع خطی از مؤلفه‌های جابجایی و سرعت اغتشاشی مرکز روتور در راستای محورهای مختصات فرض می‌گردند.



یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دولب با نتایج مشابه مرجع [۲۱]، در جدول ۱ مقایسه شده‌است.

مرجع [۹]، عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال مدور تحت روانکاری با نانوسیال TiO<sub>2</sub>/SAE30 و مدل تنش مزدوج را با بکارگیری روش تفاضل محدود مورد بررسی قرار داده‌است. نمودارهای ارائه شده در شکل ۵، میزان بار قابل حمل در یاتاقان ژورنال مدور بر حسب نسبت خروج از مرکزی روتور در مقادیر متفاوت درصد حجمی ذرات نانو را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌گردد که با افزایش میزان خروج از مرکزی روتور در فضای لقی و همچنین افزایش کسر حجمی ذرات نانو در روانکار پایه، قابلیت حمل بار در یاتاقان افزایش می‌یابد. مقایسه خروجی‌ها برای قابلیت حمل بار در شرایط پایا برای یاتاقان ژورنال مدور با نانوروانکار TiO<sub>2</sub>/SAE30 از پژوهش حاضر با یکسان کردن پارامترهای ورودی برنامه در پژوهش حاضر با مرجع [۹]، از دقت و تطابق مناسب نتایج برنامه در محاسبه پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال با روانکار نانو حکایت دارد.



شکل ۵- میزان بار قابل حمل در یاتاقان ژورنال مدور با نانوروانکار TiO<sub>2</sub>/SAE30

در مرجع [۲۱] نیز عملکرد دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور تحت روانکاری با سیال نیوتونی با استفاده از روش تفاضل محدود مورد بررسی قرار گرفته‌است. در پژوهش مورد اشاره مشخصه‌های زاویه وضعی روتور در فضای لقی و همچنین ضرایب سفتی و میرایی فیلم روانکار در نسبت‌های خروج از مرکزی متفاوت ارزیابی و ارائه شده‌اند. به همین منظور در کار حاضر با مطابقت دادن شرایط ورودی برنامه با موارد بررسی شده در مرجع مذکور، مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی یاتاقان‌های غیرمُدور دولب بر پایه مدل دینامیکی خطی در شرایط روانکاری نیوتنی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. ارزیابی

$$\begin{aligned} & (-\bar{M}_J \gamma^2 + \bar{S}_{XX} + i\gamma \bar{B}_{XX})(-\bar{M}_J \gamma^2 \\ & + \bar{S}_{YY} + i\gamma \bar{B}_{YY}) \\ & - (\bar{S}_{XY} + i\gamma \bar{B}_{XY})(\bar{S}_{YX} \\ & + i\gamma \bar{B}_{YX}) = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

تفکیک بخش‌های حقیقی و موهومی معادله (۲۳) و معادل قرار دادن آنها با صفر، دو معادله مجزای (۲۴) و (۲۵) به‌دست می‌دهد. با فرض مقدار اولیه برای پارامتر  $\gamma$  و محاسبه ضرایب دینامیکی متناظر با آن از معادلات (۱۹) و (۲۰) پارامترهای لازم جهت بررسی معادلات ذیل فراهم می‌گردد.

$$\begin{aligned} & \bar{M}_J \gamma^2 \\ & = \frac{(\bar{S}_{XX} \bar{B}_{YY} + \bar{S}_{YY} \bar{B}_{XX} - \bar{S}_{XY} \bar{B}_{YX} - \bar{S}_{YX} \bar{B}_{XY})}{(\bar{B}_{XX} + \bar{B}_{YY})} \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \gamma^2 \\ & = \frac{[(\bar{S}_{XX} - \bar{M}_J \gamma^2)(\bar{S}_{YY} - \bar{M}_J \gamma^2) - \bar{S}_{XY} \bar{S}_{YX}]}{(\bar{B}_{XX} \bar{B}_{YY} - \bar{B}_{XY} \bar{B}_{YX})} \end{aligned} \quad (25)$$

معادلات فوق معیاری برای تعیین حاشیه پایداری دینامیکی سیستم بر اساس پارامتر جرم بی‌بعد روتور و نسبت فرکانس چرخش گردابی  $(\bar{M}_J, \gamma)$  هستند. با مشخص شدن مقدار نهایی نسبت فرکانس چرخش گردابی تصحیح شده در مراحل تکرار، حوزه پایداری مجموعه روتور و یاتاقان‌های ژورنال مورد بررسی بر اساس مدل دینامیکی خطی را می‌توان با بکارگیری معادله زیر تعیین نمود.

$$\begin{aligned} & \bar{M}_C \\ & = \frac{(\bar{S}_{XX} \bar{B}_{YY} + \bar{S}_{YY} \bar{B}_{XX} - \bar{S}_{XY} \bar{B}_{YX} - \bar{S}_{YX} \bar{B}_{XY})}{[(\bar{B}_{XX} + \bar{B}_{YY}) \gamma^2]} \end{aligned} \quad (26)$$

در رابطه فوق  $\bar{M}_C$  به مقدار پارامتر جرم بحرانی بی‌بعد روتور جهت قرارگیری سیستم در آستانه ناپایداری اشاره دارد. با شروع از یک مقدار تخمینی برای  $\gamma$ ، مقادیر پارامتر جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی در آستانه ناپایداری دینامیکی سیستم دوار مدل شده، با روش تکرار قابل دستیابی خواهند بود.

#### ۴- بحث و بررسی پیرامون نتایج

به‌منظور بررسی صحت عملکرد برنامه رایانه‌ای تدوین شده جهت بررسی پایداری دینامیکی یاتاقان ژورنال غیرمُدور دولب با مدل خطی و نانوروانکار TiO<sub>2</sub>/SAE30، در ابتدا نتایج خروجی برنامه برای میزان بار قابل حمل در یاتاقان ژورنال مدور با نانوروانکار TiO<sub>2</sub>/SAE30 مرجع [۹]، در شکل ۵ و همچنین برخی از پارامترهای عملکرد استاتیکی و دینامیکی

حکایت دارند. همچنین در هر مقدار غیرمُدوری ثابت در یاتاقان، افزایش ذرات  $TiO_2$  در روغن SAE30، قابلیت حمل بار در یاتاقان را افزایش خواهد داد. در تحلیلی مشابه علت افزایش میزان بار قابل حمل در یاتاقان با افزایش کسر حجمی ذرات نانو در روانکار ترکیبی را می‌توان به بهبود توزیع فشار سیال روانکار در ازای حضور پُر رنگ‌تر ذرات نانو در روغن پایه، نسبت داد.

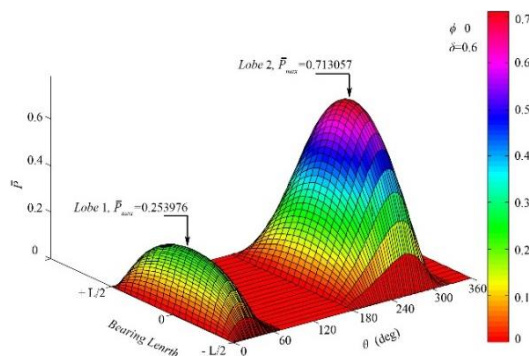
نمودارهای شکل ۸، چگونگی تغییرات زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان به‌ازای تغییر در مقدار کسر حجمی ذرات نانو و میزان غیرمُدوری را نشان می‌دهد. نتایج گویای آنست که افزودن ذرات  $TiO_2$  به روغن روانکار پایه یاتاقان با هر غلظتی و در هر میزان غیرمُدوری، تغییر اندکی در مقدار زاویه وضعی روتور در فضای لقی ایجاد خواهد کرد. در حالیکه با کاهش میزان غیرمُدوری در یاتاقان در هر غلظتی از ذرات نانو، زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان ژورنال غیرمُدور دولب برای تحقق شرط عمودی شدن بار قابل حمل یاتاقان، روندی صعودی- نزولی دارد.

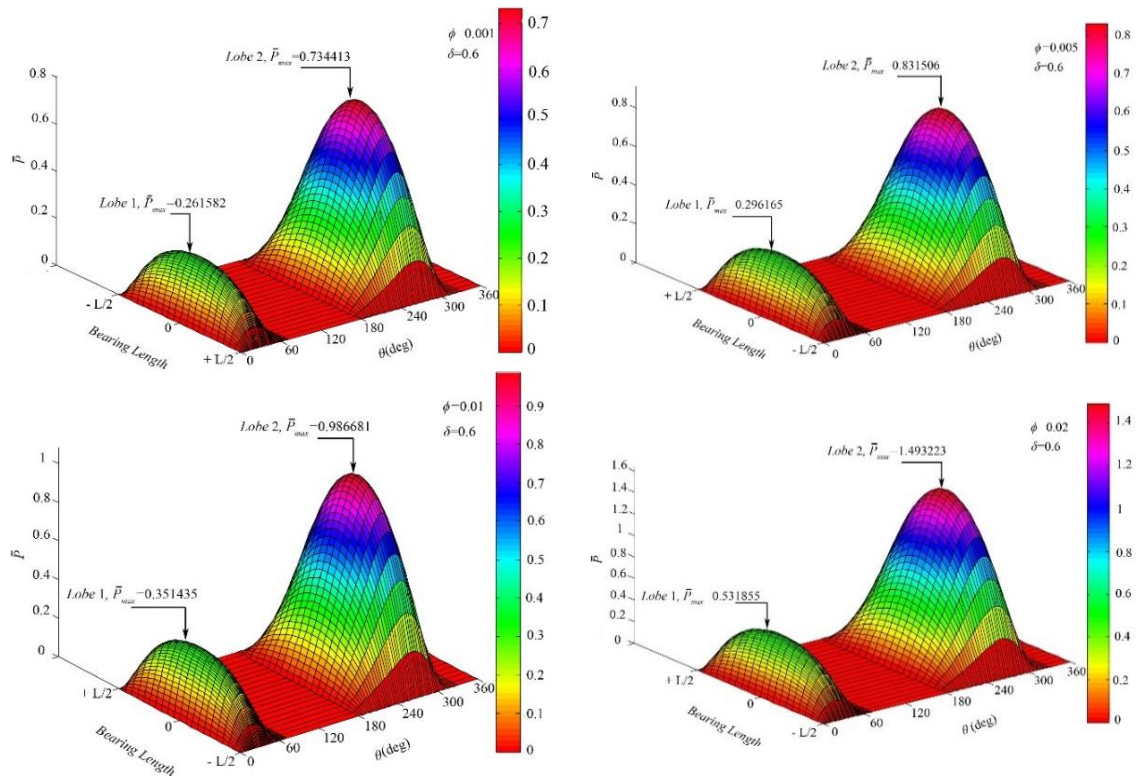
نتایج ارائه شده در جدول ۱ تطابق مناسب مابین خروجی بررسی حاضر و نتایج گزارش شده مرجع را نشان داده و صحت عملکرد برنامه‌ی رایانه‌ای تدوینی را تأیید می‌نماید.

لازم به ذکر است که در ادامه، نتایج ارائه شده در تمامی نمودارها برای  $L/D = 1$  و  $\varepsilon = 0.5$  استخراج شده‌اند. شکل ۶، توزیع فشار سه‌بعدی در فضای یاتاقان غیرمُدور دولب با تغییر در مقادیر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  را نشان می‌دهد. نمودارهای توزیع فشار حالت پایدار در یاتاقان با نانوروانکار  $TiO_2/SAE30$  نشان می‌دهند که با افزایش میزان کسر حجمی نانوذرات  $TiO_2$  در روانکار پایه به‌ازای میزان غیرمُدوری ثابت ۰/۶، توزیع فشار و به تبع آن بیشینه فشار در هر دولب یاتاقان افزایش خواهد داشت و این تقویت توزیع فشار در مقادیر بالاتر کسر حجمی نانو ذرات بیشتر مشهود است. دلیل این موضوع را می‌توان به افزایش لزجت روانکار پایه با افزودن ذرات نانو به آن نسبت داد. در ادامه در شکل ۷، تغییرات میزان بار قابل حمل در یاتاقان به‌ازای افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در روغن روانکار پایه در پریلودهای مختلف نشان داده شده‌است. نتایج شکل ۷، از افزایش قابلیت حمل بار در یاتاقان با کاهش میزان غیرمُدوری در هر غلظت معین ذرات نانو در روغن پایه روانکار

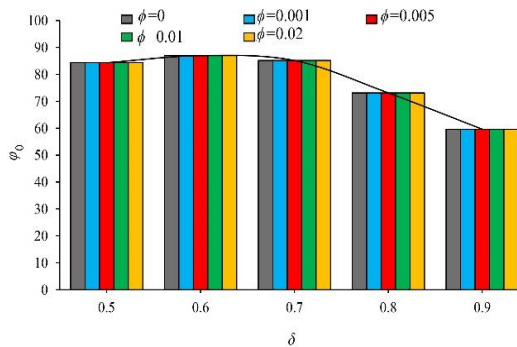
جدول ۱- مشخصه‌های عملکرد یاتاقان ژورنال غیرمُدور دولب با روانکار نیوتونی،  $\delta = 0.5$  و  $L/D = 1$

$\varepsilon = 0.432$		$\varepsilon = 0.2$		مشخصه‌های یاتاقان
مرجع [۲۱]	کار حاضر	مرجع [۲۱]	کار حاضر	
69/69	70/93	90/37	90/41	$\phi$
1/34	1/37	0/58	0/59	$S_{XX}$
-0/16	-0/17	-4/79	-4/68	$S_{XY}$
3/60	3/54	5/58	5/49	$S_{YX}$
5/36	5/22	8/93	8/78	$S_{YY}$
1/42	1/43	4/82	4/86	$B_{XX}$
1/34	1/36	-4/5	-4/39	$B_{XY} = B_{YX}$
7.67	7.81	17.99	17.82	$B_{YY}$

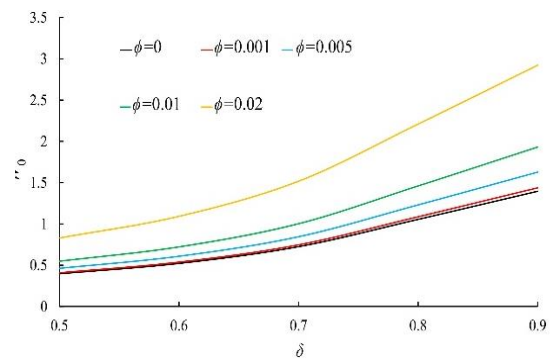




شکل ۶- توزیع فشار سه بعدی در یاتاقان ژورنال غیرمُدور دو لب در مقادیر مختلف کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  با  $\frac{L}{D} = 1$  و  $\varepsilon = 0.5$



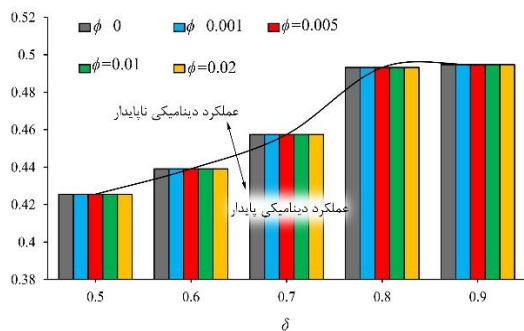
شکل ۸- اثر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن پایه بر زاویه وضعی روتور در فضای لقی بر حسب میزان غیرمُدوری



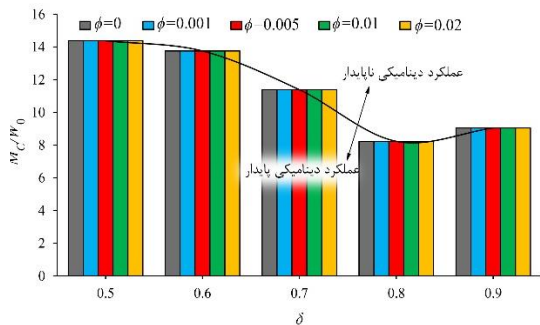
شکل ۷- اثر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن پایه بر قابلیت حمل بار در یاتاقان بر حسب میزان غیرمُدوری

اثر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن روانکار پایه بر حسب میزان غیرمُدوری در یاتاقان بر مشخصه‌های نیروی اصطکاک و ضریب اصطکاک به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است. نمودارهای شکل ۹ نشان می‌دهند که افزایش کسر حجمی ذرات نانو در روغن روانکار، پارامتر نیروی اصطکاک در سیال را در هر مقداری از غیرمُدوری یاتاقان افزایش می‌دهد. این پدیده

یاتاقان بر نسبت فرکانس چرخش گردابی و جرم بحرانی بی‌بُعد روتور به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌است. نتایج، گویای تغییر بسیار اندک نسبت فرکانس چرخش گردابی و جرم بحرانی بی‌بُعد روتور با تغییر در کسر حجمی ذرات نانو در روغن روانکار پایه به‌ازای مقادیر مختلف  $\delta$  است. این در حالی است که کاهش میزان غیرمُدوری یاتاقان با افزایش  $\delta$  به ازای غلظت معینی از ذرات نانو در روانکار پایه، نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور را افزایش و جرم بحرانی بی‌بُعد روتور را کاهش داده و کاهش پایداری دینامیکی مجموعه می‌شود.



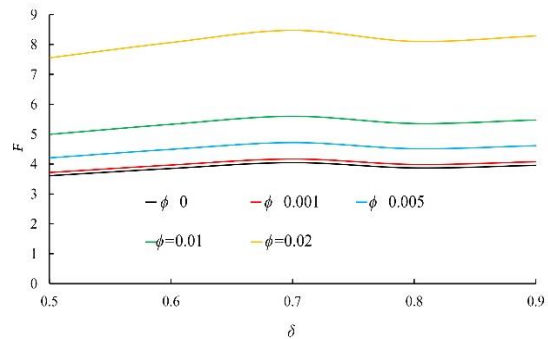
شکل ۱۱- اثر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن پایه بر نسبت فرکانس چرخش گردابی بر حسب پریلود



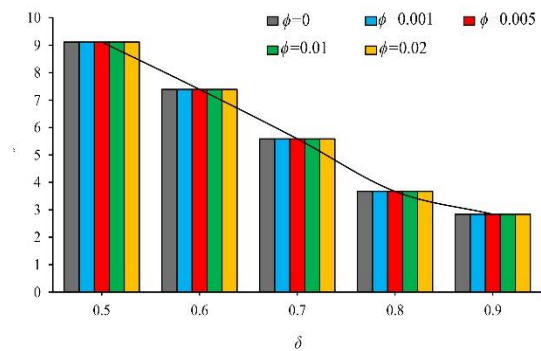
شکل ۱۲- اثر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن پایه بر جرم بحرانی روتور بر حسب پریلود

لذا می‌توان با بکارگیری یاتاقان‌های ژورنال غیرمُدور دوئب با میزان غیرمُدوری بالا و تحت روانکاری با نانوسیال  $TiO_2/SAE30$  به‌جای انواع یاتاقان‌های ژورنال مُدور مشابه به عنوان تکیه‌گاه در سیستم‌های دوار، عملکرد دینامیکی مجموعه را بهبود بخشید.

را می‌توان به افزایش غلظت روانکار یاتاقان با افزایش مقدار نانو ذرات در روغن مرتبط دانست؛ همچنین تغییر ناچیز ضریب اصطکاک در یاتاقان با تغییر در درصد حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن روانکار از نمودارهای شکل ۱۰ مشهود است. با توجه به افزایش نیروی اصطکاک در لایه‌های سیال روانکار و قابلیت حمل بار در یاتاقان با افزایش کسر حجمی ذرات نانو در روغن پایه و همچنین در نظر گرفتن رابطه ضریب اصطکاک بصورت نسبت نیروی اصطکاک به بار قابل حمل توسط فیلم سیال روانکار یاتاقان، عدم تغییر ضریب اصطکاک در لایه‌های روغن روانکار یاتاقان قابل توجیه است.



شکل ۹- اثر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن پایه بر نیروی اصطکاک در لایه‌های روانکار بر حسب پریلود



شکل ۱۰- اثر کسر حجمی ذرات  $TiO_2$  در روغن پایه بر ضریب اصطکاک در لایه‌های روانکار بر حسب پریلود

علاوه بر این، بایستی به این نکته توجه شود که وجود ذرات نانو در روغن روانکار پایه، ضریب اصطکاک مابین سیال روانکار و پوسته یاتاقان را کاسته و تغییری در ضریب اصطکاک مابین لایه‌های روانکار ایجاد نخواهد کرد. این موضوع همانگونه که پیشتر اشاره شد، از مزایای بکارگیری نانوسیالات در روانکاری سطوح درگیر با یکدیگر محسوب می‌شود. اثر غلظت ذرات  $TiO_2$  در روغن روانکار پایه بر حسب میزان غیرمُدوری در

## ۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر اثر کسر حجمی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم ترکیبی با روغن پایه SAE30 بر مشخصه های عملکرد استاتیکی و مشخصه های پایداری دینامیکی یاتاقان های ژورنال غیرمُدور دو لب به کمک مدل تحلیلی خطی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور پس از اصلاح معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقان های ژورنال برای روانکاری با سیال نانو، با فرض رفتار اغتشاشی هارمونیک حلقه بسته روتور صلب دوار در فضای یاتاقان، ضرایب سختی و میرایی فیلم روانکار، جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور به عنوان پارامترهای مشخصه رفتار دینامیکی مجموعه تکیه گاهی حاصل شده اند؛ همچنین در این پژوهش به علت فرض یاتاقان با طول محدود از روش حل عددی اجزاء محدود بر پایه مدل گالرکین برای حل معادلات حاکم بر روانکاری یاتاقان ژورنال غیرمُدور دو لب استفاده شده است. با ارزیابی نتایج، موارد ذیل قابل استنباط می باشند:

۱- توزیع و بیشینه فشار و قابلیت حمل بار یاتاقان های غیرمُدور دو لب با افزایش کسر حجمی ذرات نانو در هر میزان غیرمُدوری بهبود می یابند که دلیل این پدیده را می توان به افزایش لزجت نسبی روانکار ترکیبی با افزایش غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در روانکار پایه مرتبط دانست.

۲- وجود ذرات نانو، عملکرد تریبولوژیکی سطوح روانکاری شده شامل ضریب اصطکاک و کاهش ساییش را با اثرات غلتکی، تشکیل فیلم محافظ، ترمیمی و پرداخت بهبود خواهد بخشید. این در حالی است که حضور ذرات در روانکار پایه سبب افزایش نیروی اصطکاک بین لایه های شده، اما ضریب اصطکاک مابین لایه ها را به میزان اندکی تغییر می دهد.

۳- تغییرات قابل اغماض جرم بحرانی بی بُعد و نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور با تغییر در کسر حجمی نانو ذرات در روغن پایه به ازای مقادیر مختلف پریلود از نتایج مشاهده می شوند. این در حالی است که کاهش میزان غیرمُدوری یاتاقان با افزایش میزان  $\delta$  به ازای غلظت معینی از ذرات نانو، جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور را به ترتیب کاهش و افزایش داده و در مجموع سبب کاهش پایداری مجموعه می شود.

۴- با ارزیابی نتایج پیدا است که در صورت بکارگیری یاتاقان های ژورنال غیرمُدور به جای انواع مُدور مشابه و استفاده از نانو

روانکار ترکیبی  $TiO_2/SAE30$  به جای روغن های معمول می توان عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی تکیه گاه یاتاقانی را بهبود بخشید.

## مراجع

- [1] Pinkus O (1956) Analysis of elliptical bearings. Trans of ASME, 78 (1): 965-973.
- [2] Malik M (1983) A comparative study of some two-lobed journal bearing configurations. ASLE Trans 26 (1): 118-124.
- [3] Mehrjardi MZ, Rahmatabadi AD, Meybodi RR (2016) A study on the stability performance of noncircular lobed journal bearings with micropolar lubricant. Proc of the Ins of Mech Eng, Part J: J of Eng Tribol 230 (1): 14-30.
- [4] Dwivedi VK, Pathak P (2019) Effect of axial groove location, length & width ratio on the bearing properties and stability. J of Comput and Applied Research in Mech Eng 10(2): 525-537.
- [5] Feng H, Jiang S and Ji A (2019) Investigations of the static and dynamic characteristics of water-lubricated journal bearing considering turbulent, thermohydrodynamic and misaligned effects. Tribol Int 130(2): 245-260.
- [6] Zare Mehrjardi M (2020) Dynamic stability analysis of noncircular hydrodynamic two-lobe journal bearings with couple stress lubricant regime. Proc of the Ins of Mech Eng, Part J: J of Eng Tribol 235(6): 1150-1167.
- [7] Abdou KM, Saber E. (2020) Effect of rotor misalignment on stability of journal bearings with finite width. Alexandria Eng J, 59(7):3407-3417.
- [8] Shenoy BS, Binu KG, Pai R, Rao DS, Pai RS, (2012) Effect of nanoparticles additives on the performance of an externally adjustable fluid film bearing. Tribol Int 45(1): 38-42.
- [9] Binu KG, Shenoy BS, Rao DS, Pai R (2014) Static characteristics of a fluid film bearing with  $TiO_2$  based nanolubricant using the modified Krieger-Dougherty viscosity model and couple stress model. Tribol Int, 75(3): 69-79.
- [10] Binu KG, Yatish K, Shenoy BS, Rao DS, Pai R (2017) Performance characteristics of finite journal bearings operating on  $TiO_2$  based nanolubricants. Pertanika J of Sci and Technol 25(3): 963-976.
- [11] Rao T, Rani A, Sufian S, Mohamed N (2017) Thin film hydrodynamic bearing analysis using nanoparticle additive lubricants. Eng App of Nanotechnology. Cham 3(6): 149-173.
- [12] Suryawanshi SR, Pattiwar JT. (2018) Effect of  $TiO_2$  nanoparticles blended with lubricating oil on the tribological performance of the journal bearing. Tribol in Industry 40 (3): 370-391.

- [18] Saidur R, Kazi SN, Hossain MS, Rahman MM, Mohammed HA. (2011) A review on the performance of nanoparticles suspended with refrigerants and lubricating oils in refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (1): 310-323.
- [19] Rahmatatabadi AD, Zare Mehrjardi M, Fazel MR, (2010) Performance analysis of micropolar lubricated journal bearings using GDQ method. *Tribol Int*, 43(11): 2000-2009.
- [20] Lund JW, Thomsen KK, (1987) A calculation method and data for the dynamic coefficients of oil-lubricated journal bearings. *Topics in Hydrodynamic Fluid Film Bearing and Rotor Bearing System Design and Optimization* In: ASME conference, Chicago: 1-29.
- [21] Khonsari M. M., Brewster D. E., (1989) On the performance of finite journal bearings lubricated with micropolar fluids. *STLE, Tribol Int*, 32(2): 155-160.
- [13] Suryawanshi SR, Pattiwar JT., (2019) Experimental study on an influence of bearing geometry and  $TiO_2$  nanoparticle additives on the performance characteristics of fluid film lubricated journal bearing. *Tribol in Industry* 41(2): 220-236.
- [14] Hammza TM, Abdulkareem AA, Abas EN (2020) Influence of the solid particles nanofluid on the dynamic behaviour of rotor fluid film journal bearing systems. *J of Mech Eng Research and Developments* 43(7): 149-162.
- [15] Rasoolizadeh Shooroki A, Dashti Rahmatatabadi A, Zare Mehrjardi M. (2021) Effect of volume percentage of nanoparticles added to the lubricant on the performance characteristics of the hydrodynamic textured journal bearings. *J of Mech Eng Uni of Tabriz* 51(2): 73-82.
- [16] Jason YJJ, How HG, Teoh YH, Chuah HG. (2020) A Study on the tribological performance of nanolubricants. *Processes* 8(11): 1372-1378.
- [17] Kotia A, Rajkhowa P, Rao GS, Ghosh SK, (2018) Thermophysical and tribological properties of nanolubricants: A review. *Heat and Mass Trans* 54(1): 3493-3508.