

## Effect of Shell Surface Texture Geometry on the Steady State Performance Indexes of Hydrodynamic Journal Bearings

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Rasoolizadeh Shooroki A.<sup>1</sup> MSc,  
Dashti Rahmatabadi A.<sup>\*1</sup> PhD,  
Zare Mehrjardi M.<sup>2</sup> PhD

#### How to cite this article

Rasoolizadeh Shooroki A, Dashti Rahmatabadi A, Zare Mehrjardi M. Effect of Shell Surface Texture Geometry on the Steady State Performance Indexes of Hydrodynamic Journal Bearings. Modares Mechanical Engineering. 2019;-19(10): 2443-2453.

### ABSTRACT

Improvement of behavioral indicators of oil journal bearings has particular importance due to the increasing development of their application as support of rotary components in industrial machinery. Creation of regular roughness (texture) with various geometries on the inner surface of a bearing shell is one of the newest methods proposed by the lubrication researchers to enhance the performance of the hydrodynamic journal bearings. In this study, the comparison of the performance of circular bearings with variable cubic, cylindrical and ellipsoid textures of different depths arranged in a different zone of the shell has been evaluated. For this purpose, the governing Reynolds equation on hydrodynamic lubrication of oil journal bearing was modified considering the changes of the film thickness affected by the geometry and position of the textures. This equation was solved by finite element numerical method, applying the assumption of the Reynolds boundary condition for determining cavitation zone. After obtaining the lubricant pressure profile, the parameters of steady-state performance of the bearing with different texture types were calculated and compared together. Results indicate that the creation of textures with any geometry reduces the lubricant pressure and changes the parameters of the bearing performance. Also, the placement of textures in the maximum pressure area leads to significant changes in performance components while their positioning in the lubricant cavitation region has a weak effect on the bearing behavior. Further, the results show that the difference in characteristics of bearing performance with shallow textures is more considerable and with the increase of textures depth the effect of geometry form on the performance will be reduced.

**Keywords** Geometry of Texture; Hydrodynamic Journal Bearing; Static Performance; Finite Element Method (FEM)

### CITATION LINKS

[1] Effects of shaft surface texture on journal bearing pressure ... [2] The impact of the cavitation model in the analysis of microtextured lubricated journal ... [3] Effects of surface texture on journal-bearing characteristics under steady-state operating ... [4] Studies on the influence of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing using power law ... [5] Effect of surface texturing on the steady-state properties and dynamic coefficients of a plain journal bearing ... [6] Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal ... [7] Influence of surface texture on lubrication performance of hydrodynamic journal ... [8] Partially textured slider and journal bearing ... [9] A laser surface textured journal bearing. Journal of ... [10] Analysis on micro-elliptical textured journal ... [11] Investigations on the effects of surface texture on the performance of a porous journal bearing operating with couple stress ... [12] Effect of compound dimple on tribological performances of journal ... [13] Effect of surface texturing on hydrodynamic performance of journal bearing, ARPN Journal of Engineering and Applied ... [14] Investigation on the influence of spherical textures on the performance characteristics of porous journal ... [15] Thermo-hydrodynamic analysis of large-eccentricity hydrodynamic bearings with texture on journal ... [16] The effect of shell texturing on the performance of noncircular hydrodynamic two lobe journal ... [17] Thermohydrodynamics of sliding contacts with textured surfaces ... [18] A solution for the finite journal bearing and its application to analysis ... [19] Finite element solution of steady-state incompressible lubrication ... [20] Linear stability analysis of hydrodynamic journal bearings under micropolar ... [21] Performance analysis of micropolar lubricated journal bearings using GDQ ...

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran  
<sup>2</sup>Engineering Faculty, Ardakan University, Ardakan, Iran

#### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran  
Phone: -  
Fax: -  
dashti@yazd.ac.ir

#### Article History

Received: August 12, 2018  
Accepted: February 23, 2019  
ePublished: October 22, 2019

## تأثیر هندسه بافت‌های سطح پوسته بر شاخص‌های عملکرد حالت پایدار یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی

ابوالفضل رسولی زاده شورکی MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اسغر دشتی رحمت‌آبادی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مهدی زارع مهرجردی PhD

دانشکده مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

### چکیده

بهبود شاخص‌های رفتاری یاتاقان‌های ژورنال روغنی با توجه به توسعه فزاینده به‌کارگیری آنها به عنوان تکیه‌گاه اجزای دوار در ماشین‌آلات صنعتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ایجاد ناهم‌واری‌های (بافت) منظم با هندسه متنوع در سطح داخلی پوسته یاتاقان از جدیدترین روش‌های پیشنهادی محققان حوزه روانکاری برای ارتقای کارایی یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی است. در پژوهش حاضر، مقایسه عملکرد یاتاقان‌های ژورنال مدور با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی‌گون با عمق‌های متغیر با چینش در نواحی مختلف پوسته ارزیابی شده‌است. به این منظور معادله رینولدز حاکم بر روان‌کاری هیدرودینامیکی یاتاقان‌های ژورنال روغنی با توجه به تغییرات ضخامت فیلم روان‌کار، متأثر از هندسه، عمق و محل ایجاد بافت‌ها، اصلاح و به کمک روش حل عددی اجزای محدود، با فرض شرط مرزی رینولدز برای تعیین محدوده کاویتاسیون، بررسی شده است. پس از استخراج پروفیل فشار توزیعی در فیلم سیال روان‌کار، پارامترهای عملکرد حالت پایدار یاتاقان‌های مورد ارزیابی با بافت‌های متفاوت، محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج گویای آن است که ایجاد بافت با هر نوع شکل هندسی سبب کاهش مقادیر فشار در فیلم سیال روان‌کار و تغییر در پارامترهای عملکرد یاتاقان می‌شود. قرارگیری بافت‌ها در محدوده متناظر با فشار ماکزیمم، از بروز تغییرات قابل ملاحظه مولفه‌های عملکرد و قرارگرفتن آنها در ناحیه فیلم روان‌کار کاویته‌شده از تأثیر قابل چشم‌پوشی بافت‌ها بر عملکرد مجموعه حکایت دارند. همچنین نتایج نشان دهنده آنست که اختلاف در پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های دارای بافت‌های کم عمق با هندسه‌های مورد ارزیابی، قابل ملاحظه‌تر بوده و با افزایش گودی بافت‌ها، تأثیر شکل هندسی بر عملکرد مجموعه تضعیف خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** هندسه بافت، یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی، عملکرد استاتیکی، روش حل عددی اجزای محدود

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۴

\*نویسنده مسئول: dashti@yazd.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه تکنولوژی به‌کارگیری یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی دارای بافت در سطح داخل پوسته به‌جای سطح صاف و مسطح، روش کارآمدی جهت تغییر پارامترهای عملکرد سیستم تکیه‌گاهی از جمله کاهش ضریب اصطکاک، نرخ سایش و تغییر بار قابل حمل یاتاقان می‌باشد. با توجه با اینکه وجود ناهم‌واری‌های منظم در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف بر سطح داخلی یاتاقان‌های ژورنال می‌تواند تأثیر چشم‌گیری بر بهبود عملکرد این دسته از تجهیزات تکیه‌گاهی داشته باشد، در سال‌های اخیر، توجه محققان زیادی در حوزه روانکاری معطوف به این زمینه پژوهشی شده است.

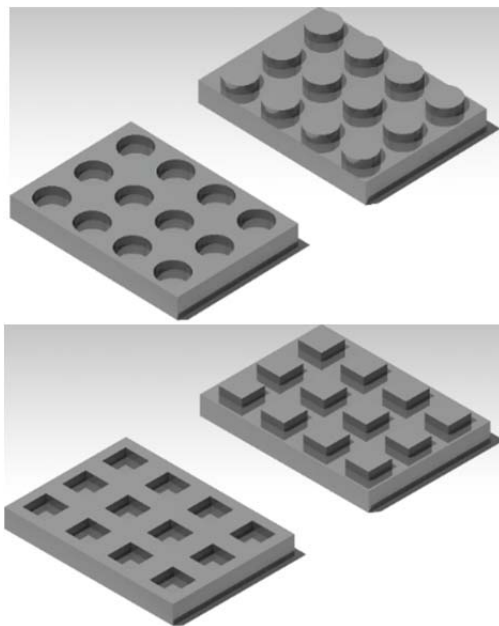
با مرور پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه بررسی اثر ایجاد سطوح بافت‌دار بر عملکرد یاتاقان‌های روغنی، ملاحظه گردید که در سال ۲۰۰۵ اثر ایجاد بافت روی روتور بر توزیع فشار یاتاقان ژورنال توسط سینان‌گلو و همکاران [1] مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، توزیع فشار در یاتاقان ژورنال مدور با ایجاد بافت در

قسمت‌های مختلف سطح روتور و سرعت‌های دورانی متفاوت با به‌کارگیری روش شبکه‌های عصبی استخراج گردیده است. داده‌های آزمایش این تحقیق به‌عنوان اطلاعات یادگیری برای شبکه عصبی جهت ایجاد یک مدل پیش‌بینی قابل اعتماد مورد استفاده قرار می‌گیرد که می‌تواند به یاتاقان ژورنال، اعمال شده و عملکرد مدل را تأیید کند. در ادامه در سال ۲۰۰۷ تأثیر مدل کاویتاسیون (Cavitation) در تحلیل روانکاری یاتاقان‌های ژورنال دارای بافت‌هایی با ساختار میکرو (میکروبافت‌ها) توسط اوساس و همکاران [2] بررسی گردید. در این تحقیق، نویسندگان نتایج را با به‌کارگیری مدل کلاسیک رینولدز (Reynolds) و مدل  $P - \theta$  پیشنهادی توسط الورد و آدمز مورد مقایسه قرار دادند. هر دو مدل، پیش‌بینی‌های کاملاً مشابهی از ظرفیت بار قابل حمل و گشتاور اصطکاکی در شرایط غیرقابل پیش‌بینی را ارائه می‌دهند، درحالی که مدل رینولدز، مدل ترجیحی برای رفتار عددی بهتر می‌باشد [2]. همچنین نشان داده شده است که در شرایط به‌کارگیری یاتاقان ژورنال دارای میکروبافت‌هایی بر سطح داخلی، مدل رینولدز به‌طور قابل ملاحظه‌ای منجر به اشتباهاتی در برآورد چند متغیر مانند گشتاور اصطکاکی می‌شود. بنابراین در هنگام تحلیل این نوع از یاتاقان‌ها (دارای میکروبافت‌ها)، تنها مدل پایداری جرم (مدل پیشنهادی توسط الورد و آدمز) نتایج صحیحی را به دست می‌دهد. در ادامه در همان سال اثر سطوح دارای بافت بر مشخصه‌های یاتاقان‌های ژورنال تحت شرایط عملکردی حالت پایدار توسط تلا- /بقیل و همکاران [3] مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، نویسندگان با به‌کارگیری روش عددی تقاضلات محدود (Finite Difference Method; FDM) به بررسی مشخصه‌های عملکرد استاتیکی یاتاقان ژورنال مدور دارای بافت‌های کروی بر سطح داخلی پوسته پرداخته‌اند. محققان دریافتند که با به‌کارگیری بافت‌هایی با هندسه مناسب در مناطقی خاص از سطح داخلی پوسته می‌توان مشخصه‌های عملکردی یاتاقان همچون کمینه ضخامت فیلم سیال روان‌کار، بیشینه فشار ایجادشده در فیلم روغن، جریان محوری روغن روان‌کار و گشتار اصطکاکی را بهبود بخشید. در سال ۲۰۱۰ تأثیر سطوح دارای بافت بر عملکرد هیدرودینامیکی یاتاقان‌های ژورنال با به‌کارگیری مدل پاورلا (Power Law) توسط کاتگو و شرما [4] مطالعه گردید. در این پژوهش به بررسی اثر ترکیبی سطح دارای بافت اعم از بافت‌های سینوسی، مثبت کامل و زبری‌های نیمه موجی (زبری‌های عرضی و طولی) بر سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال مدور با روانکار غیرنیوتونی پاورلا پرداخته شده است. روش عددی تفاضل محدود بر معادله رینولدز تعمیم‌یافته جهت بررسی همزمان اثرات بافت و روانکار غیرنیوتونی بر پارامترهای عملکرد یاتاقان مورد بررسی به‌کار گرفته شده و نتایج نشان‌دهنده آن است که ظرفیت بار قابل حمل یاتاقان و نیروی اصطکاک در هر دو نوع یاتاقان با سطح داخلی بافت‌دار و بدون بافت با سیال دارای برش غلیظ، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج بیانگر عملکرد بهینه موج کامل مثبت جهت افزایش بار قابل حمل و ضریب اصطکاک یاتاقان نسبت به دو نوع دیگر بافت بوده درحالی که بافت سینوسی طولی نسبت به دیگر بافت‌های مورد بررسی جهت کاهش نیروی اصطکاک مناسب می‌باشد. سپس مطالعه تجربی تأثیر سطح دارای بافت بر مشخصه‌های حالت پایدار و ضرایب دینامیکی یک یاتاقان ژورنال مدور در سال ۲۰۱۱ توسط دادوشه و همکاران [5] مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش تجربی، آزمایشی بر عملکرد دسته‌ای از یاتاقان‌های ژورنال با سطح داخلی بافت‌دار تحت بار و سرعت‌های مختلف صورت گرفته است.

برش لیزر (منگنز) برای ایجاد حفره‌ها روی سطوح داخلی یاتاقان مورد استفاده قرار گرفته و با این تکنولوژی، گودی‌هایی به شکل کروی به قطر  $1\text{mm}$  و عمق  $60\mu\text{m}$  روی سطح داخلی پوسته یاتاقان ایجاد شده است. نسبت مساحت بافت‌های ایجاد شده در محدوده ۵ تا ۲۰ درصد کل سطح داخل یاتاقان می‌باشد. نتایج این تحقیق گویای ظرفیت بار قابل حمل پایین‌تر و تشکیل فیلم روغن نازک‌تر در یاتاقان‌هایی با مقدار بافت بسیار زیاد نسبت به ایجاد بافت متعادل بر سطح می‌باشد. ایجاد شرایط کاری خنک‌تر (در حدود ۶ تا ۸ درجه سانتی‌گراد) و وجود ضریب میرایی بزرگتر در بارهای استاتیکی کوچک از دیگر دستاوردهای این تحقیق می‌باشد. در همان سال اثر سطح بافت‌دار بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی توسط تلا-ایقیل و همکاران<sup>[۶]</sup> بررسی شد. در این پژوهش بیان شده است که به‌کارگیری سطوح دارای بافت با شکل‌های مختلف و استفاده از این بافت‌ها در نواحی خاصی از سطح داخلی یاتاقان ژورنال می‌تواند بر عملکرد بهینه اجزای تکیه‌گاهی نام‌برده تأثیر مثبتی داشته باشد. نویسندگان این مقاله به بررسی اثر به‌کارگیری بافت‌های استوانه‌ای در نواحی خاصی از سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال مدور پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که مهمترین پارمترهای عملکرد اجزاء تکیه‌گاهی نام‌برده (زاویه وضعی روتور در فضای لقی، بار قابل حمل، گشتاور اصطکاکی و غیره) را می‌توان از طریق آرایش مناسب منطقه بافتی روی سطح تماس بهبود داد. در ادامه در سال ۲۰۱۲ تأثیر سطح بافت‌دار بر عملکرد روانکاری یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی توسط ونگ و همکاران<sup>[۷]</sup> مطالعه گردید. نویسندگان در این پژوهش که از روش تفاضل محدود جهت استخراج فشار توزیع شده در فیلم سیال روانکار، بر معادله رینولدز استفاده شده است، اثر ایجاد بافت در نواحی مختلف سطح داخلی پوسته و نسبت‌های خروج از مرکزی و منطری متفاوت بر قابلیت حمل بار و نیرو و ضریب اصطکاک در فیلم روغن را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ایجاد بافت‌های جزئی در مسیر محیطی یاتاقان ژورنال مدور با نسبت‌های طول به قطر کوچک به‌طور قابل توجهی عملکرد یاتاقان را بهبود می‌دهد. همچنین نتایج بیانگر کاهش ضریب اصطکاک در صورت اعمال بافت جزئی به سطح داخلی یاتاقان در مسیر طولی می‌باشد. تجزیه و تحلیل بافت‌های جزئی بر سطوح یاتاقان‌های لغزشی (کشویی) و یاتاقان‌های ژورنال در همان سال توسط ر/تو و همکاران<sup>[۸]</sup> انجام شد. در این تحقیق اثر ایجاد بافت بر سطح یاتاقان‌های کشویی و ژورنال جهت بهبود قابلیت حمل بار و کاهش ضریب اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه بافت‌های به‌کار گرفته شده در این پژوهش به‌صورت شیارهایی متوالی می‌باشد و نتیجه‌گیری شده است که این نوع از بافت، پتانسیل بهبود بار قابل حمل در هر دو نوع یاتاقان مورد بررسی و کاهش ضریب اصطکاک در فیلم سیال روانکار را دارا می‌باشد. بررسی عملکرد یاتاقان ژورنال بافت‌دار شده به روش لیزر توسط بریزمز و کلیگرممان<sup>[۹]</sup> نیز در سال ۲۰۱۲ صورت گرفت. در این پژوهش با استفاده از روش لیزر بر سطح داخلی پوسته یاتاقان‌های ژورنال مدور، بافت‌های کروی منظمی با قطر و عمق مشخص و تراکمی معین در مرحله اول در کل ناحیه و در مرحله بعد در محدوده‌هایی خاص تعبیه و عملکرد آن با هم مقایسه شده است. بهینه‌سازی بار قابل حمل و زاویه وضعی تعادلی روتور به‌صورت استاتیکی در فضای لقی یاتاقان با به‌دست آوردن عمق مناسب گودی‌ها و ناحیه به‌کارگیری آنها، دست‌آورد این پژوهش می‌باشد. تجزیه و تحلیل یاتاقان‌های ژورنال با بافت‌های بیضی در سال ۲۰۱۴ توسط

ردی‌گنجی و کاکوتی<sup>[۱۰]</sup> انجام شد. محققان این پژوهش اثر بافت‌های بیضی بر ظرفیت بار قابل حمل یاتاقان، اصطکاک در فیلم سیال روانکار و نرخ جریان در یاتاقان‌های ژورنال مدور بررسی و عنوان کردند که می‌توان با تغییر در تراکم و عمق بافت‌های بیضی بر سطح داخلی پوسته، عملکرد مجموعه روتور و تکیه‌گاه نام‌برده را بهبود بخشید. نتایج این تحقیق گویای آن است که در یک عمق مشخص برای بافت‌ها، تراکم بیشتر ناهمواری‌های منظم ایجاد شده سبب افزایش بار حمل شده توسط یاتاقان و نرخ جریان روانکار و همچنین کاهش متغیر اصطکاک در یاتاقان می‌شود. بررسی اثر سطح دارای بافت بر عملکرد یاتاقان ژورنال متخلخل تحت روانکاری با سیال دارای تنش کوپل نیز توسط شرما و همکاران<sup>[۱۱]</sup> در سال ۲۰۱۴ صورت گرفت. در این پژوهش، روانکاری هیدرودینامیکی یک یاتاقان ژورنال مدور متخلخل با در نظرگیری بافت در سه ناحیه مختلف از سطح داخلی پوسته و به‌کارگیری تئوری سیال روانکار با زوج تنش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه‌های برگرفته از این پژوهش، عنوان شده است که به‌کارگیری سیال با مدل دارای تنش مزدوج بر عملکرد بهتر یاتاقان تأثیر مثبتی دارد. علاوه بر این، بافت اعمال شده بر سطح داخلی پوسته اثرات قابل توجهی بر عملکرد مجموعه دارد. محققان در پژوهش بافت سینوسی، شکل را در سه ناحیه مختلف از سطح داخلی پوسته به‌کار گرفته و بهترین ناحیه از نظر عملکرد بهینه سیستم را گزارش کرده‌اند. سپس در سال ۲۰۱۵ اثر گودی‌های مرکب بر عملکرد روانکاری یاتاقان‌های ژورنال توسط منگ و همکاران<sup>[۱۲]</sup> بررسی شد. نویسندگان اثر بافت‌های ترکیبی مکعبی و کروی بر عملکرد روانکاری یاتاقان‌های ژورنال مدور را مورد بررسی قرار داده و بدین منظور با به‌کارگیری نرم‌افزار انسیس و استفاده از روش برهم‌کنش بین سازه و سیال به مقایسه عملکرد یاتاقان ژورنال مدور با وجود بافت‌های مکعبی ساده و استفاده از بافت‌های ترکیبی مکعبی و کروی پرداختند. نتایج عددی این تحقیق نشان می‌دهد که بافت‌های ترکیبی نسبت به نوع ساده می‌تواند ظرفیت حمل بار بیشتر و ضریب اصطکاک کمتری را به‌دلیل کنش هیدرودینامیکی دو برابر، عرضه کند. علاوه بر این، بهبودی عملکرد بیان شده به اندازه هندسی بافت‌های ترکیبی، فاصله بافت‌ها و شرایط کاری یاتاقان بستگی دارد. در پژوهش‌های اخیر صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان به بررسی اثر بافت‌های موجود بر قسمتی از سطح داخلی یاتاقان‌های ژورنال مدور توسط همد/وی و همکاران<sup>[۱۳]</sup> و تحقیقی با عنوان بررسی اثر بافت‌های کروی منفی بر مشخصه‌های عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی مدور متخلخل توسط شرما<sup>[۱۴]</sup> در سال ۲۰۱۶ اشاره کرد. در هر دو پژوهش اثر قابل توجه بافت‌های موجود در سطح داخلی پوسته بر توزیع فشار و در پی آن افزایش بار قابل حمل یاتاقان گزارش شده است. در سال ۲۰۱۷ اثر وجود بافت‌های جزئی در سطح ژورنال بر عملکرد حرارتی یاتاقان‌های ژورنال با خروج از مرکزیت بزرگ تحت بارهای سنگین و سرعت‌های بالای روتور توسط ونگ و همکاران<sup>[۱۵]</sup> انجام شد. نتایج این تحقیق حاکی از افزایش بار قابل حمل توسط یاتاقان و کاهش فشار و دمای بیشینه در روغن روانکار در صورت به‌کارگیری بافت بر سطح ژورنال نسبت به محور بدون بافت می‌باشد. در سال ۲۰۱۸ نیز تأثیر بافت‌دار شدن جداره بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی غیرمدور دولب توسط علی‌حیدری و همکاران<sup>[۱۶]</sup> مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق که در آن اثر به‌کارگیری بافت‌های استوانه‌ای در نواحی مختلف سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال غیرمدور دولب بررسی شده است، گویای متفاوت بودن

Galvanoformung, Abformung) فوتولیتوگرافی، لیتوگرافی و قلم‌زنی ناهمسان‌گرد، قلم‌زنی یونی واکنش پذیر (RIE) یا قلم‌زنی شیمیایی، ماشین‌کاری جت ساینده و روش‌های مکانیکی‌ای همچون نورد ارتعاشی و فرزکاری اشاره کرد. در نتیجه یکی از روش‌های افزایش راندمان پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی ایجاد ناهمواری با اشکال هندسی گوناگون و منظم در سطح داخلی پوسته یاتاقان (بافت) به جای به کارگیری یاتاقان‌های با سطوح داخلی صاف و هموار می‌باشد<sup>[17]</sup>. ناهمواری‌های موجود در سطح داخلی پوسته که اغلب با روش‌های نام‌برده در بالا ایجاد می‌شوند به دو دسته کلی بافت‌های مثبت و منفی تقسیم می‌شوند. بافت‌های مثبت، ناهمواری‌هایی هستند که با هندسه و اندازه دلخواه به صورت برآمده در سطح داخلی پوسته یاتاقان ایجاد می‌شوند و بافت‌های منفی بالعکس نوع مثبت، به صورت تو رفته در سطح داخلی پوسته ایفای نقش می‌کنند. شکل ۱ نمونه‌ای از بافت‌های مثبت و منفی با اشکال هندسی متفاوت را نشان می‌دهد. بافت‌های مثبت و منفی در محدوده‌های مختلفی بر سطح داخلی یاتاقان می‌توانند سبب کاهش یا افزایش ضخامت فیلم سیال روانکار در نقاط به کارگیری آنها شوند. در نتیجه تغییر در پارامترهای عملکرد یاتاقان به موقعیت به کارگیری، تعداد و هندسه بافت‌ها بستگی دارد.



شکل ۱) بافت‌های مثبت و منفی ایجادشده روی یک سطح صاف

### ۳- معادلات حاکم

#### ۳-۱- معادله رینولدز

با توجه به عرض کم فضای لقی در یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی و امکان صرف نظر از تغییرات فشار توزیعی در عرض فیلم سیال روانکار در شرایط بارگذاری مجموعه و حرکت روتور در فضای یاتاقان، به طور متداول توزیع فشار یاتاقان در جهات طولی و محیطی جهت استخراج پارامترهای عملکرد یاتاقان مورد استفاده قرار می‌گیرد<sup>[18, 19]</sup>. در ادامه فرم کلی معادله رینولدز حاکم با اعمال فرضیات متداول بر معادلات اصلی ناویر-استوکس ارائه گردیده است.

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left( \bar{h}^3 \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{z}} \right) = 6\bar{R}\bar{\omega} \frac{\partial \bar{h}}{\partial \bar{x}} \quad (1)$$

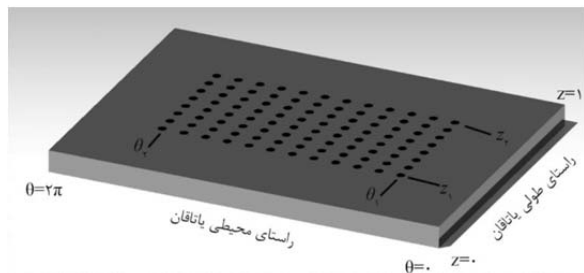
عملکرد یاتاقان در صورت به کارگیری بافت‌های استوانه‌ای در نواحی مختلف سطح و امکان دستیابی به عملکرد بهینه مجموعه با به کارگیری بافت‌ها در منطقه مناسب می‌باشد. همچنین عنوان شده است که در صورت افزایش میزان غیرمردوری یاتاقان ژورنال دولب، اثر بافت بر عملکرد مجموعه چشم‌گیرتر خواهد بود.

با مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی بافت‌دار ملاحظه گردیده است که تاکنون تنها اثر انواع مختلف بافت‌ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته و هیچ‌گونه مقایسه‌ای در راستای تأثیر ایجاد بافت با هندسه‌های گوناگون بر عملکرد سیستم تکیه‌گاهی گزارش نشده است. همچنین در این گزارش‌ها تنها تعداد محدودی از پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از این رو در کار حاضر اثر ایجاد بافت‌هایی با اشکال هندسی مکعبی، استوانه‌ای و بیضی با عمق‌های مختلف و به کارگیری آنها در نواحی متفاوت سطح داخلی پوسته بر پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال مدور همچون توزیع فشار در فیلم سیال روانکار، میزان بار قابل حمل، عدد سامرفیلد، زاویه وضعی روتور در فضای لقی، نیرو و ضریب اصطکاک و همچنین میزان نشتی جانبی روانکار مورد بررسی قرار گرفته و با هم مقایسه می‌گردند.

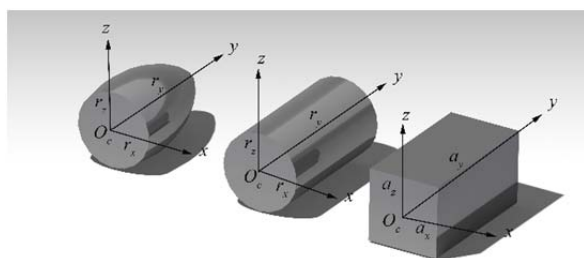
### ۲- تئوری ایجاد بافت

سطوح دارای حرکت نسبی همیشه دارای زبری‌ها و ناهمواری‌هایی می‌باشد. درحالی که در تعدادی از کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی به سطوح صاف و صیقلی نیاز است، در بسیاری از موارد جهت افزایش راندمان کار به سطوح زبر و خشن نیاز می‌باشد. سطوح زبر در روانکاری مختلط و مرزی به دلیل تأثیر بر اصطکاک تا حد بسیار زیادی اهمیت دارد. در روانکاری هیدرودینامیکی، به دلیل اینکه سطوح به طور کامل توسط فیلم روغن از هم جدا می‌شوند، معمولاً توپوگرافی سطح در مقیاس نانو ایجاد می‌شود. ایجاد بافت یک راه برای کنترل توپوگرافی سطح با دقت بالاست. تفاوت بافت با زبری در این است که بافت‌ها اشکال منظمی هستند که به صورت یکپارچه روی سطوح قرار می‌گیرند. درحالی که زبری تعریف منظمی نداشته و به صورت تصادفی روی سطح ایجاد می‌شود. بافت‌های سطحی دارای مشخصه‌هایی همچون اندازه، شکل و نحوه قرارگیری روی سطح می‌باشند. انواع شکل‌های متداول جهت ایجاد بافت بر سطوح لغزنده معمولاً به صورت مستطیلی، دایره‌ای، مثلثی و غیره می‌باشند. در پژوهش‌های مختلف روانکاری، عمق بافت‌های به کار رفته روی سطوح روانکاری شده معمولاً از ۰/۱ تا ۲۰ برابر ضخامت روغن روانکار در نظر گرفته می‌شود. بافت‌ها می‌توانند به عنوان یک میکرومخزن روان‌کننده روی سطوح به هنگام شروع حرکت نسبی، عملکرد مفیدی داشته باشند. همچنین می‌توانند ذرات ساییده شده از سطوح روانکاری‌شونده و نیز ذرات ریز گرد و غبار اضافه شده به سطوح روانکاری از محیط بیرون را در خود جای دهند. بنابراین وجود بافت‌ها از آسیب‌رسیدن به سطوح روانکاری‌شونده به سبب آبریز بردن تأثیر ذرات اضافی در فضای لقی بین روتور و پوسته جلوگیری کرده و سبب بهبود عملکرد هیدرودینامیکی این سطوح می‌باشند. بافت‌ها روی سطوح در روانکاری‌های هیدرودینامیکی و مختلط در وسایل مکانیکی مختلفی همچون یاتاقان‌ها، آب‌بندها و رینگ-پیستون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از تکنیک‌های معمول به کار گرفته شده جهت ایجاد بافت روی سطوح صاف و صیقلی می‌توان به روش‌های LST (Lithographie, LIGA), (Laser Surface Texturing)

کدام از حفره‌های استوانه‌ای و بیضی در راستاهای محورهای مختصات  $x, y, z$  و همچنین  $2a_x, 2a_y$  و  $2a_z$  به ترتیب طول، عرض و ارتفاع مکعب‌ها می‌باشند.



شکل ۳ توزیع بافت‌ها در مکان‌های دلخواه روی سطح داخلی پوسته یاتاقان



شکل ۴ مختصات تعریف‌شده در هر مکعب، استوانه و بیضی‌گون موجود در مجموعه

در هندسه استوانه‌ای و بیضی‌گون نشان داده در شکل ۴  $r_x = r_y = r$  و معادله‌های تعریف‌شده برای مکعب، استوانه و بیضی‌گون به شکل زیر می‌باشند:

$$x - x_c = \mp a_x \quad z - z_c = \mp a_z \quad (الف - ۷)$$

$$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2 \quad (ب - ۷)$$

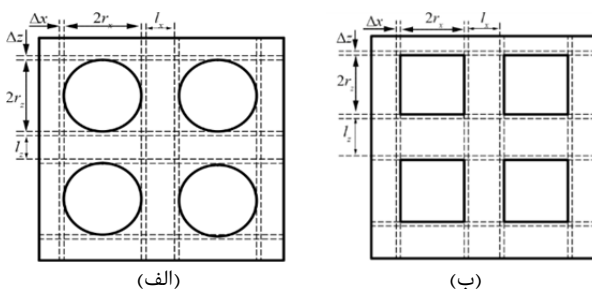
$$\left(\frac{x - x_c}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{y - y_c}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{z - z_c}{r_z}\right)^2 = 1 \quad (ج - ۷)$$

که در آن  $O_c$  مرکز هر مکعب، استوانه و بیضی‌گون به مختصات محلی  $(x_c, y_c, z_c)$  در مجموعه بوده که در سطح بدون بافت یاتاقان یعنی در  $y_c = 0$  واقع شده است. و عمق هر مکعب، استوانه و بیضی‌گون که در شکل ۴ نشان داده شده، برابر است با:

$$\Delta h = r_y \quad (۸) \quad \text{برای بافت‌های استوانه‌ای و بیضی}$$

$$\Delta h = a_y \quad (۹) \quad \text{برای بافت‌های مکعبی}$$

در تصویر دوبعدی ارائه‌شده در شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نحوه مش‌بندی دامنه مسأله در اطراف هر یک از بافت‌های مکعبی (۵-الف) و استوانه‌ای و بیضی (۵-ب) در راستای طولی و محیطی یاتاقان ارائه شده است.



شکل ۵ مش‌بندی و نقشه تصویر از بالای (الف) بافت‌های مکعبی و (ب) بافت‌های استوانه‌ای و بیضی

در معادله (۱)،  $\bar{P}$  فشار توزیع‌شده در فیلم سیال روانکار و  $\bar{h}$  به ضخامت فیلم روانکار تراکم‌ناپذیر بین روتور و پوسته یاتاقان اشاره دارد. همچنین  $\bar{R}$  شعاع روتور،  $\bar{\omega}$  سرعت دوران محور و  $\bar{x}$  و  $\bar{z}$  به ترتیب راستای دوران و طولی یاتاقان را نشان می‌دهند. با معرفی پارامترهای بی‌بعد به صورت:

$$\theta = \frac{\bar{x}}{\bar{R}}, z = 2\frac{\bar{z}}{\bar{L}}, h = \frac{\bar{h}}{\bar{C}_m}, P = \frac{\bar{P}\bar{C}_m^2}{\bar{\mu}\bar{\omega}\bar{R}^2} \quad (۲)$$

فرم بی‌بعد معادله رینولدز (۱) به صورت ذیل قابل بازنویسی است [12]:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \left( \frac{\bar{D}}{\bar{L}} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (۳)$$

### ۳-۲- ضخامت فیلم سیال روانکار

ضخامت فیلم سیال روانکار در هر نقطه از محیط پیرامون یاتاقان ژورنال مدور بافت‌دار را با رابطه زیر می‌توان بیان کرد [3]:

$$h = h_{smooth} + \Delta h(\theta, z) \quad (۴)$$

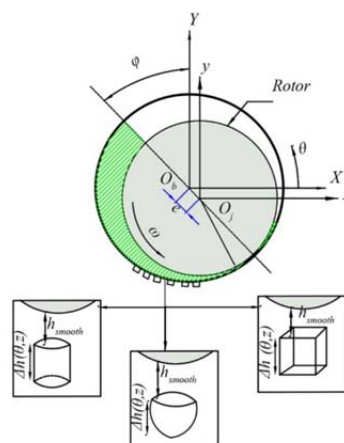
در رابطه (۴)،  $h_{smooth}$  نشان‌دهنده ضخامت فیلم سیال قرار گرفته بین روتور و پوسته در حالت بدون بافت در هر نقطه از محیط پیرامون یاتاقان مدور بوده که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود. و همچنین  $\Delta h(\theta, z)$  بیانگر ارتفاع بافت‌های مختلف اعم از مکعبی، استوانه‌ای و بیضی موجود روی سطح داخلی هر لب یاتاقان می‌باشد [20].

$$h_{smooth} = 1 - X_f \cos \theta - Y_f \sin \theta \quad (۵)$$

در رابطه (۵)،  $(X_f, Y_f)$  و  $\theta$  به ترتیب به مختصات مرکز روتور در موقعیت تعادل استاتیکی و زاویه شروع از محور  $X$  اشاره دارد. در صورت سنجش زاویه  $\theta$  از راستای خط‌المركزین یاتاقان، رابطه فوق به فرم متداول خود مطابق رابطه (۵) مبدل می‌شود.

$$h_{smooth} = 1 + \varepsilon \cos \theta' \quad \text{که } \theta = \theta' + \varphi + \pi/2 \quad (۶)$$

شکل ۲ یاتاقان ژورنال مدور هیدرودینامیکی به همراه ارتفاع سیال روانکار در حالت بدون در نظرگیری بافت‌ها ( $h_{smooth}$ ) و همچنین ارتفاع انواع بافت‌های مورد بررسی ( $\Delta h(\theta, z)$ ) را نشان می‌دهد.



شکل ۲ یاتاقان ژورنال مدور و مقطعی از بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی

### ۳-۳- شکل هندسی بافت‌های به‌کاررفته

در پژوهش حاضر، شکل هندسی بافت‌های به‌کاررفته به صورت مکعب‌ها، استوانه‌ها و بیضی‌گون‌های حفره مانند، در محدوده‌های مختلف سطوح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال مدور (شکل ۳) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. با توجه به شکل ۴،  $r_x, r_y$  و  $r_z$  به ترتیب شعاع بافت در جهت محیطی، عمق و شعاع در جهت طولی هر

$$= \frac{2\bar{C}_m}{\bar{\mu}\bar{\omega}\bar{R}^2\bar{L}}\bar{F} = \int_0^1 \int_{\theta_1}^{\theta_2} A d\theta dz + \int_0^1 \int_{\theta_2}^{\theta_e} A \frac{h_0}{h_{cav}} d\theta dz \quad (15)$$

که در آن:

$$A = \frac{h_0}{2} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{1}{h_0} \left( \frac{\bar{R}}{\bar{C}_m} \right) f = \frac{F}{W} \quad (16)$$

$$Q = \frac{12\bar{L}}{\bar{C}_m\bar{\omega}\bar{R}^3} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\partial P}{\partial z} d\theta \quad (17)$$

#### ۶- بحث و بررسی پیرامون نتایج

پارامترهای مشخصه طراحی یاتاقان ژورنال مدور و ویژگی‌های سیال روانکار مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. به‌منظور بررسی صحت عملکرد برنامه رایانه‌ای تدوین‌شده جهت تحلیل عملکرد هیدرودینامیکی یاتاقان‌های ژورنال مدور با بافت‌های متنوع، در ابتدا نتایج خروجی برنامه برای ضخامت کمینه سیال روانکار و زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان‌های ژورنال مدور با نتایج مشابه موجود در مرجع [6] در جدول ۲ مقایسه شده است.

**جدول ۱)** مشخصات طراحی یاتاقان و ویژگی‌های سیال روانکار تکیه‌گاه یاتاقانی مدور هیدرودینامیکی مورد استفاده در مطالعه حاضر

| پارامتر       | تعریف                            | مقدار     |
|---------------|----------------------------------|-----------|
| $N_{xD}$      | تعداد بافت‌ها در جهت محیطی       | ۵         |
| $N_{zD}$      | تعداد بافت‌ها در جهت طولی        | ۱۱        |
| $R_x$         | شعاع بی‌بعد بافت‌ها در جهت محیطی | ۰/۰۴۷۶۱۹  |
| $R_z$         | شعاع بی‌بعد بافت‌ها در جهت طولی  | ۰/۰۲۳۸۰۹۵ |
| $\bar{r}_x$   | شعاع بایعد بافت‌ها در جهت طولی   | ۲ mm      |
| $\bar{r}_z$   | شعاع بایعد بافت‌ها در جهت محیطی  | ۲ mm      |
| $\bar{C}$     | لقی                              | ۳۰ μm     |
| $\bar{L}$     | طول یاتاقان                      | ۰/۰۶۳ m   |
| $\bar{R}$     | شعاع یاتاقان                     | ۰/۰۳۱۵ m  |
| $\varepsilon$ | نسبت خروج از مرکزی               | ۰/۷       |

**جدول ۲)** مختصات محدوده ایجاد بافت‌ها به انضمام مشخصه‌های عملکرد یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی مدور

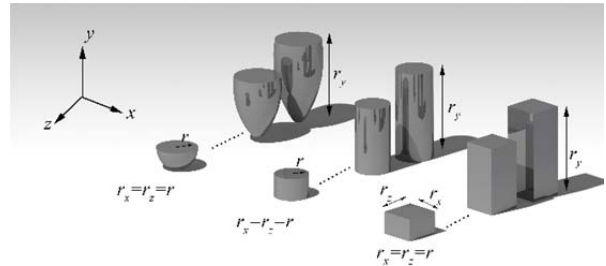
| $\theta^\circ_1$ | $\theta^\circ_2$ | $z_1$ | $z_2$ | $h_{min}^a$<br>(μm) | $h_{min}^b$<br>(μm) | $\varphi^{oa}$ | $\varphi^{ob}$ |
|------------------|------------------|-------|-------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|
| ۰                | ۹۰               | ۰     | ۰/۵   | ۱۱/۷۵               | ۱۱/۶۳               | ۴۸/۵           | ۴۷/۷           |
| ۰                | ۴۵               | ۰     | ۰/۲۵  | ۱۱/۹۶               | ۱۱/۷۶               | ۵۰/۴           | ۵۱/۳           |
| ۱۷۵              | ۲۲۰              | ۰/۱۲  | ۰/۵   | ۱۲/۱۸               | ۱۲/۲۵               | ۴۹             | ۴۹/۳           |
| ۱۸۰              | ۲۲۵              | ۰/۲   | ۰/۵   | ۱۲/۱۱               | ۱۲/۲۱               | ۴۹/۶           | ۴۹/۵           |
| ۱۸۵              | ۲۳۰              | ۰/۱۲  | ۰/۵   | ۱۲/۱۹               | ۱۲/۱۵               | ۴۹             | ۴۸/۷           |

<sup>a</sup>مرجع [6] و <sup>b</sup>مطالعه حاضر

مقایسه نتایج ارائه‌شده در جدول ۲، تطابق مناسب بین نتایج بررسی حاضر و نتایج گزارش‌شده قبلی را نشان داده و صحت عملکرد برنامه رایانه‌ای تدوینی را تأیید می‌نماید.

در نمودار ۱ تأثیر ایجاد بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی به عمق بی‌بعد ۰/۵ و در زاویه محیطی  $\theta'_1 = 125^\circ$  تا  $\theta'_2 = 180^\circ$  (θ) زاویه سنجش از محور X و  $\theta'$  زاویه سنجش از خط‌المرکزین روتور و یاتاقان) بر ضخامت فیلم سیال روانکار و توزیع فشار در یاتاقان

در پژوهش حاضر تأثیر وجود بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی‌شکل در ناحیه‌های مختلف و با ارتفاعات گوناگون بر سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال مدور بر پارامترهای عملکرد استاتیکی مجموعه، همچون میزان بار قابل حمل، عدد سامرفیلد، زاویه وضعی روتور، نیروی اصطکاک، ضریب اصطکاک و نشتی جانبی روانکار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۶ ارتفاعات مختلف هر یک از بافت‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.



**شکل ۶)** بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی در عمق‌های مختلف

با توجه به فرض یاتاقان با طول محدود در تحلیل معادلات حاکم بر مسأله، روش حل عددی اجزاء محدود بر پایه مدل گالرکین [16] جهت استخراج مقادیر فشار در فیلم سیال روانکار به‌کار گرفته شده است. همچنین شرط مرزی رینولدز مطابق رابطه ۱۰ به‌منظور تعیین نقطه پیدایش پدیده کاویتاسیون در یاتاقان ژورنال مدور با روش تکرار استفاده گردیده است.

$$P = 0 \quad \text{in} \quad x = 0 \quad (10\text{-الف})$$

$$P = 0 \quad \text{in} \quad z = 0, \quad z = 1 \quad (10\text{-ب})$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = P = 0 \quad \text{in} \quad \theta = \theta_{cav} \quad (10\text{-ج})$$

#### ۵- پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان

با تعیین توزیع فشار حالت پایدار در فیلم روانکار، پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان نظیر قابلیت حمل بار و عدد سامرفیلد به‌صورت ذیل قابل تعریف خواهند بود [21].

$$\left[ \frac{W_x}{W_y} \right] = \int_0^{+1} \int_0^{2\pi} P \left[ \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \right] d\theta dz \quad (11)$$

کمیت‌های  $W_x$  و  $W_y$  رابطه فوق به ترتیب به مولفه‌های بار قابل حمل توسط یاتاقان در راستای محورهای مختصات X و Y اشاره دارند. برآیند کلی بار قابل حمل توسط یاتاقان عبارت است از:

$$W = \frac{\bar{C}_m^2}{\bar{\mu}\bar{\omega}\bar{R}^3\bar{L}}\bar{W} = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (12)$$

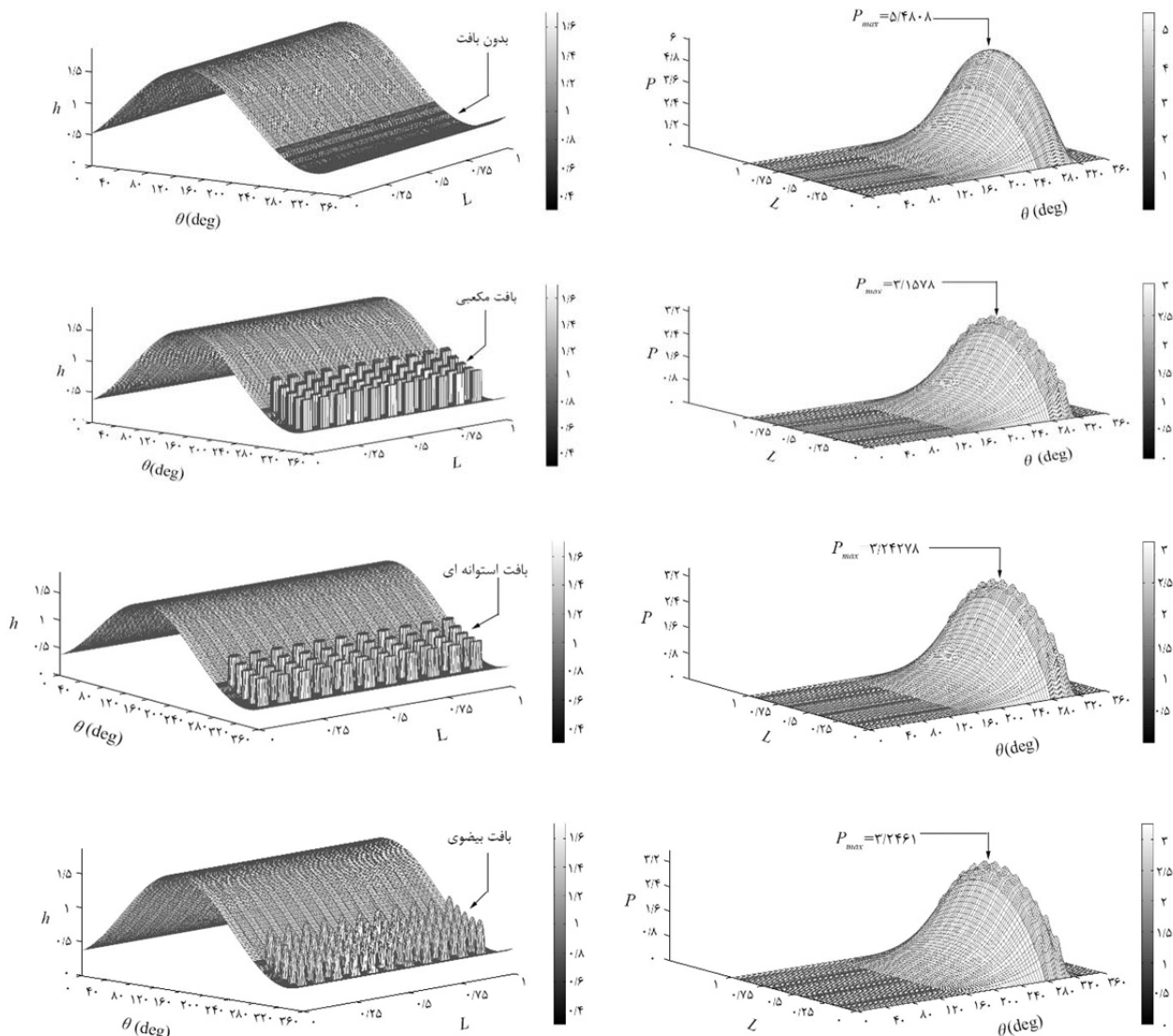
همچنین مقدار عدد سامرفیلد، زاویه وضعی ژورنال در فضای لقی یاتاقان با توجه به موقعیت تعادل استاتیکی مرکز روتور، نیروی اصطکاک ایجادشده در یاتاقان ناشی از تنش برشی فیلم روانکار با توجه به نواحی فیلم فشاری همگرا و واگرا، متغیر ضریب اصطکاک و دبی جریان نشتی سیال روانکار از یاتاقان تحت تأثیر توزیع فشار ایجادشده به علت بارگذاری به ترتیب از روابط ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ قابل محاسبه خواهد بود [16].

$$S = 1/\pi W \quad (13)$$

$$\varphi = \text{Arc tan}(X_f/Y_f) \quad (14)$$

روتور در وضعیت تعادل در فضای لقی یاتاقان و با در نظر گرفتن پروفیل‌های فشار ترسیم شده در نمودار ۱ ملاحظه می‌گردد که وجود بافت در منطقه پرفشار فیلم سیال روانکار بر پروفیل فشار تأثیرگذار است.

ژورنال مدور به صورت سه‌بعدی نشان داده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، ایجاد هرگونه بافت اعم از مکعبی، استوانه‌ای و یا بیضی سبب کاهش فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار نسبت به سطح صاف و هموار می‌شود. با توجه به محل قرارگیری

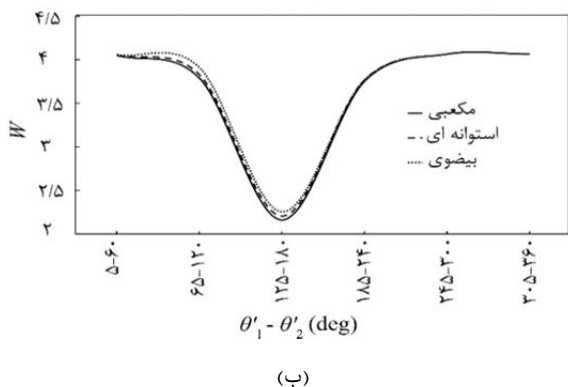
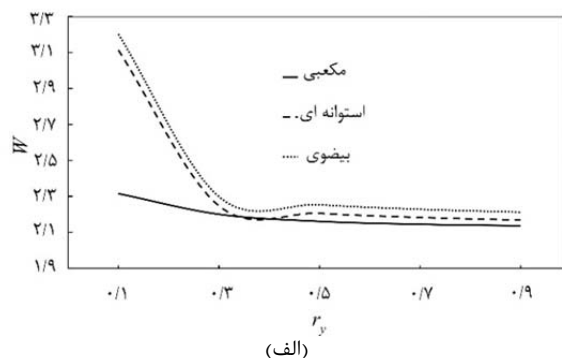


نمودار ۱) اثر هندسه بافت (سطح صاف، بافت مکعبی، استوانه‌ای و بیضی) بر ضخامت فیلم سیال روانکار و فشار توزیع شده در یاتاقان ژورنال مدور

تکیه‌گاهی خواهد بود. همچنین در نمودار ۳ اثر وجود بافت‌ها با اشکال هندسی متنوع و ارتفاع‌های بی‌بعد متفاوت واقع شده در زوایای محیطی  $125^\circ$  تا  $180^\circ$  بر بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار نشان داده شده است. نتایج نمودار ۳ بیانگر آن است که وجود بافت با هر نوع شکل هندسی از بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار می‌کاهد و بیشترین بیشینه فشار در یاتاقان ژورنال مدور مربوط به زمانی است که از یاتاقان با سطح داخلی هموار به عنوان تکیه‌گاه استفاده شود. علاوه بر این می‌توان دریافت که بیشترین اختلاف بین بیشینه فشار ایجاد شده در یاتاقان به هنگام به کارگیری بافت‌های مختلف، مربوط به استفاده از بافت‌های با ارتفاع بی‌بعد کم می‌باشد و هرچقدر بر عمق بی‌بعد بافت افزوده شود از بیشینه فشار در یاتاقان کاسته شده و اثر شکل هندسی در ایجاد بیشینه فشار در فیلم سیال روانکار کاهش می‌یابد.

در ادامه در نمودار ۲ اثر وجود بافت‌های مختلف بر توزیع فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار در خط مرکزی راستای طولی یاتاقان نشان داده شده است. در نمودار ۲ بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی دارای عمق بی‌بعد  $0.1$  بوده و در زوایای محیطی بین  $125^\circ$  تا  $180^\circ$  واقع شده‌اند. همان‌گونه که نتایج نمودار ۲ نشان می‌دهند بیشترین توزیع فشار در فیلم سیال روانکار مربوط به حالتی است که سطح داخلی پوسته یاتاقان صاف و هموار و بدون بافت باشد. در حالت‌های بافت‌دار نیز کمترین توزیع فشار مربوط به بافت مکعبی بوده و توزیع فشار برای بافت استوانه‌ای، مقداری بین بافت‌های مکعبی و بیضی دارد که این واقعیت را می‌توان به اشکال هندسی مکعب، استوانه و بیضی‌گون نسبت داد. نمودار ۲ گویای آن است که وجود بافت با هر نوع شکل هندسی سبب شکسته شدن و توزیع مناسب‌تر فشار در یاتاقان می‌شود و این امر باعث کاهش اثر تمرکز فشار در ناحیه‌ای خاص از سیستم

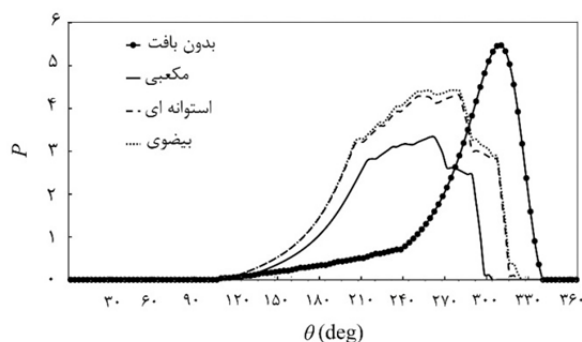
توزیع شده در فیلم سیال روانکار مؤثرند. نتایج نمودار ۴- ب نیز نشان می‌دهد که با قرارگیری بافت‌ها در منطقه پرفشار، میزان بار قابل حمل یاتاقان به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و قرارگیری بافت‌ها با اشکال هندسی گوناگون در مناطق ایجاد پدیده کاویتاسیون تأثیر چندانی بر قابلیت حمل بار یاتاقان ندارد. علاوه بر این نتایج نمودار ۴- ب گویای تأثیرگذاری بیشتر بافت‌های مکعبی نسبت به استوانه‌ای و استوانه‌ای نسبت به بیضی بر قابلیت حمل بار یاتاقان در منطقه پرفشار می‌باشد.



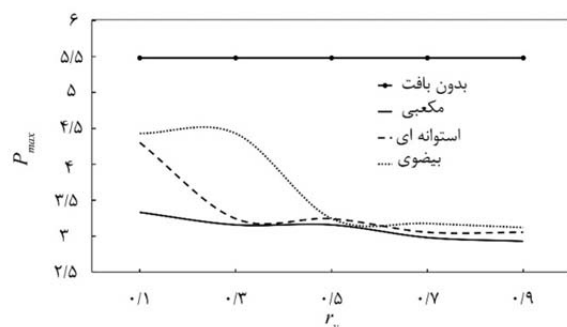
**نمودار ۴) تغییرات بار قابل حمل برحسب الف) عمق بی‌بعد بافت‌ها و ب) محل قرارگیری بافت در سطح داخلی یاتاقان ژورنال مدور با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی**

نتایج نمودارهای ۵- الف و ۵- ب اثر وجود بافت‌های مختلف بر سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال مدور با ارتفاع‌های متفاوت و در مکان‌های محیطی گوناگون بر عدد سامرفیلد را نشان می‌دهد. همان‌گونه که نمودار ۵- الف نشان می‌دهد، روند تغییرات عدد سامرفیلد با تغییر در نوع و ارتفاع بافت (با توجه به تعریف عدد سامرفیلد) بالعکس تأثیر این پارامترها بر روند تغییرات میزان بار قابل حمل یاتاقان می‌باشد. همچنین نتایج نمودار ۵- ب بر افزایش عدد سامرفیلد با قرارگیری بافت‌های مختلف در ناحیه پرفشار یاتاقان و کاهش این اثرگذاری با دور شدن از این منطقه می‌باشد. علاوه بر این نتایج نمودار ۵- ب نشان می‌دهند که میزان اثرگذاری بافت مکعبی بر عدد سامرفیلد بیش از دو نوع بافت دیگر مورد بررسی می‌باشد.

تغییرات زاویه وضعی روتور در فضای لقی بین روتور و پوسته ناشی از تغییر در نوع شکل بافت و میزان ارتفاع بی‌بعد در نمودار ۶- الف و تغییر در نوع شکل بافت و زاویه قرارگیری بافت روی سطح داخلی پوسته در نمودار ۶- ب نشان داده شده است. نتایج نمودار ۶- الف نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع بی‌بعد بافت‌ها در بازه ۱) و ۰) زاویه وضعی روتور افزایش می‌یابد. همچنین نتایج گویای مشابه بودن تقریبی تغییرات زاویه وضعی روتور با تغییر ارتفاع برای



**نمودار ۲) مقایسه فشار فیلم روغن روانکار در صفحه مرکزی راستای طولی در یاتاقان بدون بافت و یاتاقان با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی**



**نمودار ۳) تغییرات بیشینه فشار ایجادشده در فیلم روانکار برحسب عمق بی‌بعد بافت‌ها در یاتاقان ژورنال مدور بدون بافت و دارای بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی**

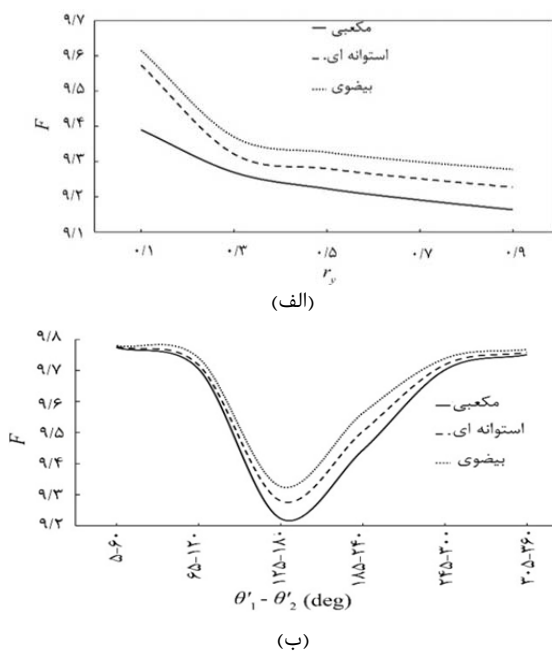
در ادامه تأثیر وجود بافت‌ها با اشکال هندسی مکعبی، استوانه‌ای و بیضی با ارتفاع‌های گوناگون قرارگرفته در زوایای محیطی بین ۱۲۵° تا ۱۸۰° و همچنین اثر محل قرارگیری بافت‌ها با اشکال هندسی متفاوت و ارتفاع بی‌بعد ۰/۵ بر میزان بار قابل حمل در یاتاقان، عدد سامرفیلد، زاویه وضعی روتور، نیروی اصطکاک، ضریب اصطکاک و نشتی جانبی مورد بررسی قرار گرفته است.

در نمودار ۴- الف تأثیر عمق بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی و در نمودار ۴- ب محل به‌کارگیری این بافت‌ها در مسیر محیطی سطح داخلی پوسته یاتاقان مدور بر میزان بار قابل حمل نشان داده شده است. نتایج نمودار ۴- الف نشان می‌دهد که میزان بار قابل حمل در یاتاقان دارای بافت استوانه‌ای شکل مقداری بین بافت‌های مکعبی و بیضی دارد و دلیل آن را می‌توان به شکل هندسی استوانه نسبت داد زیرا این شکل هندسی دارای حالتی بین مکعب و بیضی‌گون می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عمق بی‌بعد بافت‌ها بر سطح، میزان بار قابل حمل یاتاقان برای هر سه بافت به هم نزدیک می‌شود. بیشینه اختلاف بین بار حمل‌شده توسط یاتاقان برای سه نوع بافت مختلف مربوط به حالتی است که بافت با ارتفاع کم ایجاد شده است؛ زیرا در این حالت اختلاف هندسی بین مکعب، استوانه و بیضی‌گون بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد و هر چقدر این میزان ارتفاع بی‌بعد افزایش یابد تأثیر شکل بافت بر پارامتر مورد بررسی کاهش می‌یابد. نتایج نمودار ۴- ب نشان می‌دهد که ایجاد بافت در زوایای محیطی مختلف تأثیر متفاوتی بر میزان بار قابل حمل توسط یاتاقان دارد. هنگامی که زاویه سنجش از خط‌المركزین روتور و یاتاقان در نظر گرفته شود، منطقه پرفشار یاتاقان در زوایای تقریبی ۱۲۵° تا ۱۸۰° واقع می‌شود. همان‌گونه که قبلاً نیز مشاهده گردید، هنگامی که بافت‌های مختلف در منطقه پرفشار یاتاقان قرار گیرند بر فشار

روانکار با توجه به نواحی فیلم فشاری همگرا و واگرا را نشان می‌دهند. نمودار ۷- الف گویای آن است که با افزایش عمق بی‌بعد هر نوع بافت ایجاد شده بر پوسته یاتاقان، نیروی اصطکاک در فیلم سیال روانکار کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن است که ایجاد بافت بیضی روی پوسته سبب ایجاد نیروی اصطکاک بیشتری نسبت به بافت استوانه‌ای و مکعبی می‌شود. بافت استوانه‌ای نیروی اصطکاک بین دو بافت دیگر در فیلم سیال روانکار ایجاد می‌کند. نتایج نمودار ۷- ب نیز نشان دهنده ایجاد اختلاف اصطکاک بیشتر بین بافت‌های متنوع در منطقه پرفشار یاتاقان ژورنال مدور می‌باشد.

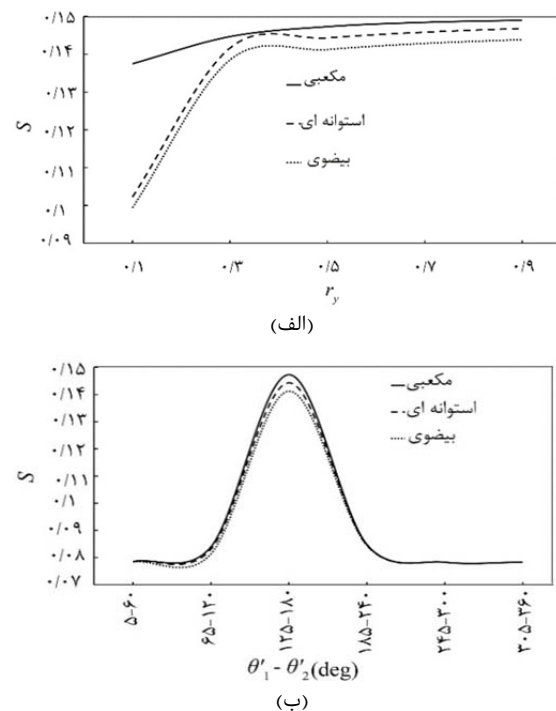
در ادامه در نمودارهای ۸- الف و ۸- ب به ترتیب تغییرات ضریب اصطکاک در روغن روانکار برحسب عمق بی‌بعد بافت‌های متنوع مورد بررسی و زاویه محیطی محل قرارگیری بافت‌ها بر سطح داخلی پوسته یاتاقان را نشان داده شده است. نمودارهای ۸- الف نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف بین ضرایب اصطکاک در بافت‌های متنوع مربوط به عمق‌های کمتر بافت می‌باشد و با افزایش عمق بافت این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین نتایج گویای کم‌تر بودن پارامتر ضریب اصطکاک در یاتاقان ژورنال با بافت‌های بیضی نسبت به دو نوع بافت دیگر می‌باشد در صورتی که این پارامتر در یاتاقان با بافت استوانه‌ای مقداری بین دو بافت دیگر مورد بررسی را دارا می‌باشد که این پدیده را می‌توان به شکل هندسی استوانه که حالتی بین مکعب و بیضی‌گون دارد را نسبت داد.

نمودارهای ۹- الف و ۹- ب به ترتیب تأثیر عمق بی‌بعد و زاویه محیطی محل قرارگیری بافت‌ها با اشکال هندسی مورد بررسی بر میزان نشتی جانبی روانکار را نشان می‌دهند. نتایج نمودار ۹- الف بر کاهش نشتی جانبی روانکار در اثر افزایش عمق هر نوع بافت ایجاد شده بر سطح حکایت دارد. همچنین نتایج گویای آن است که بیشترین نشتی در یاتاقان به ترتیب مربوط به بافت‌های بیضی، استوانه‌ای و در نهایت بافت مکعبی شکل بوده و اختلاف بین پارامتر نشت جانبی روانکار به هنگام ایجاد بافت‌های متنوع در عمق‌های کمتر، نمایان‌تر است.

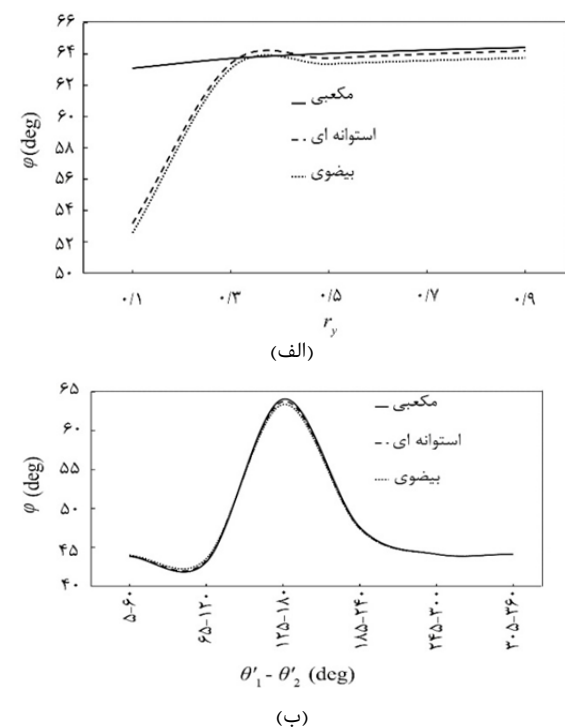


**نمودار ۷)** تغییرات نیروی اصطکاک برحسب الف) عمق بی‌بعد بافت‌ها و ب) محل قرارگیری بافت در سطح داخلی یاتاقان ژورنال مدور با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی

بافت‌های استوانه‌ای و بیضی و کاهش اختلاف بین زاویه وضعی، با افزایش ارتفاع در بافت‌های مکعبی با استوانه‌ای و بیضی ایجاد شده بر سطح می‌باشد.



**نمودار ۸)** تغییرات عدد سامرفیلد برحسب الف) عمق بی‌بعد بافت‌ها و ب) محل قرارگیری بافت در سطح داخلی یاتاقان با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی



**نمودار ۹)** تغییرات زاویه وضعی برحسب الف) عمق بی‌بعد و ب) محل قرارگیری بافت در سطح داخلی یاتاقان مدور با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی

نمودارهای ۷- الف و ۷- ب به ترتیب اثر ارتفاع بی‌بعد و زاویه محیطی محل قرارگیری بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی بر نیروی اصطکاک ایجاد شده در یاتاقان ناشی از تنش برشی فیلم

در نتایج ارائه شده در نمودار ۹- الف بیان شد، نشت جانبی در یاتاقان با بافت بیضی مقداری بیشتر از دو نوع بافت دیگر مورد بررسی را دارا می‌باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر ایجاد بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی‌شکل با عمق‌های مختلف و به‌کارگیری آنها در زوایای محیطی متفاوت بر پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی مدور همچون میزان بار قابل حمل ( $W$ )، عدد سامرفیلد ( $S$ )، زاویه وضعی روتور در فضای لقی ( $\varphi$ )، نیرو ( $F$ ) و ضریب اصطکاک ( $f$ ) و همچنین میزان نشت جانبی ( $Q$ ) روانکار مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقان‌های ژورنال با سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر با توجه به طول محدود برای یاتاقان‌های مورد ارزیابی و عدم امکان دستیابی به پاسخ تحلیلی مسأله و درنظرگیری تغییرات ضخامت فیلم روانکار متناسب با موقعیت، شکل هندسی و عمق بافت‌های سطحی ایجادشده در پوسته، از روش حل عددی اجزاء محدود بر پایه روش گالرکین استفاده شده است. همچنین از شرط مرزی رینولدز جهت تفکیک نواحی فیلم فشاری همگرا و واگرا یا به عبارت دیگر مرز رخداد ناحیه کاویتاسیون در فیلم روانکار استفاده گردیده است. علاوه بر این در بررسی حاضر موقعیت تعادل استاتیکی روتور در فضای یاتاقان به‌ازای نسبت خروج از مرکزی معین به نحوی تعیین گردیده که جهت‌گیری بار برآیند قابل حمل توسط یاتاقان همانند آنچه اغلب در شرایط واقعی رخ می‌دهد در راستای قائم باشد. از بررسی نتایج پژوهش حاضر موارد ذیل قابل استنباط می‌باشند:

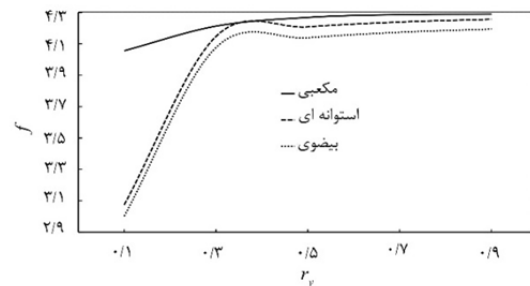
۱- ایجاد بافت با هر نوع شکل هندسی سبب شکسته شدن و توزیع مناسب‌تر فشار در یاتاقان می‌شود که این امر باعث کاهش اثر تمرکز فشار در ناحیه‌ای خاص از سیستم تکیه‌گاهی خواهد بود.

۲- وجود بافت در منطقه پرفشار یاتاقان تأثیر قابل توجهی بر فشار در فیلم سیال روانکار داشته در صورتی که ایجاد بافت در ناحیه پیدایش پدیده کاویتاسیون تأثیر چندانی بر توزیع فشار در فیلم سیال روانکار و در پی آن پارامترهای عملکرد یاتاقان نخواهد داشت. ۳- با افزایش عمق بی‌بعد بافت‌های ایجادشده بر سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال در منطقه پرفشار میزان بار قابل حمل در یاتاقان، نشتی جانبی سیال روانکار و نیروی اصطکاک تولیدی در فیلم سیال کاهش یافته درحالی که زاویه وضعی روتور در فضای لقی، ضریب اصطکاک و عدد سامرفیلد روندی صعودی خواهند داشت.

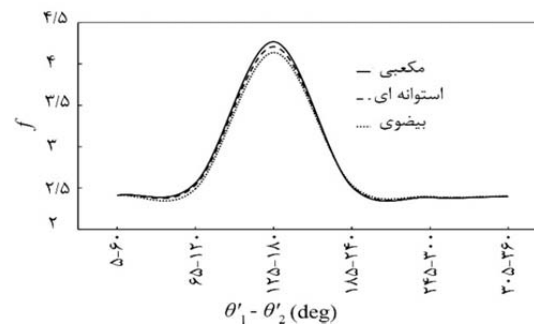
۴- بیشینه اختلاف بین پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال بافت‌دار با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی مربوط به استفاده از بافت‌های با عمق ناچیز می‌باشد که این پدیده را می‌توان به شکل هندسی مکعب، استوانه و بیضی‌گون نسبت داد. درحالی که با افزایش عمق بی‌بعد بافت‌ها مقادیر پارامترهای عملکرد یاتاقان به یکدیگر نزدیک می‌شوند.

۵- تغییر پارامترهای عملکرد یاتاقان بافت‌دار با بافت‌های متفاوت برحسب عمق بی‌بعد بافت‌ها و ناحیه قرارگیری آنها بر سطح داخلی پوسته برای یاتاقان‌های با بافت استوانه‌ای حالتی بین بافت‌های مکعبی و بیضی دارد که دلیل آن را می‌توان به شکل هندسی استوانه که حالتی بین مکعب و بیضی‌گون می‌باشد، مربوط دانست.

**تشکر و قدردانی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

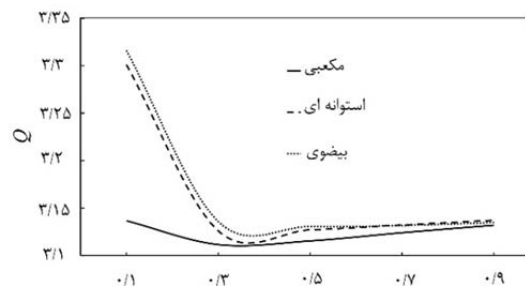


(الف)

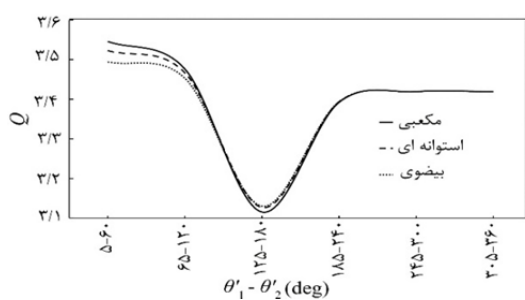


(ب)

**نمودار ۸)** تغییرات ضریب اصطکاک برحسب الف) عمق بی‌بعد بافت‌ها و ب) محل قرارگیری بافت در سطح داخلی یاتاقان ژورنال مدور با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی



(الف)



(ب)

**نمودار ۹)** تغییرات نشتی جانبی برحسب الف) عمق بی‌بعد بافت‌ها و ب) محل قرارگیری بافت در سطح داخلی یاتاقان ژورنال مدور با بافت‌های مکعبی، استوانه‌ای و بیضی

نتایج نمودار ۹- ب نیز بیانگر آن است که میزان نشتی جانبی روانکار به هنگام به‌کارگیری بافت‌های متنوع در مکان‌های گوناگون، مقادیر متفاوتی دارد. این نمودار نشان می‌دهد که در صورت به‌کارگیری بافت‌های مختلف در ناحیه کاویتاسیون، نشت جانبی در یاتاقان با بافت مکعبی بیشتر از دو نوع دیگر و در صورت به‌کارگیری بافت‌ها با اشکال هندسی گوناگون در ناحیه پرفشار (همان‌گونه که

steady-state properties and dynamic coefficients of a plain journal bearing: Experimental study. ASME Proceedings Structures and Dynamics Parts A and B. 2011;6:695-704.

6- Tala-Ighil N, Fillon M, Maspeyrot P. Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. Tribology International. 2011;44(3):211-219.

7- Wang SH, Wu XY, Zheng JH. Influence of surface texture on lubrication performance of hydrodynamic journal bearing. Applied Mechanics and Materials. 2012;120:426-431.

8- Rao TVVLN, Rani AMA, Nagarajan T, Hashim FM. Partially textured slider and journal bearing analysis. Jurnal Teknologi. 2012;58 Suppl 2:77-84.

9- Brizmer V, Kligerman Y. A laser surface textured journal bearing. Journal of Tribology. 2012;134(3):031702.

10- Reddy Ganji TS, Kakoty SK. Analysis on micro-elliptical textured journal bearing. International Journal of Current Engineering and Technology. 2014;(2):648-650.

11- Sharma N, Kango S, Sharma RK. Investigations on the effects of surface texture on the performance of a porous journal bearing operating with couple stress fluids. International Journal of Surface Science and Engineering. 2014;8(4):392-407.

12- Meng FM, Zhang L, Liu Y, Li TT. Effect of compound dimple on tribological performances of journal bearing. Tribology International. 2015;91:99-110.

13- Hamdavi Sh, Ya HH, Rao TVVLN. Effect of surface texturing on hydrodynamic performance of journal bearing. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016;11(1):172-176.

14- Sharma K. Investigation on the influence of spherical textures on the performance characteristics of porous journal bearing. International Journal of Applied Engineering and Technology. 2016;6(3):97-106.

15- Wang L, Han Z, Chen G, Su H. Thermo-hydrodynamic analysis of large-eccentricity hydrodynamic bearings with texture on journal surface. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science. 2018;232(19):3564-3569.

16- Aliheidari Biouki M, Dashti Rahmatabadi A, Zare Mehrjardi M. The effect of shell texturing on the performance of noncircular hydrodynamic two lobe journal bearings. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(2):293-304. [Persian]

17- Cupillard S. Thermohydrodynamics of sliding contacts with textured surfaces [Dissertation]. Luleå: Luleå University of Technology; 2009.

18- Raimondi AA, Boyd J. A solution for the finite journal bearing and its application to analysis and design. ASLE Transactions. 1958;1(1):194-209.

19- Reddi MM, Chu TY. Finite element solution of steady-state incompressible lubrication problem. Journal of Lubrication Technology. 1970;92(3):495-502.

20- Das S, Guha SK, Chattopadhyay AK. Linear stability analysis of hydrodynamic journal bearings under micropolar lubrication. Tribology International. 2005;38(5):500-507.

21- Dashti Rahmatabadi A, Zare Mehrjardi M, Fazel MR. Performance analysis of micropolar lubricated journal bearings using GDQ method. Tribology International. 2010;43(11):2000-2009.

**تأییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

**سهم نویسندگان:** ابوالفضل رسولی‌زاده شورکی (نویسنده اول)،

پژوهشگر اصلی (۶۰٪)؛ اصغر دشتی رحمت‌آبادی (نویسنده دوم)،

تحلیلگر آماری (۲۰٪)؛ مهدی زارع مهرجردی (نویسنده سوم)،

پژوهشگر کمکی (۲۰٪)

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

#### ۷- فهرست علائم

|                    |                                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------|
| $a_x, a_y, a_z$    | طول، عرض و ارتفاع مکعب‌ها                              |
| $\bar{c}_m$        | لقی کمینه (m)                                          |
| $\bar{D}$          | قطر یاتاقان (m)                                        |
| $e$                | میزان خروج از مرکزی ژورنال نسبت به مرکز یاتاقان        |
| $f$                | ضریب اصطکاک                                            |
| $F$                | نیروی اصطکاک                                           |
| $\bar{h}$          | ضخامت فیلم روانکار (m)                                 |
| $\bar{L}$          | طول یاتاقان (m)                                        |
| $O_B$              | مرکز یاتاقان                                           |
| $O_c$              | مرکز بافت                                              |
| $O_J$              | مرکز روتور                                             |
| $\bar{P}$          | فشار سیال (Pa)                                         |
| $Q$                | نشتی جانبی روانکار                                     |
| $r_x, r_y, r_z$    | شعاع و عمق بافت‌های استوانه‌ای و بیضی در راستای محورها |
| $S$                | عدد سامرفیلد                                           |
| $W$                | بار بی‌بعد قابل حمل یاتاقان در شرایط پایدار            |
| $W_x, W_y$         | بار استاتیکی وارد بر ژورنال در راستای محورها           |
| $x, y, z$          | جهت محورها                                             |
| $\bar{x}, \bar{z}$ | راستی دوران و طولی یاتاقان (m)                         |
| $x_c, y_c, z_c$    | مختصات محلی بافت                                       |
| $X_J, Y_J$         | مختصات مرکز روتور                                      |
| $\theta$           | زاویه سنجش از محور X                                   |
| $\theta'$          | زاویه سنجش از محور از خط‌المركزین روتور و یاتاقان      |
| $\bar{\mu}$        | لزجت دینامیکی ( $N.s/m^2$ )                            |
| $\varphi$          | زاویه وضعی روتور                                       |
| $\bar{\omega}$     | سرعت زاویه‌ای روتور (rad/s)                            |

#### منابع

- 1- Sinanoğlu C, Nair F, Baki Karamış M. Effects of shaft surface texture on journal bearing pressure distribution. Journal of Materials Processing Technology. 2005;168(2):344-353.
- 2- Ausas R, Ragot P, Leiva J, Jai M, Bayada G, Buscaglia GC. The impact of the cavitation model in the analysis of microtextured lubricated journal bearings. Journal of Tribology. 2007;129(4):868-875.
- 3- Tala-Ighil N, Maspeyrot P, Fillon M, Bounif A. Effects of surface texture on journal-bearing characteristics under steady-state operating conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology. 2007;221(6):623-633.
- 4- Kango S, Sharma RK. Studies on the influence of surface texture on the performance of hydrodynamic journal bearing using power law model. International Journal of Surface Science and Engineering. 2010;4(4/5/6):505-524.
- 5- Dadouche A, Conlon MJ, Dmochowski W, Koszela W, Galda L, Pawlus P. Effect of surface texturing on the