

نشربه مكانيك سازه فاوشاره فا





# تاثیر ایجاد بافتهای سطحی و بکارگیری نانوسیال روانکار بر پایداری دینامیکی یاتاقانهای ژورنال غیرمدور مهدی زارع مهرجردی<sup>۱</sup>، ابوالفضل رسولی زاده شورکی<sup>۲</sup>، مهران ربانی<sup>۲۰\*</sup> و رضا رشیدی میبدی<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اردکان، ایران. <sup>۲</sup> دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، ایران. <sup>۲</sup> استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اردکان، ایران. <sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اردکان، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

### چکیدہ

هر گونه تغییر در ساختار روانکار و هندسه اجزاء، تغییر عملکرد یاتاقانهای ژورنال بهعنوان یکی از انواع متداول تکیهگاه در ماشین آلات صنعتی را سبب میشود. امروزه با پیشرفت تکنولوژی زمینه تولید نانوسیالها و سطوح بافتدار برای بهبود کُنشهای سیال و سازه در قطعات مکانیکی از جمله یاتاقانها فراهم شدهاست. در پژوهش حاضر تاثیر عمق بافتهای استوانهای و بکارگیری نانوذرات دی اکسید تیتانیوم بر عملکرد پایا و پایداری دینامیکی یاتاقانهای ژورنال هیدرودینامیکی غیرمدور دولُب ارزیابی گردیدهاست. بدین منظور پس از استخراج معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقانهای ژورنال هیدرودینامیکی غیرمدور دولُب ارزیابی گردیدهاست. بدین منظور پس از استخراج معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقانهای ژورنال هیدرودینامیکی غیرمدور دولُب ارزیابی گردیدهاست. بدین منظور پس از در نهایت، پارامترهای بار قابل حمل، زاویه وضعی، جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی بعنوان مشخصهای عملکرد پایا و یاداری دینامیکی یاتاقانهای ژورنال و نسبت فرکانس چرخش گردابی بعنوان مشخصه معای عملکرد پایا و یاداری دینامیکی یاتاقانه و خاص دینامیکی خطی جهت بررسی وضعیت پایداری مجموعه بکار گرفته شدهاست. در نهایت، پر نهایت، پارامترهای بار قابل حمل، زاویه وضعی، جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی بهعنوان مشخصه ای عملکرد پایا و دینامیکی مجموعه تحت تأثیر عمق و مکان بافتها و غلظت نانوذارت TO<sup>2</sup> مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج گویای بهبود مشخصههای عملکرد پایا و ایش غلظت نانوذرات در موزن پایه، ارتقانهای سطحی در مکان و عمق مناسب بویژه ناحیه پرفشار سطح داخلی یاتاقان هستند؛ همچنین افزایش غلظت نانوذرات در روغن پایه، ارتقاء شاخصهای عملکرد پایای سیستم را نمایش می دهند. بطور کلی نتایج مطالعه حاضر از افزایش غلظت نانوذرات در روغن پایه، ارتقاء شاخصهای عملکرد پایای سیستم را نمایش میدهد. بطور کلی نتایز مای به موزان به عنوان مور کلی نتایج می در می از افزایش عمونان سطح داخلی یاتاقان هستند؛ همچنین افزایش غلیش می دهند. بطور کلی نتایج مطالعه حاضر از می بهنون می می در از می می مراز و رونا یانوز مانه می در در زمای می می می در برای می می می می می می می می در می می می در در در می می در در می می در در در می می در در می به می می در می می می می در در می می می می می می می در در می می می در در می می می می در در می می می می می می

كلمات كليدى: ياتاقان ژورنال هيدروديناميكى دولُب؛ بافت استوانهاى؛ نانوسيال؛ دىاكسيد تيتانيوم؛ پايدارى ديناميكى.

# Effect of Creating Surface Textures and Using Nanofluid Lubricant on the Dynamic Stability of Noncircular Journal Bearings

Mahdi Zare Mehrjardi<sup>1</sup>, Abolfazl Rasoolizadeh Shooroki<sup>2</sup>, Mehran Rabani <sup>3,\*</sup>and Reza Rashidi Meybodi<sup>4</sup> <sup>1</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering , Ardakan University, Iran.

<sup>2</sup> Ph.D., Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Iran.

<sup>3</sup> Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering , Ardakan University, Iran.
 <sup>4</sup> Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering , Meybod University, Iran.

#### Abstract

Any change in the lubricant structure and the geometry of the components effectively impacts the performance of rotor-bearings supports as one of the common parts of industrial machines. Today, with technological advancements, the producing of nanofluids and textured surfaces are developed. In the present study, the effects of cylindrical textures depth and applying the titanium dioxide nanoparticles on the performance of hydrodynamic noncircular two lobe journal bearings are evaluated. For this purpose, after deriving the governing Reynolds equation, a linear dynamic model is employed to investigate the stability of the bearing. Finally, various parameters such as the load-carrying capacity, attitude angle, critical mass and the whirl frequency ratio are examined as steady-state and dynamic performance characteristics of the system under the influence of cylindrical textures properties and the concentration of  $TiO_2$  nanoparticles. The results indicate an improvement in the performance of the bearing system when textures are created with optimized depth and surface location. Additionally, increasing the concentration of nanoparticles shows an enhancement in the static performance of the system. Overall, the results indicate the possibility of optimizing and enhancing the performance of the two lobe bearings using surface textures and nanoparticle concentrations in a principled manner.

**Keywords:** Two lobe hydrodynamic journal bearing; Cylindrical texture; Nanofluid; TiO<sub>2</sub>; Dynamic stability.

<sup>\*</sup> نویسنده مسئول؛ تلفن: ۳۵۳۲۲۴۰۹۲۳؛ فکس: ۳۵۳۲۲۴۸۳۸۴

آدرس پست الكترونيك: M.Rabani@ardakan.ac.ir

وىشكل بر بهبود عملكرد حالت پايدار ياتاقانهاى ژورنال مدور

توسط شرما و همکاران [۳] انجام شد. در این پژوهش با فرض

عدم تغييرات لزجت سيال روانكار نيوتونى، معادله رينولدز

حاکم بر جریان سیال با بکارگیری روش حل عددی المان

محدود تحلیل گردیده است. نتایج این تحقیق که در آن عمق

بافتها و مكان توزيع آنها بر سطح داخلي پوسته ياتاقان بررسي

شده، بیانگر بهبود عملکرد استاتیکی یاتاقانهای ژورنال مدور

در صورت بکارگیری بافتهای سطحی در منطقه ایجاد فشار

مثبت است؛ همچنین بهترین حالت کارکرد یاتاقان که ترکیبی

از بهبود میزان بار قابل حمل و نیروی اصطکاک تولیدی در

مجموعه است، زمانی حاصل می شود که نسبت خروج از

مرکزی روتور برابر ۰/۲، عمق بیبعد بافتها برابر ۴/۰، نسبت

ضلع داخلی به خارجی مثلثهای تشکیل دهنده شورون برابر

۰/۳ و بافتهای شورون شکل<sup>۳</sup> در منطقه بیشینه فشار یاتاقان

ايجاد شوند. مطالعه جهت يافتن پارامترهای بهينه ياتاقان

ژورنال هیبریدی با شیارهای مخروطی تحت روانکاری با

روان کننده های پیزوویسکوز و برش نازک توسط کومار و شرما

[۴] در سال ۲۰۱۹ صورت گرفت. در این پژوهش بیان

شدهاست که زاویه مخروط بزرگتر در یاتاقان های مخروطی

سبب بهبود ظرفیت حمل بار در یاتاقان می شود. این موضوع

سبب افزایش سطح تماس شده که به نوبه خود افت قدرت

اصطکاکی را افزایش میدهد. یکی از راههای کنترل تلفات

اشاره شده، بکارگیری میکروشیارها در سطح داخلی یاتاقان

است. نتایج این پژوهش نشان میدهد که توزیع شیارها در

منطقه فشار همگرا و در خروجی محدودکننده، حداکثر مقدار

ظرفیت بار شعاعی را فراهم میکند. بررسی عددی تأثیر سطح

بافتدار با اشکال بافت مربعی، مثلثی و دایرهای بر پارامترهای

عملكرد حالت پايدار ياتاقانهاى ژورنال هيدروديناميكى مدور

با ناهمراستایی روتور و یاتاقان نیز توسط مانسر و همکاران [۵]

در همان سال صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان میدهد

که هندسه و محل قرار گیری بافتها بر سطح داخلی پوسته

یاتاقان از موارد بسیار مهم موثر بر بهبود عملکرد یاتاقانهای

ژورنال میباشند؛ همچنین شکل بافتهای مربعی، مثلثی و

دایرهای بهترتیب بهترین نوع بافتها در راستای ارتقای عملکرد

یاتاقان به حساب می آیند. علاوه بر این، ایجاد بافت در مکان های

#### ۱– مقدمه

در دهههای اخیر، رشد روز افزون بکارگیری سیستمهای روانکاری در ماشین آلات متنوع صنعتی بویژه انواع شامل تکیه گاههای یاتاقانی سبب شده تا دامنه پژوهشها در این حوزه توسعه چشمگیری یابد. طراحی سیستم روانکاری کارآمد برای یاتاقانها که نقش مؤثری در ساختار تجهیزات گوناگون بهویژه سیستمهای دوار ایفا میکنند، بهبود عملکرد آنها را به دنبال داشته و مىتواند صرفهجويى اقتصادى قابل توجهى در مواد و انرژی را سبب شود. از میان یاتاقانهای مورد استفاده در ماشینآلات، انواع ژورنال به دلیل شکل هندسی خاص، سهولت روانکاری و کارآیی مطلوب، سهم قابل توجهی را به خود اختصاص میدهند. در یاتاقانهای ژورنال، ضخامت فیلم سیال روانکار قرار گرفته مابین سطح روتور و پوسته و لزجت روغن، از جمله مشخصههای اصلی مؤثر بر راندمان سیستم تکیه گاهی می باشند. ایجاد بافت در سطح داخلی پوسته یاتاقان و افزودن نانوذرات به روانکار پایه از جدیدترین روشهای مورد استفاده برای بهبود عملکرد یاتاقانهای ژورنال در سالهای اخبر بودهاند.

در راستای بکارگیری سطوح بافتدار در جهت بهبود عملکرد یاتاقان های ژورنال روغنی ۲، پس از ارائه تحقیق اتسیون و بورشتاین [۱] در سال ۱۹۹۶ در زمینه اثرگذاری بافتهای سطحی بر بهبود عملکرد سطوح درگیر با یکدیگر، جنبش جدیدی در این حوزهی علم ایجاد شد. از آن زمان بهدلیل نتایج اميدواركننده تحقيقات اوليه، صدها مطالعه تئوري و آزمایشگاهی در سراسر جهان بهمنظور بهبود عملکرد تریبولوژیکی سطوح درگیر با یکدیگر انجام شدهاست. از مهمترین پژوهشهای صورت گرفته در این زمینه در سالهای اخیر می توان به مشخصات عملکرد حالت پایدار یاتاقانهای ژورنال مدور، مانند فشار بیشینه، ظرفیت حمل بار، نیرو و ضریب اصطکاک با میکروشیارهای طولی و دورانی و شکل جانبی بیضوی توسط هان و فو [7] در سال ۲۰۱۹ اشاره کرد. نتایج این تحقیق بر عدم تأثیر شیار عرضی در منطقه واگرا بر وضعیت روانکاری یاتاقان حکایت دارد. شیارهای موجود در منطقه فشار بيشينه امكان بالقوهاى براى بهبود عملكرد یاتاقانهای ژورنالی دارند. در همین سال بررسی اثر بافتهای

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Chevron-shaped Textures

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Textured Surfaces

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Oil Journal Bearings

همکاران [۹] انجام شد. نتایج این پژوهش نشان میدهد که یاتاقانهای غیرمدور میتوانند بار بیشتر و تلفات توان کمتری را نسبت به یاتاقاهای مدور ارائه دهند. همچنین با افزایش بار شعاعی، فشار و دما در فیلم لایه روغن نیز افزایش مییابد.

در راستای بکارگیری سیالات نانو<sup>۴</sup> در جهت بهبود عملکرد ياتاقانهاى ژورنال روغنى، مىتوان به بررسى اثر افزودن نانوذرات TiO<sub>2</sub> به روغن روانکار پایه بر عملکرد تریبولوژیکی یاتاقانهای ژورنال مدور و بیضوی توسط سوریاوانشی و پَتیوار [۱۰] در سال ۲۰۱۸ اشاره کرد. در این پژوهش که در سرعتهای ۱۰۰۰–۵۰۰ دور بر دقیقه برای روتور دوار و بارگذاری ۱۰۰۰ نیوتون انجام شد؛ نتایج گویای آن است که یاتاقان بیضوی، عملکرد سیستم را نسبت به یاتاقان سادهای که با همان روان کننده کار می کند، بهبود می بخشد. در سال ۲۰۱۹ نیز این محققان [۱۱] به بررسی تجربی اثر شکل هندسی و غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> افزوده شده به روغن پایه روانکار بر عملکرد حالت گذرای یاتاقانهای ژورنال مدور و غيرمدور بيضوى پرداختند. نتايج اين تحقيق نشان ميدهد كه یاتاقان ژورنال غیرمدور بیضوی عملکردی بهینه نسبت به یک یاتاقان ساده در شرایط کاری مشابه دارند. علاوه بر این، نتایج تجربی بهدست آمده از فشار و دمای توزیع شده در فیلم سیال روانکار در مطالعه این پژوهشگران، با نتایج نظری مطابقت بسیار خوبی دارد. احمدی نجف آبادی و همکاران [۱۲] در سال ۱۳۹۵ از روش پخشآوایی برای عیبیابی و تماس سطوح یاتاقان با تغییر رژیم روانکاری هیدرودینامیکی به روانکاری مخلوط و مرزی ناشی از شرایط کارکرد یک یاتاقان لغزشی استفاده نمودند. این محققین با استفاده از روش تبدیل موجک، مشخصات فرکانسی هر ناحیه روانکاری را مشخص نموده و میزان تماس فلز با فلز در هر کدام از رژیمهای روانکاری را مشخص نمودند. با توجه به اهمیت بررسی قابلیت روانکار در پیشگیری از رفتارهای اغتشاشی روتور در فضای لقی یاتاقان، رشیدی میبدی و همکاران [۱۳] در سال ۱۳۹۶ تحلیل عملکرد دینامیکی یاتاقانهای ژورنال غیرمدور با رژیم روانکاری فروسیال را ارائه نمودند. این پژوهشگران با فرض اغتشاش حركتي كوچك محور حول نقطه تعادل استاتيكي أن، فركانس چرخش و محدوده پایداری تکیه گاه یاتاقانی را مشخص نمودند.

مناسب مي تواند مشكلات ناشي از عدم همراستايي روتور و یوسته را جبران کند. موقعیت مکانی مطلوب نیز بهشدت به پارامترهای هندسی و شرایط کار یاتاقانهای ژورنال بستگی دارد. تأثير پارامتر نفوذیذیری بالا بر عملکرد پاتاقانهای ژورنال متخلخل بافتدار اتوسط شرما و کانگو [۶] در سال ۲۰۲۰ صورت گرفت. نتایج این تحقیق گویای این واقعیت است که محل قرارگیری بافتهای کروی و تغییر پارامتر نفوذپذیری، تأثیر قابل توجهی بر مشخصههای عملکرد یاتاقان ژورنال نشان میدهد؛ همچنین بیان شده که بافتهای قرارگرفته در مکانهای متفاوت بر اساس نسبت خروج از مرکزی به صورت قابل توجهى به بهبود عملكرد ياتاقانهاى غيرمتخلخل و متخلخل ژورنالی کمک میکنند. مطالعه عملکرد دینامیکی یاتاقانهای ژورنال مدور با سه نوع شیار بر سطح داخلی پوسته تحت روانکاری با آب بههنگام راهاندازی ماشین دوار، توسط شیانگ و هان [۷] در سال ۲۰۲۰ صورت گرفت. نتایج عددی این تحقیق نشان میدهد که در مرحله اولیه راهاندازی، نیروی اصطکاک افقی گذرا، روتور را در جهت مخالف چرخش هدایت می کند. علاوه بر این، نشان داده شده که ضریب اصطکاک خشک نقش مهمی در تجزیه و تحلیل روانکاری دینامیکی یاتاقانهای میکروشیاردار روانکاری شده با آب در هنگام راه اندازی ایفا میکند. بررسی تئوری اثر وجود بافتهای کروی سطحی بر عملکرد هیدرودینامیکی حالت پایدار یاتاقانهای ژورنال غیرمدور دولُب<sup>۲</sup> با روانکار نیوتونی و حالت همدما توسط سینگ و آواستهی [۸] صورت گرفت. در این پژوهش، معادله رینولدز حاکم بر مسأله با بکارگیری روش حل عددی المان محدود<sup>۳</sup> تحلیل شده و پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان های ژورنال مُدور و غیرمُدور دولُب با سطح بافتدار بر حسب تغییرات نسبت خروج از مرکزی روتور و عمق و محل بکار گیری بافتها استخراج شدهاند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان میدهد که وقتی بافتهای کروی در منطقه ایجاد فشار (°۲۸۶-۱۲۶) بر سطح داخلی پوسته یاتاقان قرار گرفته و نسبت ابعاد گودی تقریباً یک باشد، می توان عملکرد بهتری را از یاتاقان غیرمدور دولُب انتظار داشت. بررسی عملکرد ترموهيدروديناميكي حالت پايدار ياتاقانهاى ژورنال غيرمدور دولُب با سطح دارای بافت در سال ۲۰۲۱ توسط بهاسکر و

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>1</sup> Nano Lubricant

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Textured Porous Journal Bearings

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Two Lobe Noncircular Journal Bearings

نتایج این بررسی حاکی از آنست که با افزایش نسبت خروج از مرکزی و ابعاد و کاهش ضریب نیروی مغناطیسی، پایداری سیستم افزایش مییابد؛ همچنین با افزایش تعداد لبهای یاتاقان غیرمدور با روانکار فروسیال، میتوان به محدوده عملکرد پایدارتری در برابر اغتشاشات حرکتی روتور در فضای یاتاقان دستیافت.

بررسی اثر نانوذرات جامد موجود در ترکیب روغن روانکار یاتاقانهای ژورنال هیدرودینامیکی مدور بر عملکرد استاتیکی و دینامیکی مجموعه توسط حمّزه و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۲۰ صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش بهوضوح نشان میدهند که از روان کننده نانوسیال میتوان جهت بهبود پارامترهای عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی<sup>۱</sup> ماشین آلات چرخان از جمله توزیع فشار<sup>۲</sup>، زاویه وضعی<sup>۳</sup> روتور، میزان بار قابل حمل<sup>۴</sup>، نیرو و ضریب اصطکاک<sup>۵</sup>، ضرایب میرایی و سفتی<sup>۶</sup> فیلم روانکار و سرعت بحرانی<sup>۷</sup> روتور استفاده کرد. عملكرد ترموهيدروديناميكي ياتاقانهاى ژورنال مدور تحت نانوروانکارهایی با روغن پایه کانولا و نانوذرات دیاکسید تیتانیوم توسط دهانولا و گارگ [۱۵] در سال ۲۰۲۰ مطالعه شد. در این تحقیق، معادلات رینولدز و انرژی تعمیم یافته در یک شرایط آدیاباتیک با بکارگیری روش حل عددی تفاضل محدود تحلیل شدهاند. نتایج این تحقیق، در زمینههای دما و فشار و پارامترهای عملکرد استاتیکی سیستم یاتاقانهای ژورنال در طیف گستردهای از نسبتهای خروج از مرکزی و مقادیر مختلف شاخص قانون توان در روانکار پایه غیرنیوتنی یاورلا^ بررسی شده و حاکی از آنست که در گیری ذرات نانو در روانکار پایه بهطور قابل توجهی، فشار، ظرفیت حمل بار و نيروى اصطكاك ياتاقان را افزايش مىدهد. ارزيابى عملكرد حرارتی یاتاقانهای ژورنال بیضوی با نانو روانکارهای ترکیبی شامل روغن پایه معدنی و نانوذرات اکسید مس و دیاکسید تیتانیوم با درصدهای وزنی گوناگون، در سال ۲۰۲۰ توسط دانگ و همکاران [۱۶] انجام گرفت. در این پژوهش، مشخصههای حالت پایدار یاتاقانهای ژورنال غیرمدور بیضوی همچون فشار توزيع شده در فيلم سيال روانكار، بار قابل حمل،

دمای توزیع شده در روغن و اتلاف قدرت در سیستم بر حسب نسبت خروج از مرکزی و سرعت دوران روتور مورد بررسی قرار گرفتهاست. یافتههای این تحقیق نشاندهنده افزایش حداکثر فشار و ظرفیت بار با افزودن نانوذرات به روغن پایه بوده و این افزایش در غلظتهای بالاتر نانوذرات و روغنهایی با درجه گرانروی بیشتر، محسوستر است. با غلظت دو درصد وزنی نانوذرات <sub>2</sub> Tio و CuO در روغن پایه 40% ظرفیت بار در یاتاقان ژورنال مورد بررسی با نسبت خروج از مرکزی ۲/۰ بهترتیب با افزایشی ۲۴/۲۴٪ و ۲/۱۲٪ مواجه شدهاند. همچنین در این پژوهش مشخص شده که افزایش ظرفیت بار با افزودن نانوروان کنندهها، بدون افزایش قابل توجه دمای کارکرد روغن حاصل شدهاست.

در سال ۲۰۲۱، آواستهی و مان [۱۷] پژوهشی جدید درباره تأثير بافت سطحى بر عملكرد ياتاقانهاى ژورنال تحت رژیم روانکاری آشفته منتشر کردند. نتایج آنها نشان میدهد که استفاده از بافتها در مکان مناسب می تواند عملکرد یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی را از نظر ظرفیت باربری بالا، ضریب اصطکاک کم و دامنه پایداری دینامیکی گستردهتر بهبود بخشد. زارع مهرجردی و همکاران [۱۸] در همان سال تحلیل عملکرد حالت پایدار یاتاقانهای ژورنال گازی را در ازای ایجاد بافتهای سطحی در مناطق مختلف سطح داخلی پوسته ياتاقان بررسى كردند. نتايج اين پژوهش بر پايه روش حل عددی اجزاء محدود بیانگر آنست که ایجاد بافتهای استوانهای بویژه با عمقهای اندک در لُب تحتانی بر تغییر پارامترهای عملكرد ياتاقان گازى نظير يروفيل فشار تاثيرگذارتر است. همچنین با عمیق شدن بافتها بویژه با افزایش غیرمدوری یاتاقان، بار قابل حمل و اتلاف انرژی روانکار گازی کاهش یافته و میزان زاویه وضعی راستای قرارگیری روتور روندی افزایشی را نشان میدهد.

بعد از آن، نی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۲، تحلیلی از ظرفیت بار یاتاقان ژورنال با بافت سطحی بر پایه روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۹</sup> ارائه دادند. نتایج آنها نشان میدهد که موقعیت بافتها بر بار و فشار یاتاقان تأثیر میگذارد و ظرفیت

<sup>6</sup> Damping and Stiffness Coefficients

<sup>7</sup> Coefficient of Friction

<sup>8</sup> Critical Speed

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Power-law Non-Newtonian Base Oil

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Computationa Fluid Dynamic (CFD)

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Static and Dynamic Stability Performance Parameters

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Pressure Distribution

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Attitude Angle

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Load Carrying Capacity

داد. در این پژوهش، تأثیر قطر نانوذرات بر ویژگیهای ياتاقانهاى ژورنال هيدروديناميكى تحت اثرات حرارتى مورد بررسی قرار گرفته است. جریان روانکار در فاصله شعاعی با استفاده از معادله داوسون مدلسازی شده و میدان دمایی در محور و روانکار به ترتیب با معادله هدایت حرارتی و معادله انرژی توصیف شدهاند. ویژگیهای فیزیکی و حرارتی روانکار نانو با در نظر گرفتن قطر نانوذرات و نسبت حجمی بیان شدهاند. نتایج نشان میدهند که با کاهش قطر نانوذرات، مقادیر دما و فشار روانکار، ظرفیت باربری و سختی یاتاقان افزایش می یابند. بیسواس و همکاران [۲۷] در سال ۲۰۲۵ مروری بر پژوهشهای صورت گرفته در زمینه تاثیر بکارگیری نانو روانکار بر پارامترهای عملکرد یاتاقانهای ژورنال پرداختند. جمعبندی نتايج تحقيقات پيشين توسط اين محققان نشان مىدهد كه افزودن نانوذرات به روغنهای روانکار موجب افزایش ویسکوزیته، کاهش اصطکاک و بهبود هدایت حرارتی می گردد که در نهایت افزایش قابل توجه ظرفیت تحمل بار یاتاقان را به دنبال دارد. پنگ و جبارزاده [۲۸] در همین سال تاثیر شکل هندسی بافتهای سطوح بر خواص رئولوژیکی و تریبولوژیکی روانكار محصور بين آنها پرداختند. اين پژوهش بر مطالعه سطوح با الگوهای موجی سینوسی، دندانارهای و مربعی متمرکز است. شبیهسازیهای انجام شده بر تأثیر بارهای عمودی و نرخهای برش مختلف استوار هستند. نتایج نشان مىدهند كه الگوهاى سطحى تأثير قابل توجهى بر تشكيل و ساختار پلهای کریستالی دارند که این تأثیر به نرخ برش و بار عمودی بستگی دارد. موچامد و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۲۵ تحلیل تاثیر بافتهای سطحی موضعی را بر عملکرد الاستوهيدروديناميكي ياتاقانهاى ژورنال فولادى ارائه دادند. ارزیابیهای تجربی این محققین با استفاده از سیالات نیوتنی در سرعتهای چرخشی مختلف انجام شد تا اثر متقابل بین هندسه و خواص مواد ارزیابی شود. برای درک بهتر این پویاییها، آنها یک مدل سهبعدی دینامیک سیالات محاسباتی همراه با برهمکنش سیال و سازه را توسعه دادند که اثرات کاویتاسیون و تغییر شکل مواد در شرایط روانکاری الاستوهيدروديناميك را در نظر مي گيرد. نتايج اين مطالعه نشان میدهند که بافت سطحی و زبری تأثیر قابلتوجهی بر روانكارى الاستوهيدوديناميك و عملكرد كلى تريبولوژيكى

باربری زمانی افزایش مییابد که بافتها در منطقه فشار همگرای مثبت ایجاد میشوند. مروری بر عملکرد یاتاقانهای بافتدار توسط میشرا و آگاروال [۲۰] در سال ۲۰۲۳ انجام شد. پژوهش آنها نشان ميدهد كه وجود بافتها بر سطح ياتاقان منجر به اصطکاک کمتر و ظرفیت باربری بالاتر میشود. تأثیر سرعت لغزش بر عملكرد ترموهيدروديناميكي ياتاقانهاي بافتدار با لغزش جزئی توسط سینگ و کانگو [۲۱] در سال ۲۰۲۳ ارائه شد. بر اساس نتایج آنها، یاتاقان با بافت مربعی بیشترین بهبود را در پارامترهای عملکردی مختلف مانند فشار متوسط، نیروی اصطکاک و دمای روانکار در بین بافتهای مختلف بررسی شده، دارد. مطالعه نظری و تجربی ویژگیهای اصطکاکی یاتاقانهای ژورنال بافتدار توسط وانگ و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۲۳ ارائه شد. نتایج آنها که با استفاده از روش تفاضل محدود حاصل شده، نشان میدهد زمانی که تفاوت کمی بین پروفایل زبری و عمق حفرهها وجود دارد، اثر ایجاد شده توسط عامل زبری قابل چشمپوشی نیست. پروفیتو و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۲۴، یک ارزیابی عددی و تجربی درباره یاتاقانهای بافتدار برای کاهش اصطکاک ارائه دادند. اصطکاک اندازه گیری شده در حضور بافت با نمونه بدون بافت مقایسه شد. نتایج این مطالعه نشان میدهد که مکانیزمهای ریز مقیاس کاهش تنش برشی روانکار و ویسکوزیته مؤثر آن، به دلیل کاویتاسیون ناشی از بافت همزمان عمل میکنند تا ضریب اصطکاک پوستههای بافتدار را کاهش دهند. در همان سال میشرا و آگاروال [۲۴] در پژوهش دیگری مطالعه جامعی پیرامون تاثیر بکارگیری نانوذرات ترکیبی با روانکار پایه بر عملكرد ياتاقانهاى ژورنال هيدروديناميكى ارائه نمودند. بررسی پژوهش های تجربی و نظری پیشین توسط این محققین از بهبود پارامترهای عملکرد حالت پایدار یاتاقانهای ژورنال نظیر ظرفیت بار قابل حمل و انتقال حرارت تولیدی توسط روانکار است. حامید و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۲۴ تحلیل عملکرد استاتیکی یاتاقانهای ژورنال مدور بافتدار با نانوسیال روانکار را ارائه نمودند. نتایج این پژوهش بر پایه تحلیل اندرکنش سیال و سازه با روش CFD گویای آنست که با افزایش نانو ذرات TiO<sub>2</sub> قابلیت حمل بار یاتاقان به میزان قابل توجهی در شرایط ایجاد بافتها با عمق بهینه بهبود می یابد. دال [۲۶] در سال ۲۰۲۴ تاثیر قطر نانوذرات افزودنی به روانکار را بر عملکرد یاتاقانهای ژورنال مورد بررسی قرار

یاتاقانهای فولادی دارند. علاوه بر این، تغییرات سرعت چرخشی اثر محسوسی بر بازده روانکاری نشان میدهد.

با مرور کارهای صورت گرفته ملاحظه می گردد که تاکنون پژوهشی در زمینه عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی یاتاقانهای غیرمدور با بافتهای سطحی و رژیم روانکاری نانوسیال ارائه نشدهاست. از اینرو هدف از مطالعهی حاضر استخراج پارامترهای عملکرد حالت پایدار و بررسی پایداری دینامیکی یاتاقانهای غیرمدور دو لُب روانکاری شده با نانوسیال مرکب از ذرات دیاکسید تیتانیوم و روغن پایه SAE30 در حضور بافتهای سطحی استوانهای است.

## ۲- تئوری سیالات نانو و بافتهای سطحی

در سالهای اخیر، استفاده از نانو مواد با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، در روان کننده ها به دلیل بهبود خواص سطحی از جمله مقاومت در برابر سایش و اصطکاک، قابلیت بالا در انتقال حرارت و سازگازی اکثر این مواد با محیط زیست، بهعنوان یک ایدهی نو مورد توجه بسیاری از محققان و صنعت گران در حوزههای مختلف قرار گرفتهاست. نانو روانکار نامی است که به ترکیب ذرات نانو در یک سیال پایه اطلاق می شود. افزودن ترکیبات به روغنهای پایه روانکار برای حفظ و بهبود عملکرد کلی آنها از طرقى نظير تشكيل فيلم قوى، تثبيت لزجت، كاهش اثرات خوردگی، سایش و اصطکاک انجام می شود. مطالعات اخیر، پتانسیل مواد افزودنی نانو را نشان میدهد که بهطور قابل توجهی خصوصیات ترموفیزیکی و تریبولوژیکی روانکارهای پایه را بهبود میبخشند. خواص ترموفیزیکی، ویژگیهای فیزیکی و حرارتی نانوروانکارها را توصيف کرده و خواص تريبولوژيکی، کلیه فرآیندهای اصطکاکی بین دو جسم در حال تماس با یکدیگر را شامل می شود. نانوذرات پراکنده در روغن پایه، با سازوكارهاى مختلفى مانند اثر غلتكى، اثر ترميمى، تشكيل فيلم محافظ و اثر پرداخت همانند شكل ۱، خواص مختلف کارکردی روانکننده را بهبود میبخشند. در نتایج تحقیق پژوهشگران گزارش شده که در صورت استفاده از افزودنیهای مناسب در ابتدا میزان سایش سطوح، کاهش یافته و در ادامه به حداقل خود رسیده و سپس با افزایش کسری حجمی نانوذرات، امكان افزایش مجدد سایش وجود خواهد داشت.

یکی از عوامل مؤثر بر تغییر لزجت نانو سیال روانکار، غلظت نانو ذرات افزودنی است. با ترکیب نانو ذرات در غلظتهای

مختلف به روغن پایه، لزجت سیال روانکار، مقادیر متفاوتی به خود می گیرد که استخراج یک رابطه ریاضی جهت بیان لزجت نانو سیال تشکیل شده در غلظتهای مختلف، موضوعی است که توجه پژوهشگران حوزه تریبولوژی در سالیان اخیر را به خود جلب کردهاست. روابط ریاضی متفاوتی برای بیان لزجت نسبی نانو سیالات گوناگون ( $\mu_{rel}$ ) حاصل تقسیم لزجت نانو سیال به لزجت روانکار پایه ( $\mu_{nf}/\mu_{bf}$ )، در غلظتهای مختلف نانو ذرات افزودنی بیان شدهاست. یکی از این روابط در ادامه آمدهاست که به معادله کرایگر – دوگرتی موسوم است.



شکل ۱- اثر ذرات نانو بر مشخصههای تریبولوژیکی سطوح روانکاری شده [۳۰]

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi_a}{\phi_m}\right)^{-2.5\phi_m} \tag{1}$$

Modified Krieger-Dougherty

که در آن  $\frac{a_a}{a} = \phi \left(\frac{a_a}{a}\right)^{3-D}$  و  $a = \phi$  است. در این رابطه، a = a و a به ترتیب شعاع ذرات اولیه و توده ذرات میباشند. D شاخصی است که برای نانو روانکارها مقداری برابر ۱/۸ دارد. طبق نتایج ارائه شده در مرجع [۳۱] نسبت شعاع اولیه ذرات نانو به شعاع توده ذرات  $\left(\frac{a_a}{a}\right)$  برای نانو ذرات  $TiO_2$  اضافه شده به روغن مقور در 30 SAE برابر با ۷/۷۷ است؛ بنابراین لزجت نسبی برای

نانو سیال تشکیل شده از نانو ذرات TiO<sub>2</sub> و روغن پایه 30 SAE بر حسب درصد حجمی نانو ذرات اضافه شده در مقادیر مختلف به فرم ذیل است[۳۱].

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi}{0.605} (7.77)^{1.2}\right)^{-1.51}$$
(7)

در رابطه (۲)،  $\phi$  به درصد حجمی نانو ذرات افزودنی به روانکار پایه اشاره دارد. با جایگذاری لزجت نسبی روانکار از رابطه (۱) در معادله رینولدز، میتوان اثر درصد حجمی نانو ذرات  $TiO_2$  اضافه شده به روغن پایه بر عملکرد حالت پایای سیستم یاتاقانهای ژورنال را مورد بررسی قرار داد.

دلیل اصلی تفاوت عملکرد یاتاقانهای ژورنال مدور و غیرمدور در شرایط بارگذاری مشابه، اختلاف ضخامت فیلم روانکار محبوس در فضای لقی مابین روتور و سطح داخلی پوسته یاتاقان است. این پدیده به پیدایش توزیع فشارهای متفاوت در فیلم سیال روانکار یاتاقان منجر شده و زمینه تغییر وضعیت عملکرد یاتاقان را پایهریزی مینماید. بافتدار کردن سطح داخلی پوسته یاتاقان نیز سبب تغییر ضخامت روغن روانکار محبوس مابین روتور و پوسته در فضای لقی و تغییر در پارامترهای عملکرد یاتاقانهای ژورنال میشود. بهبود کارآیی پاتاقانهای ژورنال با بکارگیری بافتهای سطحی، بهشدت به شکل هندسی، ابعاد، محل بکارگیری و تراکم بافت وابسته است. شکل ۲ یک نمونه یاتاقان ژورنال غیرمدور دولُب بافتدار را نمایش میدهد.

امرزه با پیشرفت علم و بکارگیری فناوریهای مدرنی همچون روش لیزر، لیتوگرافی و قلمزنی ناهمسانگرد<sup>۲</sup>، قلمزنی یونی واکنش پذیر<sup>۳</sup>، ماشین کاری با جت ساینده<sup>۴</sup> و روش های مکانیکی همانند نورد ارتعاشی و فرز کاری، امکان ایجاد هر نوع شکل سهبعدی پیچیده بر روی سطوح صاف و هموار و تشکیل بافتهای گوناگون جهت بهبود عملکرد سطوح اجزاء مکانیکی درگیر با یکدیگر فراهم شدهاست[۳۲].

## ۳- معادلات حاکم

معادله رینولدز بیبعد حاکم بر روانکاری هیدرودینامیکی یاتاقان ژورنال در شرایط دمایی ثابت، روانکار تراکمناپذیر و فرض همراستایی محور روتور صُلب و پوسته، بهصورت ذیل قابل بیان است.



شکل ۲- یاتاقان ژورنال غیرمدور دولُب با بافتهای سطحی

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \bar{h}_n^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \theta} \right] \\ &+ \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \bar{h}_n^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right] \\ &= 6 \mu_{rel} \frac{\partial \bar{h}_n}{\partial \theta} \\ &+ 12 \mu_{rel} \frac{\partial \bar{h}_n}{\partial \tau} \end{aligned} \tag{(7)}$$

پارامترهای بیبعد معادله فوق در رابطه ذیل تعریف شدهاند.

$$\theta = \frac{x}{R}, \ \bar{z} = \frac{z}{L/2}, \ \bar{P} = \frac{C_m^2}{\mu_{bf}\omega R^2}P, \ \bar{h}_n = \frac{h_n}{c_m}, \ u = R\omega, \ \tau = t\omega, \ \mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}}$$
(\*)

ضخامت فیلم روانکار در هر نقطه از محیط پیرامون یاتاقان غیرمدور بافتدار را با رابطه زیر می توان بیان کرد [۳۳].

$$\bar{h}_n = \bar{h}_{n-smooth} + \Delta \bar{h}(\theta, z) \tag{(a)}$$

<sup>2</sup> Anisotropic Etching

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Reactive Ion Etching

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Abrasive Jet Machining

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Lithography

در رابطه (۵)،  $\overline{h}_{n-smooth}$  نشاندهنده ضخامت فیلم سیال قرار گرفته مابین روتور و پوسته در حالت بدون بافت در هر نقطه از محیط پیرامون یاتاقان مدور بوده که بهصورت رابطه (۶) تعریف میشود؛ همچنین  $\overline{h}(\theta, z)$  بیانگر عمق بافتهای استوانهای موجود روی سطح داخلی یاتاقان ژورنال غیرمدور مورد ارزیابی است [۳۴].

$$\bar{h}_{n} = \frac{h_{n}}{C_{m}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\delta} - \frac{X_{j}}{C_{m}} \cos \theta - \frac{Y_{j}}{C_{m}} \sin \theta \\ + \left(\frac{1}{\delta} - 1\right) \cos(\theta - \theta_{0}^{n}) \end{pmatrix} \quad (\pounds)$$

در رابطه (۶) اندیس n معرف شماره لُبهای یاتاقان ژورنال غیرمدور بوده و پارامترهای  $X_j,Y_j$  موقعیت مرکز ژورنال در وضعیت تعادل استاتیکی نسبت به محورهای مختصات و  $\theta_0^n$ زاویه خطالمرکزین لُبهای یاتاقان نسبت به محور X را نشان میدهند؛ همچنین پارامتر  $\delta$  بیانگر میزان غیرمدوری یاتاقان بوده و به صورت نسبت لقی شعاعی کمینه ( $c_n$ ) به بیشینه لقی شعاعی متداول (C)، در هنگام هممرکزی یاتاقان و محور تعریف می شود.

در پژوهش حاضر، تاثیر بافتهای حفرهای استوانهای شکل ایجاد شده در محدودهی زاویهای ثابت محیطی بر عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی مجموعه مورد ارزیابی قرار می  $\mathcal{R}_{x}$ ,  $r_{x}$  و  $r_{x}$  مورد ارزیابی قرار می  $\mathcal{R}_{x}$ . با توجه به شکل  $\mathcal{R}_{x}$ ,  $r_{x}$  و  $r_{x}$  مترتیب شعاع بافت در جهت محیطی، عمق و شعاع در جهت طولی هر یک از بافتهای استوانهای در راستاهای محورهای مختصات  $\mathcal{X}$  و Z می. باشند.



شکل ۳- هندسه عمقهای مختلف برای بافتهای حفره ای استوانهای در سطح داخلی پوسته یاتاقان

و  $r_x = r_z = r$ ، ۳ در هندسه بافت نشان داده در شکل  $r_x = r_z = r_z$  و معادلههای تعریف شده برای استوانه به شکل زیر است.

$$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2$$
 (Y)

که در آن  $o_c$  مرکز هر استوانه به مختصات محلی  $(x_c, y_c, z_c)$  در مجموعه بوده که هم تراز سطح بدون بافت یاتاقان یعنی در  $y_c = 0$  واقع شدهاست و عمق هر استوانه که در شکل ۳ نشان داده شده، برابر است با:

$$\Delta h = r_y \tag{(A)}$$

در تصویر دوبعدی ارائه شده در شکل ۴ نحوه مشبندی دامنه مسأله در اطراف هر یک از از بافتهای استوانهای در راستای طولی و محیطی یاتاقان ارائه شدهاست.



و نحوه مرزبندی آنها

با توجه به شبیهسازی جابجایی مرکز روتور بهصورت اغتشاشات نوسانی حلقه بسته با دامنه محدود که در شکل ۵ آمده، مؤلفههای جابجایی مرکز روتور در جهت محورهای مختصات را میتوان بهصورت زیر بیان نمود[20].

$$\bar{X}' = Re(|\bar{X}'|e^{j\gamma\tau}) \tag{9}$$

$$\bar{Y}' = Re(|\bar{Y}'|e^{j\gamma\tau}) \tag{(1)}$$

که در آن  $X \in \overline{Y}$  مؤلفههای جابجایی اغتشاشی مرکز روتور در راستای محورهای مختصات منطبق بر نقطه تعادل استاتیکی مرکز روتور و |X| و |Y| به دامنه این مؤلفهها اشاره دارند. *Re* نشان دهندهی بخش حقیقی کمیتهای داخل پرانتز و  $\overline{f}$  بیانگر  $\overline{f-}$  است؛ همچنین،  $\gamma$  که نسبت فرکانس چرخش

گردابی نامیده می شود، بیانگر نسبت سرعت زاویه ای حرکت اغتشاشی مرکز ژورنال حول نقطه تعادل استاتیکی ( $\omega_P$ ) به سرعت زاویه ای چرخش ژورنال حول محور طولی ( $\omega$ ) خود است. مقادیر مؤلفه های فشار دینامیکی ( $\bar{P'}_X, \bar{P'}_J$ ) روی دامنه مسئله، با مشتق گیری از فرم بی بعد معادله رینولدز (رابطه ۱) نسبت به مؤلفه های مختصات دینامیکی ( $\bar{X}, \bar{X}$ ) و برابر با صفر قرار دادن  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  در معادلات حاصل، به فرم رابطه (۱۱) محاسبه می شود.



شکل ۵- مدار جابجایی اغتشاشی مرکز روتور در فضای یاتاقان ژرونال غیرمدور دولُب بر پایه مدل دینامیکی خطی

$$\begin{split} &\frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \bar{h}_{0}^{3} \frac{\partial \bar{P}_{l}'}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{D}{L} \right)^{2} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \bar{h}_{0}^{3} \frac{\partial \bar{P}_{l}'}{\partial \bar{z}} \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \left[ 3 \bar{h}_{0}^{2} \frac{\partial \bar{P}_{0}}{\partial \theta} - 6 \mu_{rel} \right] f(\theta) \right\} \\ &+ \left( \frac{D}{L} \right)^{2} \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ 3 \bar{h}_{0}^{2} f(\theta) \frac{\partial \bar{P}_{0}}{\partial \bar{z}} \right] \\ &- 12 j \gamma \mu_{rel} f(\theta) \end{split}$$
(11)

یارامترهای  $ar{P'_I}$  و f( heta) در معادله بالا عبارتند از:

$$\bar{P}'_{I} = \bar{P}_{I} + j\gamma \bar{P}_{i} , \qquad I = X,Y \qquad (17)$$

$$(\cos\theta \quad \text{clup} \quad \bar{P}'_{X}$$

$$f(\theta) = \begin{cases} sin\theta & g(\theta) & g(\theta) \\ sin\theta & g(\theta) & g(\theta) \\ g(\theta) & g(\theta) & g(\theta) & g(\theta) \\ g(\theta) & g(\theta) & g(\theta) & g(\theta) & g(\theta) \\ g(\theta) & g(\theta)$$

در پژوهش حاضر از روش حل عددی اجزاء محدود بر پایه مدل گالرکین جهت حل معادلات حاکم بر روانکاری یاتاقان ژورنال غیرمدور دولُب استفاده شدهاست [۳۴].

## ۴- مشخصههای عملکرد یاتاقان ژورنال دو لُب

الف) بار قابل حمل توسط ياتاقان

مؤلفههای بار قابل حمل توسط یاتاقان در راستای محورهای مختصات از رابطه (۱۴) قابل محاسبه است.

$$\begin{bmatrix} \overline{W}_{X0} \\ \overline{W}_{Y0} \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{N} \begin{bmatrix} \overline{W}_{X0} \\ \overline{W}_{Y0} \end{bmatrix}$$
$$= \sum_{n=1}^{N} \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \int_{-1}^{+1} \overline{P}_{0n} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} d\bar{z}d\theta$$
(14)

برآیند کلی بار قابل حمل توسط یاتاقان نیز بهصورت زیر بهدست میآید.

$$\overline{W}_{0} = \frac{2C_{m}^{2}}{\mu_{bf}\omega R^{3}L}W_{0} = \sqrt{\overline{W}_{0x}^{2} + \overline{W}_{0y}^{2}}$$
(12)

## ب) زاویه وضعی

مقدار زاویه وضعی در یاتاقان با توجه به تعادل استاتیکی مرکز روتور جهت رسیدن به بار برآیند عمودی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\varphi_0 = Arc \tan\left(-\frac{X_{J0}}{Y_{J0}}\right) \tag{19}$$

۴–۱– پایداری دینامیکی یاتاقان بر پایه مدل خطی عامل تعیین کننده بزرگی پارامترهای مشخصه پایداری دینامیکی یاتاقانهای ژورنال غیرمدور در مدل خطی، مطابق شکل ۶ به مقادیر ضرایب سفتی و میرایی معادل قابل محاسبه برای فیلم روانکار از حل معادلات حاکم وابسته است. هستند. با فراخوانی روابط (۱۴)، (۱۷) و (۱۹) و جداسازی متغیرها، صورت بیبعد مؤلفههای سفتی و میرایی معادل فیلم سیال روانکار مطابق روابط ذیل حاصل می گردند.

$$\begin{bmatrix} \bar{S}_{XX} & \bar{S}_{XY} \\ \bar{S}_{YX} & \bar{S}_{YY} \end{bmatrix} = \\ \sum_{n=1}^{N} \int_{-1}^{+1} \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \begin{bmatrix} \bar{P}_X \\ \bar{P}_Y \end{bmatrix} \{ \cos\theta \quad \sin\theta \} \, d\theta d\bar{z}$$
 (7.)

$$\begin{bmatrix} \bar{B}_{XX} & \bar{B}_{XY} \\ \bar{B}_{YX} & \bar{B}_{YY} \end{bmatrix} =$$

$$\sum_{n=1}^{N} \int_{-1}^{+1} \int_{\theta_1^n}^{\theta_2^n} \begin{bmatrix} \bar{P}_{\dot{X}} \\ \bar{P}_{\dot{Y}} \end{bmatrix} \{ \cos\theta \quad \sin\theta \} \, d\theta d\bar{z}$$

$$(11)$$

معادلات جابجایی دینامیکی مرکز روتور قرار گرفته بر تکیهگاههایی از جنس یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی، بهازای حرکت چرخشی پریودیک حول نقطه تعادل استاتیکی در راستای محورهای مختصات (X,Y) به فرم ذیل بیان میشود.

$$\begin{split} \bar{M}_{J} \left\{ \ddot{\bar{X}}' \\ \ddot{\bar{Y}}' \right\} + \begin{bmatrix} \bar{B}_{XX} & \bar{B}_{XY} \\ \bar{B}_{YX} & \bar{B}_{YY} \end{bmatrix} \left\{ \ddot{\bar{X}}' \\ \dot{\bar{Y}}' \right\} \\ + \begin{bmatrix} \bar{S}_{XX} & \bar{S}_{XY} \\ \bar{S}_{YX} & \bar{S}_{YY} \end{bmatrix} \left\{ \ddot{\bar{X}}' \\ \bar{\bar{Y}}' \right\} \\ = 0 \end{split}$$
(77)

در رابطه (۲۲)، پارامتر  $\overline{M}_J = M_J(2C_m^3 \omega / \mu R^3 L)$  به جرم بیبعد روتور اشاره دارد. در صورت جایگذاری مقادیر پارامترهای  $\overline{X}$  و  $\overline{Y}$  و مشتقات آن با توجه به معادلات (۹) و (۱۰) در رابطه (۲۲)، عبارت ذیل حاصل خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} -\overline{M}_{J}\gamma^{2} + \overline{S}_{XX} + i\gamma\overline{B}_{XX} \\ \overline{S}_{YX} + i\gamma\overline{B}_{YX} \\ \overline{S}_{XY} + i\gamma\overline{B}_{XY} \\ -\overline{M}_{J}\gamma^{2} + \overline{S}_{YY} + i\gamma\overline{B}_{YY} \end{bmatrix} \left\{ \overline{\bar{X}}' \\ \overline{\bar{Y}}' \right\} = 0$$

$$(\Upsilon^{\gamma})$$

وجود جواب غیربدیهی 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:

$$(-\overline{M}_{J}\gamma^{2} + \overline{S}_{XX} + i\gamma\overline{B}_{XX})(-\overline{M}_{J}\gamma^{2} + \overline{S}_{YY} + i\gamma\overline{B}_{YY}) - (\overline{S}_{XY} + i\gamma\overline{B}_{XY})(\overline{S}_{YX} + i\gamma\overline{B}_{YX}) = 0$$

$$(\Upsilon F)$$



رابطه (۱۷) نحوه محاسبه مؤلفههای نیروی دینامیکی ایجاد شده توسط فیلم روانکار در اثر بروز رفتار اغتشاشی مرکز روتور را بیان میکند.

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{X} \\ \bar{F}_{Y} \end{bmatrix} = \frac{2C_{m}^{2}}{\mu_{bf}\omega R^{3}L} \begin{bmatrix} F_{X} \\ F_{Y} \end{bmatrix}$$

$$= \sum_{n=1}^{N} \int_{-1}^{+1} \int_{\theta_{1}^{n}}^{\theta_{2}^{n}} \bar{P}_{n} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} d\theta d\bar{z}$$

$$(1Y)$$

فرم برداری نیروهای فیلم سیال در حالت دینامیکی از مجموع نیروهای تعادلی حالت پایدار و نیروهای ناپایدار اغتشاشی بهصورت زیر بهدست میآید.

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{X} \\ \bar{F}_{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}_{X0} \\ \bar{F}_{Y0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overline{\Delta}\bar{F}_{X} \\ \overline{\Delta}\bar{F}_{Y} \end{bmatrix}$$
(1A)

در رابطه (۱۸)،  $(A\overline{F}_X A\overline{F}_Y)$  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 می گردند.

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{F}_{X} \\ \Delta \bar{F}_{Y} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{S}_{XX} & \bar{S}_{XY} \\ \bar{S}_{YX} & \bar{S}_{YY} \end{bmatrix} \{ \bar{X}' \\ \bar{F}' \} \\ - \begin{bmatrix} \bar{B}_{XX} & \bar{B}_{XY} \\ \bar{B}_{YX} & \bar{B}_{YY} \end{bmatrix} \{ \bar{X}' \\ \bar{Y}' \}$$
(19)

در رابطه فوق پارامترهای 
$$\bar{S}_{ij}, \bar{B}_{ij}; \; i.j = X.Y$$
 معرف  
ضرایب سفتی و میرایی فیلم روانکار در حالت دینامیکی

جداسازی بخشهای حقیقی و موهومی معادله (۲۴) و معادل قرار دادن آنها با صفر، دو معادله مجزای (۲۵) و (۲۶) را بهدست میدهد. با فرض مقدار اولیه برای پارامتر γ و محاسبه ضرایب دینامیکی متناظر از معادلات (۲۰) و (۲۱) پارامترهای لازم جهت بررسی معادلات ذیل فراهم می گردد.

$$\frac{\overline{M}_{J}\gamma^{2} =}{\frac{(\overline{S}_{XX}\overline{B}_{YY} + \overline{S}_{YY}\overline{B}_{XX} - \overline{S}_{XY}\overline{B}_{YX} - \overline{S}_{YX}\overline{B}_{XY})}{(\overline{B}_{XX} + \overline{B}_{YY})}}$$
(Ya)

$$\gamma^{2} = \frac{\left[\left(\bar{s}_{XX} - \bar{M}_{J}\gamma^{2}\right)\left(\bar{s}_{YY} - \bar{M}_{J}\gamma^{2}\right) - \bar{s}_{XY}\bar{s}_{YX}\right]}{\left(\bar{B}_{XX}\bar{B}_{YY} - \bar{B}_{XY}\bar{B}_{YX}\right)}$$
(79)

معادلات فوق معیاری برای تعیین حاشیه پایداری دینامیکی سیستم بر اساس پارامتر جرم بیبعد روتور و نسبت فرکانس چرخش گردابی  $(\overline{M}_{J}, \gamma)$  هستند. با مشخص شدن مقدار نهایی نسبت فرکانس چرخش گردابی تصحیح شده و اتمام مراحل روش تکرار بکار گرفته شده، حوزه پایداری مجموعه روتور و یاتاقانهای ژورنال مورد بررسی بر اساس مدل دینامیکی خطی را میتوان با بکارگیری معادله زیر تعیین نمود [73].

$$\overline{M}_{C} = \frac{(\overline{S}_{XX}\overline{B}_{YY} + \overline{S}_{YY}\overline{B}_{XX} - \overline{S}_{XY}\overline{B}_{YX} - \overline{S}_{YX}\overline{B}_{XY})}{[(\overline{B}_{XX} + \overline{B}_{YY})\gamma^{2}]}$$
(YY)

در رابطه فوق  $\overline{M}$  به مقدار پارامتر جرم بحرانی بیبعد روتور جهت قرارگیری سیستم در آستانه ناپایداری اشاره دارد. با شروع از یک مقدار تخمینی برای *۲*، مقادیر پارامتر جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی در آستانه ناپایداری دینامیکی سیستم دوار مدل شده، با روش تکرار قابل دستیابی خواهند بود.

## ۵- بحث و بررسی پیرامون نتایج تحلیل

در پژوهش حاضر از شرط مرزی رینولدز برای تعیین ناحیه کاویتاسیون در لُبهای یاتاقان استفاده شده و فشار سیال روانکار و مشتق آن در مرز کاویتاسیون برای برقراری پیوستگی جریان همانند رابطه (۲۸) برابر صفر فرض گردیدهاست.

$$\begin{array}{ll} P_n = 0 & \theta = \theta_1^n \\ P_n = dP_n/d\theta & \theta = \theta_2^n \\ = 0 & \theta_{cav}^n \\ P_n = 0 & z = \pm L/2 \end{array} (\%)$$

در رابطه فوق n = 1,2 به شماره لُبهای یاتاقان اشاره دارد. همچنین پارامترهای مشخصه طراحی یاتاقان ژورنال غیرمُدور مورد مطالعه و بافتهای سطحی مطابق جدول ۱ ارائه شدهاند.

جدول ۱- مشخصات طراحی یاتاقانهای مورد مطالعه

مقدار (بیبعد)	تعريف	پارامتر
۵	تعداد بافتها در جهت محیطی	$N_{\mathrm{xD}}$
١.	تعداد بافتها در جهت طولي	$N_{zD}$
•/•۴٧۶	شعاع بیبعد بافتها در جهت محیطی	R <sub>x</sub>
•/•٣٣٨	شعاع بیبعد بافتها در جهت طولی	Rz
•/۵	نسبت خروج از مرکزی	ε
•/•۵	نقطه شروع بافت در راستای طولی	$\mathbf{z_1}$
•/•۵	نقطه پایان بافت در راستای طولی	$\mathbf{z}_2$
• /Y	ميزان غيرمدورى	δ
١	نسبت منظرى	L/D

بهمنظور بررسی صحت عملکرد برنامه رایانهای تدوین شده جهت تحلیل عملکرد هیدرودینامیکی یاتاقان ژورنال غیرمدور دولُب با بافتهای استوانهای در عمقهای مختلف تحت روانکاری با نانو سیال *TiO<sub>2</sub>/SAE*30 در ابتدا نتایج خروجی برنامه برای زاویه وضعی روتور در فضای لقی در یاتاقانهای ژورنال مدور بافتدار با نتایج مشابه مرجع [۳۳]، در جدول ۲ و همچنین برای میزان بار قابل حمل در یاتاقان ژورنال مدور بدون بافت با نانو روانکار *TiO<sub>2</sub>/SAE*30 مرجع [۳۳]، در شکل مرجع ایسه شدهاست.

جدول ۲- محدودهی ایجاد بافتها و مشخصههای عملکرد یاتاقان ژورنال مدور با بافت استوانهای r., = 0.015mm , r = 1mm

$\varepsilon = 0.6  {}_{\circ} {}^{L} / {}_{D} = 1$						
$arphi^{\circ b}$	$arphi^{\circ a}$	$h_{min}{}^b$ ( $\mu m$ )	h <sub>min</sub> <sup>a</sup> (μm)	$z_1 - z_2$	$\theta_1^{\circ} - \theta_2^{\circ}$	
41/1	۴۸/۵	11/88	۱۱/۲۵	•-•/۵	۰ ـ ۹ ۰	
۵۱/۳	۵۰/۴	11/78	۱۱/۹۶	۰-•/۲۵	۰-۴۵	
49/3	49	18/80	17/18	•/1۲-•/۵	170-22.	
49/0	49/8	17/71	17/11	•/۲-•/۵	11220	
44/4	49	12/10	17/19	•/1Y-•/۵	۱۸۵-۲۳۰	
					_	

a: مرجع [۳۳] و b: مطالعه حاضر

در ادامه در شکل ۸ اثر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> موجود در سیال روانکار پایه SAE30 در یاتاقان دولُب با سطح بدون بافت بر توزیع فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار در خط مرکزی

راستای طولی یاتاقان نشان داده شدهاست. نمودارهای شکل ۸ بر تقویت فشار توزیع شده در فیلم سیال روانکار یاتاقانهای ژورنال غیرمدور دولُب بدون بافت در هر دو لُب یاتاقان با افزایش مقدار نانوذارت TiO2 در روغن پایه روانکار SAE30 دلالت دارند. افزایش لزجت سیال روانکار با افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در روغن پایه، دلیل این موضوع است. ملاحظه می گردد که در هر دو یاتاقان ژورنال غیرمدور بدون بافت بههنگام افزایش بیشتر نانوذرات TiO<sub>2</sub> به روغن پایه، فاصله نمودار توزیع فشار در فیلم سیال بهعلت افزایش گرانروی آن از فشار توزیع شده در روانکار بدون نانوذرات بیشتر می شود. با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۸، ملاحظه می گردد که زاویه محیطی تقریبی °۲۷۰ تا °۳۳۰، یک مکان مهم در یاتاقان محسوب شده؛ چرا که در این زاویه، فشار بیشینه توزیع شده در فیلم سیال روانکار ایجاد می گردد. ایجاد بافتهای سطحی در این ناحیه می تواند بیشترین تأثیر گذاری بر عملکرد یاتاقان را در پی داشته باشد؛ لذا در ادامه اثر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در روانکار پایه SAE30 نسبت به عمق بافتهای سطحی قرار گرفته بر سطح داخلی پوسته یاتاقان در زاویه محیطی ۲۷۰<sup>°</sup> تا ۳۰۰<sup>°</sup> و ۳۰۰<sup>°</sup> تا ۳۳۰<sup>°</sup> در یاتاقانهای دولُب بر پارامترهای عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی مجموعه، همانند میزان بار قابل حمل یاتاقان، زاویه وضعی روتور در فضای لقی و همچنین جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی آن مورد بررسی قرار گرفتهاست.



نانوروانکار TiO2/SAE30 نانوروانکار



شکل ۸- اثر غلظت نانوذرات TiO₂ در روغن روانکار پایه SAE30 بر توزیع فشار در صفحه مرکزی راستای طولی یاتاقانهای ژورنال دولُب بدون بافت

در شکل ۹، غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> بر میزان بار قابل حمل در یاتاقانهای ژورنال غیرمدور دولُب بر حسب عمق بافتهای استوانهای نشان داده شدهاست. نمودارهای شکل ۹ نشان میدهند که در یاتاقانهای ژورنال غیرمدور دولُب با قرارگیری بافتهای سطحی با شکل هندسی استوانه در زاویه محیطی ۲۷۰ تا ۳۰۰، میزان بار قابل حمل در یاتاقان افزایش می یابد. این افزایش اشاره شده، با ایجاد بافت در عمقهای کم، ظاهر شده و پس از گذشتن از یک عمق خاص، روند صعودی میزان بار قابل حمل در یاتاقان متوقف می شود. اما تحلیل نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ بیانگر کاهش میزان بار قابل حمل در یاتاقانهای ژورنال غیرمدور دولُب با ایجاد و سپس افزایش عمق بافت در صورت قرار گیری بافتهای استوانهای در زاویه محیطی "۳۰۰ تا "۳۳۰ است. در این مورد نیز کاهش در میزان بار اشاره شده، با ایجاد بافت در عمقهای کم، ظاهر شده و پس از گذشتن از یک عمق خاص، روند نزولی میزان بار قابل حمل در یاتاقان متوقف می شود.

از نمودارهای موجود در شکل ۸ همچنین می توان نتیجه گرفت که در صورت افزایش غلظت نانوذارت TiO<sub>2</sub> در روغن پایه روانکار یاتاقانهای ژورنال غیرمدور در حضور بافت یا بدون آن و در هر عمق یا مکان قرارگیری ناهمواریهای سطحی، میزان بار قابل حمل در یاتاقان افزایش می یابد. دلیل این افزایش که در مقادیر بیشتر نانوذارت نمایان تر می شود را می توان به افزایش لزجت نسبی سیال روانکار یاتاقان با ترکیب نانوذرات به روغن پایه نسبت داد.

### زارع مهرجردی و همکاران | ۱۴۷

فضای لقی یاتاقان غیرمدور مورد بررسی و قرارگیری بافت در هر مکانی، از منحنی های شکل ۱۰ مشاهده می شود.



شکل ۱۰– اثر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در روغن پایه ۲۰۵۵ بر زاویه وضعی روتور در یاتاقان دولُب بر حسب عمق بافتهای استوانهای

در شکل ۱۱، اثر کسر حجمی نانوذرات TiO<sub>2</sub> موجود در روانکار پایه بر حسب عمق بافتهای استوانهای قرارگرفته در دو زاویه محیطی °۲۷۰ تا °۳۰۰ و °۳۰۰ تا °۳۳۰ برای یاتاقان دولب بر پارامتر جرم بحرانی روتور نشان داده شدهاست. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ نشان میدهند که با قرارگیری بافتهای سطحی در منطقه زاویهای °۳۰۰ تا °۳۳۰ در یاتاقانهای دولب، تغییر عمق این ناهمواریها اثر مثبتی بر پایداری بیشتر یاتاقان ایجاد نمی کند.





شکل ۹- اثر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در روغن پایه SAE30 بر میزان بار قابل حمل در یاتاقانهای دولُب بر حسب عمق بافتهای استوانهای

نحوه اثر گذاری عمق بافتهای استوانهای با زاویه قرار گیری مشخص و تغییر در کسر حجمی نانوذارت TiO<sub>2</sub> موجود در روانکار پایه SAE30 بر زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقانهای ژورنال غیرمدور دولُب در شکل ۱۰ نشان داده شدهاست. نمودارهای شکل ۱۰، تغییرات مشخصه نامبرده بر حسب غلظت نانوذرات و عمق بافتهای استوانهای قرار گرفته در دو زاویه محیطی ۲۷۰ تا ۳۰۰ و ۳۰۰ تا ۳۳۰، را نشان میدهند. طبق نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۰ میتوان نتیجه گرفت که با ایجاد بافتهای استوانهای در زاویه محیطی °۲۷۰ تا °۳۰۰، زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان یاتاقان غیرمدور دولُب با نانوروانکار TiO<sub>2</sub>/SAE30 در هر غلظتی از نانوذارت TiO<sub>2</sub>، با شیب نسبتاً تندی کاهش یافته و سیس با افزایش عمق بافت، این روند کاهشی، متوقف میشود. این در حالی است که با انتقال زاویه قرارگیری بافتهای سطحی به زاويه محيطي ٢٠٠٣ تا ٣٣٠، روند تغييرات پارامتر زاويه وضعي در فضای لقی یاتاقان با افزایش عمق بافت، نامشخص بوده و شکل ثابتی ندارد. همچنین بی اثر بودن غلظت نانوذارت TiO<sub>2</sub> موجود در روانکار پایه SAE30 بر پارامتر زاویه وضعی روتور در



شکل ۱۱- اثر کسر حجمی نانوذرات TiO<sub>2</sub> موجود در روانکار پایه SAE30 بر جرم بحرانی روتور در یاتاقانهای ژورنال دولُب بر حسب عمق بافت

با ایجاد بافتهای استوانهای، پایداری سیستم در قالب کاهش جرم بحرانی روتور، تضعیف شده و با رسیدن به یک عمق خاص، جرم بحرانی روتور با کاهش بیشتر عمق بافتها در بازه [۱-۰] به مقداری ثابت رسیده و روند کاهش پایداری سیستم یاتاقان-روتور متوقف می شود. این در حالی است که در صورت بکارگیری بافتهای سطحی در منطقه زاویهای ۲۷۰ تا ۳۰۰<sup>۰</sup> همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شدهاست، تا یک عمق معین، پایداری دینامیکی سیستم نسبت به یاتاقان بدون بافت کاهش می یابد و با رسیدن به یک عمق معین، این پایداری افزایش یافته و سپس با گذر از عمق مشخصی دیگر، پایداری سیستم در قالب کاهش جرم بحرانی روتور، کاسته میشود. بهعبارتی دیگر در یاتاقانهای ژورنال غیرمدور دولُب در صورت بکارگیری بافتهای سطحی در منطقه زاویهای ۲۷۰° تا ۳۰۰٬ با ایجاد و سپس افزایش عمق بافت، پایداری سیستم تکیه گاهی شامل یاتاقان بافتدار نسبت به نوع بدون بافت روندی کاهشی، افزایشی و مجدداً کاهشی را طی میکند؛ همچنین در یاتاقان ژورنال غیرمدور مورد بررسی، افزودن نانوذرات TiO<sub>2</sub> به روغن روانکار پایه SAE30 اثری بر پارامتر جرم بحرانی روتور و پایداری سیستم یاتاقان-روتور ایجاد نخواهد کرد. لذا می توان بیان نمود که در یا تاقان های ژورنال غیرمدور دولب، با ایجاد بافتهای استوانهای با عمق و مکان قرار گیری صحیح توأم با استفاده از نانو روانکار TiO<sub>2</sub>/SAE30 مي توان به يک عملکرد بهينه از لحاظ شرايط استاتيکي و دینامیکی نسبت به یاتاقانهای بدون بافت با روانکار نیوتونی معمولي دست يافت.

در ادامه، اثر غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> موجود در روانکار پایه SAE30 بر حسب عمق بافتهای استوانهای قرارگرفته در دو مکان محیطی مختلف برای یاتاقان دولُب بر مشخصه نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور، در شکل ۱۲، نشان داده شدهاست.



شکل ۱۲– اثر کسر حجمی نانوذرات TiO<sub>2</sub> موجود در روانکار پایه SAE30 بر نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور در فضای لقی یاتاقانهای غیرمدور دولُب بر حسب عمق بافت

نتایج ارائه شده در شکل ۱۲ بر کاهش پایداری سیستم تکیهگاهی روتور– یاتاقان ژورنال غیرمدور دولُب نسبت به نوع بدون بافت در صورت بکارگیری بافتهای سطحی با شکل هندسی استوانه و قرارگیری آنها در زاویه محیطی <sup>°</sup>۳۰۰ تا <sup>°</sup>۳۰۰ و سپس افزایش عمق بافتها در قالب افزایش مشخصه نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور در فضای لقی حکایت دارند. همچنین نتایج نمودارهای شکل ۱۲ نشان میدهند که اگر بافتهای سطحی در زاویه محیطی <sup>°</sup>۲۰۰ تا <sup>°</sup>۳۰۰ قرار گیرند، پایداری سیستم نسبت به یاتاقان بدون بافت، با ایجاد و سپس افزایش عمق بافت، روندی کاهشی و سپس افزایشی طی خواهد کرد. این بدان معنی است که با قرارگیری بافتهای استوانهای در محدوده زاویهای <sup>°</sup>۲۷۰ تا <sup>°</sup>۳۰۰، در یک عمق

خاصی از بافتهای سطحی، افزایش پایداری سیستم نسبت به نوع بدون بافت، حاصل میشود.

نتایج بررسی انجام شده حاکی از آنست که بکارگیری بافتهای استوانهای در موقعیت و عمق معین و همچنین ترکیب درصد حجمی بهینه از نانو ذرات TiO<sub>2</sub> میتواند به عنوان راهکاری مناسب برای بهبود عملکرد پایا و و پایداری دینامیکی یاتاقانهای ژورنال مورد استفاده قرار گیرد.

## ۶- نتیجهگیری

در پژوهش حاضر تأثیر ایجاد بافتهای استوانهای شکل با عمقهای متفاوت و تراکم ثابت در ناحیه پرفشار از سطح داخلی پوسته ياتاقانهاى ژورنال هيدروديناميكى غيرمدور دولُب توأم با میزان غلظت نانوذرات تیتانیوم دی اکسید افزوده شده به روغن نيوتونى پايه SAE30 بەمنظور جايگزينى روانكار نيوتونى با نانو روانکار TiO<sub>2</sub>/SAE30 بر شاخصهای عملکرد استاتیکی و پایداری دینامیکی سیستم دوار شامل بار قابل حمل، زاویه وضعی روتور در فضای لقی، جرم بحرانی و نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور مورد بررسی قرار گرفتهاست. به این منظور معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقان های ژورنال با نانوسیال تراکمناپذیر، با توجه به فرض طول محدود و نیز لحاظ تغییرات ضخامت فیلم روانکار متناسب با عمق بافتهای سطحی حفرهای در پوسته و تغییر لزجت نسبی سیال روانکار با تغییر درصد حجمی نانوذرات ترکیبی به کمک روش حل عددی اجزاء محدود ارزیابی گردیده است. همچنین شرط مرزی رينولدز جهت تفكيك نواحى فيلم فشارى همكرا و واكرا يا همان مرز رخداد ناحیه کاویتاسیون در فیلم روانکار بکار گرفته شدهاست. از بررسی نتایج پژوهش حاضر موارد ذیل قابل استنباط ميباشند:

۱- نتایج بر افزایش فشار توزیع شده در روانکار یاتاقانهای دولُب با افزایش مقدار نانوذارت TiO<sub>2</sub> دلالت دارند. افزایش لزجت روانکار با افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در روغن پایه کرجت روانکار با افزایش غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در روغن پایه در یاتاقان دولُب بههنگام افزایش بیشتر ذرات TiO<sub>2</sub> به روغن پایه، فاصله منحنی توزیع فشار در فیلم سیال بهعلت افزایش پایه، فاصله منحنی توزیع فشار در فیلم سیال بهعلت افزایش کرانروی آن از فشار روانکار بدون نانوذرات بیشتر میشود.
 ۲- در یاتاقانهای دولُب با قرارگیری بافتهای سطحی استوانهای در زاویه محیطی <sup>°</sup> ۲۰۰۰ میزان بار قابل

حمل در یاتاقان افزایش مییابد. این افزایش با ایجاد بافت در عمقهای کم، ظاهر شده و پس از گذشتن از یک عمق خاص، روند صعودی میزان بار قابل حمل در یاتاقان متوقف می شود. کاهش میزان بار یاتاقانهای دولُب با ایجاد و سپس افزایش عمق بافت در صورت قرار گیری بافتهای استوانهای در زاویه محیطی "۳۰۰ تا "۳۳۰ از دیگر نتایج استنتاج شده میباشد. در این مورد نیز، کاهش در میزان بار اشاره شده، با ایجاد بافت در عمق های کم، ظاهر شده و پس از گذشتن از یک عمق خاص، روند نزولی میزان بار قابل حمل در یاتاقان متوقف می شود؛ همچنین می توان نتیجه گرفت که در صورت افزایش غلظت نانوذارت TiO<sub>2</sub> در روغن پایه روانکار یاتاقانهای دو لُب با یا بدون بافت مورد بررسی و در هر عمق یا مکان قرارگیری ناهمواریهای سطحی، میزان بار قابل حمل در یاتاقان افزایش می یابد. دلیل این افزایش که در مقادیر بیشتر نانوذارت ترکیبی نمایان تر می شود را می توان به افزایش لزجت سیال روانکار با افزودن نانوذرات نسبت داد.

۳– ایجاد بافتهای سطحی استوانهای با هر عمقی در زاویه محیطی "۲۰۰ تا "۳۰۰ سبب کاهش پایداری دینامیکی محیطی "۲۰۰ تا "۳۰۰ سبب کاهش پایداری دینامیکی سیستم روتور– یاتاقان دو لُب میشود؛ در حالیکه قرار دادن بافتها در زاویه محیطی "۲۰۰ تا "۲۰۰ با تغییر در عمق بی پایداری دینامیکی در بافتها در بازه [۱–۰] یک روند نزولی– صعودی– نزولی در پایداری دینامیکی یاتاقان بافتدار نسبت به نوع بدون بافت "بعد بافت در بازه یاتاقان بافتدار نسبت به نوع بدون بافت «۲۰۰ تا "۲۰۰ تا "۲۰۰ با تغییر در عمق بی پایداری دینامیکی یاتاقان بافتدار نسبت به نوع بدون بافت "۲۰۰ تا "۲۰۰ تا "۲۰۰ تا "۲۰۰ تا "۲۰۰ تا "۲۰۰ یک زاویه محیطی "د۰۰ تا «۲۰۰ یک زاویه مطلوب جهت ایجاد بافت استوانهای با هر عمق و زاویه محیطی "۲۰۰ تا "۲۰۰ یک زاویه مطلوب جهت ایجاد بافت با عمق بهینه در سیستم تکیه گاهی یاتاقان نانوذارت *Tio* در روانکار پایه SAE30 در بازه ۰۰ تا ۲۰۰۰ درصد دو لُب است؛ همچنین، نتایج بر عدم تأثیر محسوس ترکیب خرمی بر پایداری دینامیکی سیستم دلالت دارد.

## ۷- فهرست علائم

در جدول نمادهای ذیل، پارامترهای بدون بعد با علامت بار نمایش داده شدهاند.

 ${inom{(N.S/m)}{m}}$  ضرایب میرایی معادل روانکار  ${inom{(N.S/m)}{m}}$  لقی متداول (m) C قطر یاتاقان (m) D

- [2] Han Y, Fu Y (2019) Comparison of hydrodynamic characteristics between circumferential and transversal microgrooved journal bearings. Lub Sci 31(2):285–298.
- [3] Sharma S, Jamwal G, Awasthi RK (2019) Enhancement of steady state performance of hydrodynamic journal bearing using chevronshaped surface texture. Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol 233(12):1833–1843.
- [4] Kumar A, Sharma SC (2019) Optimal parameters of grooved conical hybrid journal bearing with shear thinning and piezoviscous lubricant behavior. J Tribol 141(7):071702:1–13.
- [5] Manser B, Blaidi I, Hamrani A, Khelladi S (2019) Performance of hydrodynamic journal bearing under the combined influence of textured surface and journal misalignment: A numerical survey. C R Méc 347(2):141–165.
- [6] Sharma N, Kango S (2020) Influence of high permeability parameter on the performance of textured porous journal bearings. Tribol Ind 42(3):370–381.
- [7] Xiang G, Han Y (2020) Study on the tribo-dynamic performances of water-lubricated microgroove bearings during start-up. Tribol Int 151:106395.
- [8] Singh N, Awasthi RK (2020) Theoretical investigation of surface texture effects on the performance characteristics of hydrodynamic twolobe journal bearing. Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol 234(11):1712–1725.
- [9] Bhasker B, Seetharamaiah N, Ramesh Babu P (2021) Thermal studies of steadily loaded surface textured noncircular journal bearing profiles to investigate the performance characteristics. Heat Transf 50(2):1911–1924.
- [10] Suryawanshi SR, Pattiwar JT (2018) Effect of TiO2 nanoparticles blended with lubricating oil on the tribological performance of the journal bearing. Tribol Ind 40(3):370–391.
- [11] Suryawanshi SR, Pattiwar JT (2019) Experimental study on an influence of bearing geometry and TiO2 nanoparticle additives on the performance characteristics of fluid film lubricated journal bearing. Tribol Ind 41(2):220–236.

[14] Hammza TM, Abdul Kareem AA, Abas EN (2020) Influence of the solid particles nanofluid on the dynamic behaviour of rotor fluid film journal

$$F$$
 نیروی اصطکاک (N)

  $f$ 
 ضریب اصطکاک

  $f$ 
 ضریب اصطکاک (M)

  $h$ 
 ضخامت فیلم روانکار (m)

  $L$ 
 طول یاتاقان (m)

  $M_j$ 
 جرم بحرانی روتور (Kg)

  $M_j$ 
 جرم بحرانی روتور (Kg)

  $O_J$ 
 مرکز روتور

  $O_J$ 
 مرکز روتور

  $O_c$ 
 $O_c$ 
 $O_c$ 
 $O_c$ 
 $O_c$ 
 $O_c$ 
 $O_c$ 
 $(Pa)$ 
 $O_c$ 
 $P$ 

 فشار سیال (Pa)
  $P$ 
 $Sij(i,j = x, y, r_z$ 
 $Sij(i,j = x, y)$ 
 $M$ 
 $j$ 
 $j$ 
 $j$ 
 $W_m$ 
 $M_j$ 
 $j$ 
 $M_j$ 
 $M_j$ 
 $j$ 
 $j$ 
 $j$ 
 $M_j$ 
 $j$ 

نسبت فرکانس چرخش گردابی روتور	$\gamma = (\omega_{\rm P}/\omega)$
زاویه سنجش از محور X	θ
ویسکوزیته روغن پایه روانکار (Pa.s)	$\mu_{bf}$
ویسکوزیته نانو روانکار (Pa.s)	$\mu_{nf}$
ويسكوزيته نسبى نانو سيال	$\mu_{rel}$
زاویه وضعی روتور	φ
سرعت زاویهای روتور حول محور طولی	ω
سرعت زاویهای حرکت اغتشاشی مرکز روتور حول نقطه تعادل استاتیکی (rpm)	$\omega_{p}$

## مراجع

 Etsion I, Burstein L (1996) A model for mechanical seals with regular microsurface structure. Tribol Trans 39(1):677–683. journal bearing working with nano lubricant. Diagnostyka 25(2):2024212.

- [26] Dal A (2024) Investigation of nanoparticle diameter influences on performance of hydrodynamic journal bearings operating with nanolubricant. Proc Inst Mech Eng Part J 238(5):545–558.
- [27] Biswas N, Mandal SK, Bhagwatkar I, Kumar R, Kaur J, Bhowmik A, Bhattacharjee B (2025) Effect of nanoparticle-based lubricants on various performance characteristics of journal bearings: A review. Eng Res Express 7(1):2501.
- [28] Peng F, Jabbarzadeh A (2025) The effect of geometrical shape of surface texture on the rheology and tribology of confined lubricants. Lubricants 13(1):13.
- [29] Muchammad M, Tauviqirrahman M, Rizki Y et al (2025) Elastohydrodynamic analysis of multistep texture effects and partial surface roughness on the tribological performance of steel journal bearings. Discov Appl Sci 7:301.
- [30] Jason YJJ, How HG, Teoh YH, Chuah HG (2020) A study on the tribological performance of nanolubricants. Mater Process 8(11):8111372.
- [31] Binu KG, Shenoy BS, Rao DS, Pai R (2014) Static characteristics of a fluid film bearing with TiO\_2 based nano lubricant using the modified Krieger– Dougherty viscosity model and couple stress model. Tribol Int 75(2):69–79.
- [32] Cupillard S (2009) Thermo hydrodynamics of sliding contacts with textured surfaces. PhD Thesis, Luleå Univ Technol.
- [33] Tala-Ighil N, Fillon M, Maspeyrot P (2011) Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. Tribol Int 44(1):211–219.
- [34] Mehrjardi MZ, Rahmatabadi AD, Meybodi RR (2016) A study on the stability performance of noncircular lobed journal bearings with micropolar lubricant. Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol 230(1):14–30.
- [35] Zare Mehrjardi M (2020) Dynamic stability analysis of noncircular two-lobe journal bearings with couple stress lubricant regime. Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol 235(6):1150–1167.

bearing systems. J Mech Eng Res Dev 43(7):149–162.

- [15] Dhanola A, Garg HC (2020) Thermo hydrodynamic (THD) analysis of journal bearing operating with bio-based nanolubricants. Arab J Sci Eng 45(3):9127–9144.
- [16] Dang RK, Chauhan A, Dhami SS (2021) Static thermal performance evaluation of elliptical journal bearings with nanolubricants. Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol 235(8):1627–1640.
- [17] Awasthi RK, Maan JS (2021) Influence of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing operating under turbulent regime. Tribol Online 16(2):99–112.

[۱۸] زارع مهرجردی م، رشیدی میبدی ر، مظفری م (۱۴۰۰) تأثیر عمق بافتهای سطحی پوسته بر عملکرد حالت پایدار یاتاقانهای ژورنال گازی غیرمدور دو لُب. مکانیک ایردا شاریدا (۱۹۹۵-۲۷۳ عمل)

- [19] Nie T, Yang K, Zhou L, Wu X, Wang Y (2022) CFD analysis of load capacity of journal bearing with surface texture. Energy Rep 8(1):327–334.
- [20] Mishra S, Aggarwal S (2023) A review of performance of textured journal bearings. Tribol Online 18(7):494–507.
- [21] Singh S, Kango S (2023) Effect of sliding speed on thermo hydrodynamic performance of partially slip-textured slider bearings. Lub Sci 35(1):574– 595.
- [22] Wang H, Bie W, Zhang S, Liu T (2023) Theoretical and experimental study of friction characteristics of textured journal bearing. Micromachines 14(3):577.
- [23] Profito FJ, Vladescu SC, Reddyhoff T, Dini D (2024) Numerical and experimental investigation of textured journal bearings for friction reduction. Tribol Int 195:109643.
- [24] Mishra S, Aggarwal S (2023) A critical review of the effect of nano-lubricant on the performance of hydrodynamic journal bearing. Tribol - Finn J Tribol 40(4):4–20.
- [25] Hameed MR, Ali SA, Hadwan HH, Toman AA, Mahdi MA (2024) CFD-FSI analysis of textured