



جهت بهبود عملکرد یاتاقان‌های ژورنال دانست.

در همین راستا در سال ۲۰۱۲، شنی و همکاران [۱] به بررسی اثر اضافه کردن نانو ذرات اکسید مس، دی اکسید تیتانیوم و نانو ذرات الماس به روغن  $API - SF$  به عنوان روانکار پایه بر عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال مدور پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر بهبود بار قابل حمل یاتاقان، کاهش نشتی جانبی و افزایش اصطکاک بین لایه‌های سیال روانکار با تبدیل روغن پایه به نانو روانکار با اضافه کردن نانو ذرات نامبرده به آن می‌باشد. در سال ۲۰۱۴، بابو و همکاران [۲] به بررسی عملکرد حالت پایای یاتاقان‌های ژورنال مدور روانکاری شده با نانو سیالات تشکیل شده از روغن نیوتونی  $SAE/15W40$  و نانو ذرات اکسید روی و اکسید آلومینیم پرداختند. در این پژوهش رابطه ریاضی جدید ارائه شده بین لزجت نانو روانکار و دما، جهت محاسبه پارامترهای عملکرد یاتاقان بکار گرفته شده و بیان گردیده که لزجت روغن روانکار با اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه افزایش یافته که نتیجه آن بهبود پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال مدور تحت روانکاری با سیالات نانو نسبت به روانکار معمولی می‌باشد. در ادامه در همان سال تجزیه و تحلیل عملکرد یاتاقان‌های ژورنال مدور تحت روانکاری با نانو سیالاتی شامل نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم با بکارگیری مدل لزجت تعمیم یافته کرایگر-دوگرتری و تنش کوپل در معادله رینولدز توسط بینو و همکاران [۳] صورت گرفت. نتایج این پژوهش از بهبود چشمگیر میزان بار قابل حمل یاتاقان‌های ژورنال مدور تحت روانکاری با سیال نانو در مقایسه با روانکار پایه حکایت دارد. سپس در سال ۲۰۱۵، تحلیل عملکرد ترموهیدرودینامیکی یاتاقان‌های ژورنال تحت روانکاری با نانو سیالاتی متشکل از روغن  $SAE/15W40$  و نانو ذرات اکسید مس، اکسید سریم و اکسید آلومینیم بصورت درصدی وزنی مجزا توسط بابو و همکاران [۴] صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان دهنده تأثیر قابل توجه حضور نانو ذرات در سیال روانکار بر پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال مدور با لحاظ اثرات گرما نسبت به تحلیل تک‌دما می‌باشد. بررسی مشخصه‌های استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال مدور شیاردار تحت روانکاری با نانو سیال شامل ذرات دی اکسید تیتانیوم و بکارگیری مدل لزجت وابسته به دما از پژوهش‌های صورت گرفته در سال ۲۰۱۷ در راستای بکارگیری تکنولوژی نانو جهت بهبود عملکرد یاتاقان‌های ژورنال بشمار می‌رود که توسط یاتیش و بینو [۵] صورت گرفته‌است. نتایج این تحقیق بیانگر بهبود پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال مدور با افزایش میزان نانو ذرات اضافه شده به روانکار پایه می‌باشد.

با مرور پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه بکارگیری سطوح بافت‌دار<sup>۱</sup> در یاتاقان‌های ژورنال، ملاحظه می‌گردد که در سال ۲۰۰۵ اثر ایجاد بافت روی سطح روتور بر توزیع فشار یاتاقان ژورنال توسط سیم سینان‌گلو و همکاران [۶] بررسی شده است. در این پژوهش، توزیع فشار در یاتاقان ژورنال مدور با ایجاد بافت در قسمت‌های مختلف سطح روتور و سرعت‌های دورانی متفاوت با بکارگیری روش شبکه‌های عصبی استخراج گردیده‌است. داده‌های آزمایش این تحقیق به عنوان اطلاعات یادگیری برای شبکه عصبی جهت ایجاد یک مدل پیش‌بینی قابل

اعتماد مورد استفاده قرار می‌گیرند که می‌توانند به یاتاقان ژورنال اعمال شده و عملکرد مدل را تأیید کنند. در ادامه در سال ۲۰۰۷ تأثیر مدل کاویتاسیون در تحلیل روانکاری یاتاقان‌های ژورنال دارای بافت‌هایی با ساختار میکرو (میکروبافت‌ها) توسط واساس و همکاران [۷] بررسی گردید. در این تحقیق، نویسندگان نتایج را با بکارگیری مدل کلاسیک رینولدز و مدل  $P - \theta$  پیشنهادی توسط الورد و آدمز مورد مقایسه قرار داده‌اند. هر دو مدل، پیش‌بینی‌های کاملاً مشابهی از ظرفیت بار قابل حمل و گشتاور اصطکاک در شرایط غیرقابل پیش‌بینی را ارائه می‌دهند؛ درحالیکه مدل رینولدز، مدل ترجیحی برای رفتار عددی بهتر می‌باشد. همچنین نشان داده شده است که در شرایط بکارگیری یاتاقان ژورنال دارای میکروبافت روی سطح داخلی، مدل رینولدز به طور قابل ملاحظه‌ای منجر به خطاهایی در برآورد چند متغیر مانند گشتاور اصطکاک می‌شود. بنابراین در هنگام تحلیل یاتاقان‌های دارای بافت میکرو، مدل پایداری جرم پیشنهادی توسط الورد، نتایج دقیق‌تری را به دست می‌دهد. در سال ۲۰۱۰ تأثیر سطوح دارای بافت بر عملکرد هیدرودینامیکی یاتاقان‌های ژورنال با بکارگیری مدل پاورلا توسط کانگو و شرما [۸] مطالعه گردید. در این پژوهش به بررسی اثر ترکیبی سطح دارای بافت نظیر بافت‌های سینوسی، مثبت کامل و زبری‌های نیمه موجی عرضی و طولی بر سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال مدور با سیال غیرنیوتونی<sup>۲</sup> قانون توانی پرداخته شده‌است. در این تحلیل، روش حل عددی تفاضل محدود بر معادله رینولدز تعمیم یافته جهت بررسی همزمان اثرات بافت و روانکار غیرنیوتونی بر پارامترهای عملکرد یاتاقان مورد بررسی، بکار گرفته شده و نتایج نشان دهنده 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 می‌باشد در حالیکه بافت سینوسی طولی نسبت به دیگر بافت‌های مورد بررسی جهت کاهش نیروی اصطکاک مناسب می‌باشد. در ادامه، مطالعه تجربی تأثیر سطح دارای بافت بر مشخصه‌های حالت پایا و ضرایب دینامیکی یک یاتاقان ژورنال مدور در سال ۲۰۱۱ توسط دادوچ و همکاران [۹] 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 بر روی سطوح داخلی یاتاقان مورد استفاده قرار گرفته و با این تکنولوژی، گودی‌هایی کروی شکل به قطر ۱ میلی‌متر و عمق ۶۰ میکرومتر بر روی سطح داخلی پوسته یاتاقان ایجاد شده است و 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 سلسیوس و وجود ضریب میرایی بزرگتر در بارهای استاتیکی کوچک، از دیگر دستاوردهای این تحقیق می‌باشد. در سال ۲۰۱۲ تأثیر سطح بافت‌دار بر عملکرد یاتاقان‌های

<sup>2</sup> Non Newtonian Fluid

<sup>1</sup> Textured Surfaces

ژورنال هیدرودینامیکی توسط وانگ و همکاران [۱۰] مطالعه گردید. این پژوهشگران که از روش تفاضل محدود جهت استخراج فشار توزیع شده در فیلم سیال روانکار، برای حل معادله رینولدز استفاده کردند، اثر ایجاد بافت در نواحی مختلف سطح داخلی پوسته و نسبت‌های خروج از مرکزی و منطری<sup>۱</sup> متفاوت بر قابلیت حمل بار، نیرو و ضریب اصطکاک در فیلم روغن را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند که ایجاد بافت‌های جزئی در مسیر محیطی یاتاقان ژورنال مدور با نسبت‌های طول به قطر کوچک بطور قابل توجهی عملکرد یاتاقان را بهبود می‌دهد. همچنین نتایج بیانگر کاهش ضریب اصطکاک در صورت اعمال بافت جزئی به سطح داخلی یاتاقان در مسیر موازی با محور یاتاقان می‌باشد. تجزیه و تحلیل بافت‌های جزئی بر سطوح یاتاقان‌های لغزشی کشویی و یاتاقان‌های ژورنال در همان سال توسط رائو و همکاران [۱۱] 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 گرفت. هندسه بافت‌های بکارگرفته شده در این پژوهش بصورت شیارهایی متوالی می‌باشد و نتیجه‌گیری شده‌است 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. تجزیه و تحلیل یاتاقان‌های ژورنال با بافت‌های بیضوی در سال ۲۰۱۴ توسط گنجی و کاکوتی [۱۲] انجام شد. محققان در این پژوهش اثر بافت‌های بیضوی بر ظرفیت بار قابل حمل یاتاقان، اصطکاک در فیلم سیال روانکار و نرخ جریان در یاتاقان‌های ژورنال مدور را بررسی و بیان کرده‌اند که می‌توان با تغییر در تراکم و عمق بافت‌های بیضوی 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 توسط یاتاقان و نرخ جریان روانکار و همچنین کاهش متغیر اصطکاک در یاتاقان می‌شود. در سال ۲۰۱۵ اثر حفره‌های مرکب بر عملکرد روانکاری یاتاقان‌های ژورنال توسط منگ و همکاران [۱۳] بررسی شد. نویسندگان اثر بافت‌های ترکیبی مکعبی و کروی بر عملکرد روانکاری یاتاقان‌های ژورنال مدور را مورد بررسی قرار داده و بدین منظور با بکارگیری نرم‌افزار Ansys و استفاده از روش برهم کنش بین سازه و سیال<sup>۲</sup> به مقایسه عملکرد یاتاقان ژورنال مدور با وجود بافت‌های مکعبی ساده و استفاده از بافت‌های ترکیبی مکعبی و کروی پرداخته‌اند. نتایج عددی این تحقیق نشان می‌دهند که بافت‌های ترکیبی نسبت به نوع ساده می‌توانند ظرفیت حمل بار بیشتر و ضریب اصطکاک کمتری را به دلیل کنش هیدرودینامیکی دو برابر، عرضه کنند. علاوه بر این، میزان بهبود عملکرد، به اندازه هندسی بافت‌های ترکیبی، فاصله بافت‌ها و شرایط کاری یاتاقان بستگی دارد. در پژوهش‌های اخیر صورت گرفته در این زمینه می‌توان به بررسی اثر بافت‌های موجود بر قسمتی از سطح داخلی یاتاقان‌های ژورنال مدور توسط همداوی و همکاران [۱۴] و تحقیقی با عنوان بررسی اثر بافت‌های کروی منفی بر مشخصه‌های عملکرد یاتاقان‌های ژورنال

هیدرودینامیکی مدور متخلخل<sup>۳</sup> توسط شرما [۱۵] 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 شده‌است. در سال ۲۰۱۸ نیز تأثیر بافت‌دار شدن جداره بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی غیرمدور دولب<sup>۴</sup> توسط بیوکی و همکاران [۱۶] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق که در آن اثر بکارگیری بافت‌های استوانه‌ای در نواحی مختلف سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال غیرمدور دولب بررسی شده است، گویای متفاوت بودن عملکرد یاتاقان در صورت بکارگیری بافت‌های استوانه‌ای در نواحی مختلف سطح و امکان دستیابی به عملکرد بهینه مجموعه با بکارگیری بافت‌ها در منطقه مناسب می‌باشد. همچنین عنوان شده است که در صورت افزایش میزان غیرمدوری یاتاقان ژورنال دولب، اثر بافت بر عملکرد مجموعه چشم‌گیرتر خواهد بود. علاوه بر این در همین سال بررسی رفتار یاتاقان‌های ژورنال با سطح دارای بافت بر اساس رویکرد برهم کنش سازه و سیال توسط لین و همکاران [۱۷] صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان دهنده آن است که بکارگیری بافت‌های جزئی بر سطح داخلی پوسته یاتاقان در مسیر محیطی می‌تواند سبب کاهش یا افزایش میزان بار قابل حمل یاتاقان شود.

با مروری بر پژوهش‌های پیشین ملاحظه می‌گردد که تاکنون مطالعه‌ای پیرامون تحلیل عملکرد یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی مدور بافت‌دار با نانو روانکار گزارش نشده است. به همین منظور در پژوهش حاضر اثر وجود بافت‌های استوانه‌ای شکل با عمق‌های متفاوت توام با تأثیر غلظت حجمی نانو ذرات تیتانیوم دی اکسید افزوده شده به روانکار نیوتونی پایه (SAE30)، بر پارامترهای عملکرد حالت پایدار سیستم تکیه‌گاهی شامل یاتاقان ژورنال مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

## ۲- تئوری

در ادامه کیفیت تأثیرگذاری استفاده از نانو روانکارها و ایجاد بافت‌های روی سطوح یاتاقان تشریح شده‌است.

### ۲-۱- نانو روانکار

روغن موتور نوعی روان کننده می‌باشد که جهت خنک‌کاری و کاهش اصطکاک و سایش در بسیاری از تجهیزات صنعتی که قطعات دوارى همچون روتور- یاتاقان ژورنال جزء اساسی و مهم آنها به حساب می‌آید، استفاده می‌شود. نقش اصلی روغن موتور در یاتاقان‌های ژورنال، کاهش اصطکاک، مهار خوردگی، تمیزی سطوح در حال حرکت نسبت به یکدیگر و همچنین انتقال گرمای تولید شده در فضای لقی یاتاقان به محیط می‌باشد. از اینرو بکارگیری سیال روغنی مناسب جهت روانکاری سیستم یاتاقان ژورنال- روتور می‌تواند بهبود کارایی و دوام عمر سیستم‌های دوار را در پی داشته باشد.

دو پارامتر مهم در انتخاب روغن مناسب جهت روانکاری یاتاقان‌های ژورنال، لزجت و رسانایی گرمایی می‌باشد. روغن‌های با لزجت بالا، میزان بار قابل حمل در یاتاقان را افزایش می‌دهند و از اینرو دوام عمر سیستم یاتاقانی را بهبود می‌بخشند. از سوی دیگر، استفاده از

<sup>1</sup> Eccentricity and Aspect Ratios

<sup>2</sup> Fluid and Structure Interaction

<sup>3</sup> Porous Hydrodynamic Journal Bearings

<sup>4</sup> Two Lobe

روانکاری با ظرفیت گرمایی بالا سبب انتقال بیشتر و سریع تر گرما از داخل سیستم به محیط اطراف شده و مشکلات ناشی از افزایش بیش از حد روغن نظیر اکسیداسیون روانکار را تقلیل می‌دهد. از اینرو بکارگیری روغن‌هایی با لزجت و ظرفیت گرمایی بالا می‌تواند بر بهبود عملکرد سیستم یاتاقان‌های ژورنال روغنی مؤثر باشد. یکی از روش‌های تولید سیالاتی با ویژگی‌های نامبرده جهت روانکاری یاتاقان‌های ژورنال، استفاده از نانو ذرات جامد در مایعات رایجی مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن‌های معمولی می‌باشد که ترکیب آنها نانو سیال نامیده می‌شود. نتایج تحقیق بسیاری از پژوهشگران بر افزایش چشمگیر ظرفیت گرمایی سیالات معمول با اضافه کردن نانو ذرات نسبت به شرایط عادی حکایت دارد.

لزجت مایعات با افزودن نانو ذرات به آنها، نسبت به حالت اولیه، تغییر پیدا می‌کند و بنابراین با توجه به تأثیر پارامتر لزجت سیال بر توزیع فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار، نانو روانکارها می‌توانند در بهبود عملکرد سیستم نقش مفیدی ایفا کنند. در نتایج تحقیق پژوهشگران حوزه روانکاری بیان شده که لزجت نانو سیالات به شکل و اندازه نانو ذرات، دمای سیال و غلظت آن بستگی دارد.

نانو ذرات مختلفی همچون فلزات  $Mo$  و  $Pd$ ،  $Ag$ ،  $Ni$ ،  $Cu$ ، اکسیدهای فلزی نظیر  $TiO_2$ ،  $ZnO$ ،  $ZrO_2$ ،  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  ساختارهای سولفیدی همچون  $WS_2$ ،  $MoS_2$ ،  $PbS$ ، ترکیبات کربن نظیر فولرن،  $CNT$ ،  $MWCNT$  و نانو الماس و چند ترکیب دیگر مانند  $CaCO_3$ ،  $PTFE$ ،  $LaF_3$  می‌توانند به سیالات پایه‌ای همچون  $SAE 40$  و  $SAE 30$  اضافه شده و تشکیل نانو روانکار دهند.

همانگونه که بیان شد، یکی از عوامل مؤثر بر تغییر لزجت نانو سیال روانکار، غلظت نانو ذرات اضافه شده به آن می‌باشد. با افزودن نانو ذرات در غلظت‌های مختلف به روغن پایه، لزجت سیال روانکار، مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرد که استخراج یک رابطه ریاضی جهت بیان لزجت نانو سیال تشکیل شده در غلظت‌های مختلف، موضوعی است که توجه پژوهشگران حوزه تریبولوژی در سال‌های اخیر را به خود جلب کرده است. روابط ریاضی متفاوتی جهت بیان لزجت نسبی نانو سیالات گوناگون ( $\mu_{rel}$ ) (نسبت لزجت نانو سیال به لزجت روغن پایه  $(\mu_{nf}/\mu_{bf})$ ) در غلظت‌های مختلف نانو ذرات اضافه شده به روغن پایه روانکار بیان شده است که برخی از آنها در ادامه اشاره شده‌اند:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi \quad \text{مدل Einstein} \quad (1)$$

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad \text{مدل Brinkman} \quad (2)$$

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2 \quad \text{مدل Batchelor} \quad (3)$$

پارامتر  $\phi$  در روابط بالا به درصد حجمی نانو ذرات اضافه شده اشاره دارد. یکی از نواقص روابط بیان شده در بالا، عدم توانایی آنها در ارائه صحیح مقدار لزجت نسبی نانو ذرات در محدوده‌های گوناگون درصد حجمی نانو ذرات می‌باشد. رابطه کرایگر-دوگرتی (رابطه ۴) یکی از روابطی است که این نقص را برطرف و لزجت نسبی سیال نانو در محدوده وسیعی از کسر حجمی نانو ذرات را ارائه می‌دهد.

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad \text{Krieger-Dougherty} \quad (4)$$

در این رابطه  $\phi_m$ ، به بیشینه درصد مجموعه ذرات اضافه شده که در نرخ برش‌های بالا تقریباً برابر با ۰/۶۰۵ می‌باشد و  $[\eta]$  به لزجت درونی که مقدار آن برای ذرات کروی سخت برابر با ۲/۵ می‌باشد، اشاره

دارد. رابطه (۴) توسط چن و همکاران در سال ۲۰۰۷ با در نظرگیری کسر حجمی مجموعه ذرات همراه با ساختار توده ذرات اصلاح گردید. معادله کرایگر-دوگرتی اصلاح شده بصورت زیر می‌باشد:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi_a}{\phi_m}\right)^{-2.5\phi_m} \quad \text{Modified Krieger-Dougherty} \quad (5)$$

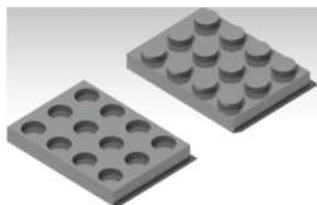
که در آن  $\phi_a = \phi \left(\frac{a_a}{a}\right)^{3-D}$  می‌باشد. در این رابطه،  $a$  و  $a_a$  به ترتیب شعاع ذرات اولیه و توده ذرات می‌باشند.  $D$  شاخصی که برای نانو روانکارها مقداری برابر ۱/۸ را دارا می‌باشد. طبق نتایج ارائه شده در مرجع [۳] نسبت شعاع اولیه ذرات نانو به شعاع توده ذرات  $\left(\frac{a_a}{a}\right)$  برای نانو ذرات  $TiO_2$  اضافه شده به روغن موتور  $SAE 30$  برابر با ۷/۷۷ می‌باشد. بنابراین لزجت نسبی برای نانو سیال تشکیل شده از نانو ذرات  $TiO_2$  و روغن پایه  $SAE 30$  بر حسب درصد حجمی نانو ذرات اضافه شده در مقادیر مختلف بصورت زیر می‌باشد [۳]:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi}{0.605} (7.77)^{1.2}\right)^{-1.51} \quad (6)$$

که با بکارگیری لزجت نسبی بیان شده در رابطه (۵) در معادله رینولدز می‌توان اثر درصد حجمی نانو ذرات  $TiO_2$  اضافه شده به روغن پایه  $SAE 30$  (نانو روانکار) بر عملکرد حالت پایای سیستم یاتاقان‌های ژورنال مدور مورد بررسی قرار گیرد.

## ۲-۲- بافت‌های سطحی

بافت هر سطح توسط توپوگرافی طبیعی آن سطح مشخص می‌شود. تمام سطوح، دارای بافت و ساختاری منحصرفرد هستند. تفاوت بافت با زبری در این است که بافت‌ها، اشکال مشخصی هستند که بصورت منظم بر روی سطح قرار می‌گیرند؛ درحالیکه زبری هندسه معینی نداشته و بصورت تصادفی متأثر از عوامل مختلف بر روی سطح ایجاد می‌شود. بافت‌های سطحی عموماً شامل خلل و فرجی هستند که دارای یک الگوی ساختاری خاص و قابل توصیف می‌باشند. آنها دارای مشخصاتی همچون اندازه و نحوه قرارگیری بر روی سطح بوده و در هندسه‌های مختلفی همچون مکعبی، استوانه‌ای، کروی، بیضی، شیار مانند، موجی و ترکیبی از آنها قابل ایجاد هستند.



شکل ۱- بافت‌های مثبت و منفی ایجاد شده روی یک سطح صاف

شکل ۱ نمونه‌ای از بافت‌های مثبت و منفی استوانه‌ای شکل را نشان می‌دهد. سطوح دارای بافت بصورت ویژه جهت بهبود عملکرد تجهیزات متحرک، طراحی و تولید می‌شوند. نمونه‌هایی از ایجاد بافت را می‌توان به گل‌دار کردن سطح تایر چرخ‌های اتومبیل جهت افزایش میزان چسبندگی تایر به جاده در هنگام حرکت اتومبیل و یا سطح ناهموار (دارای فرورفتگی و برآمدگی) توپ‌های گلف که برای کاهش نیروی درگ طراحی شده است، اشاره کرد. در حوزه روانکاری، سطوح طراحی شده با بافت در بسیاری از موارد نظیر آب‌بندهای مکانیکی، پد

ضخامت فیلم سیال روانکار در هر نقطه از محیط پیرامون یاتاقان ژورنال مدور بافت‌دار را با رابطه زیر می‌توان بیان کرد [۲۰]:

$$h = h_{smooth} + \Delta h(\theta, z) \quad (10)$$

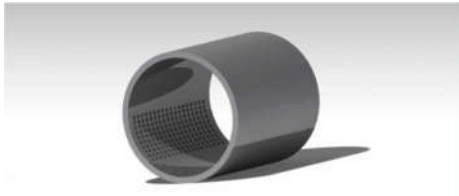
در رابطه (۱۰)،  $h_{smooth}$  نشان‌دهنده ضخامت فیلم سیال قرار گرفته مابین روتور و پوسته در حالت بدون بافت در هر نقطه از محیط پیرامون یاتاقان مدور بوده که بصورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود. و همچنین  $\Delta h(\theta, z)$  بیانگر ارتفاع بافت‌های مختلف اتم از مکعبی، استوانه‌ای و بیضوی موجود روی سطح داخلی هر لب یاتاقان می‌باشد [۲۱].

$$h_{smooth} = 1 - X_I \cos \theta - Y_I \sin \theta \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)،  $(X_I, Y_I)$  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 (۱۲) تبدیل می‌شود.

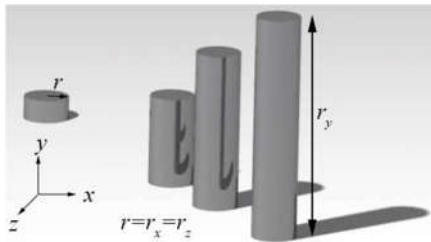
$$h_{smooth} = 1 + \varepsilon \cos \theta' \quad \text{که} \quad \theta = \theta' + \varphi + \pi/2 \quad (12)$$

شکل ۲ یاتاقان ژورنال مدور هیدرودینامیکی بافت‌دار با بافت‌های استوانه‌ای شکل قرار گرفته در ناحیه‌ای خاص از سطح داخلی پوسته را نشان می‌دهد.



شکل ۲- یاتاقان ژورنال مدور هیدرودینامیکی بافت‌دار با بافت‌های استوانه‌ای قرار گرفته در ناحیه‌ای خاص از سطح داخلی پوسته

در پژوهش حاضر، شکل هندسی بافت‌های بکار رفته بصورت استوانه‌های حفره‌ای شکل، در محدوده‌ای خاص از سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی مدور (شکل ۲) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین در شکل ۳ عمق‌های مختلف برای یک حفره استوانه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۳- عمق‌های مختلف برای بافت‌های حفره‌ای استوانه‌ای در سطح داخلی پوسته یاتاقان بکار گرفته شده در پژوهش حاضر

با توجه به شکل ۳،  $r_x$ ،  $r_y$  و  $r_z$  به ترتیب شعاع بافت ایجاد شده در جهت محیطی، عمق و شعاع در جهت طولی هر کدام از حفره‌های استوانه‌ای راستاهای محوره‌های مختصات  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  می‌باشند. در هندسه استوانه‌ای نشان داده شده در شکل ۳،  $r_x = r_z = r$  و معادله تعریف شده برای استوانه به شکل زیر می‌باشد:

یاتاقان‌های کف‌گرد و سطح داخلی یاتاقان‌های ژورنال، اثرات مفیدی خواهد داشت. ایجاد تغییر مثبت در پارامترهای عملکرد استاتیکی و دینامیکی تکیه‌گاه‌های یاتاقانی را می‌توان دلیل اصلی بکارگیری سطوح بافت‌دار در حوزه روانکاری سیستم‌های دوار دانست. در آب‌بندها و یاتاقان‌های فیلم سیال، کنترل خواص روانکاری با بکارگیری سطوح دارای میکروبافت‌ها (بافت‌هایی با ابعادی در حدود ۱ تا ۱۰ میکرومتر) می‌تواند ظرفیت بار، گشتاور اصطکاکی و ضرایب سفتی و میرایی فیلم سیال را تغییر دهد. از اینرو انتخاب صحیحی از هندسه و محل قرارگیری بافت‌ها می‌تواند تأثیرات مفیدی بر عملکرد سیستم‌های یاتاقانی داشته باشد.

در تحقیقات روانکاری یاتاقان‌های ژورنال، معمولاً عمق بافت‌های بکار رفته بر سطح روانکاری شده از ۰/۱ تا ۲۰ برابر ضخامت روغن روانکار در نظر گرفته می‌شود. بافت‌های بکار رفته می‌توانند بعنوان یک میکرومخزن روان‌کننده بر روی سطح به هنگام شروع حرکت نسبی عملکرد مفیدی داشته باشند. آنها می‌توانند ذرات ساییده شده از سطوح روانکاری شونده و همچنین ذرات ریز گرد و غبار اضافه شده به فضای لقی از محیط بیرون را در خود جای دهند. به همین دلیل وجود بافت‌ها می‌تواند به مثابه سدی در برابر رسیدن آسیب به سطح بیرونی روتور و سطح داخلی پوسته یاتاقان عمل کرده و عملکرد هیدرودینامیکی سطوح روانکاری شونده با روغن را بهبود بخشند [۱۸].

### ۳- معادلات حاکم

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، بطور متداول توزیع فشار یاتاقان در جهات طولی و محیطی جهت استخراج پارامترهای عملکرد یاتاقان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. در ادامه فرم کلی معادله رینولدز حاکم با اعمال فرضیات متداول بر معادلات اصلی ناویر-استوکس ارائه گردیده است.

#### ۳-۱- معادله رینولدز

معادله رینولدز حاکم بر روانکاری هیدرودینامیکی یاتاقان ژورنال در شرایط پایا و دمایی ثابت، نانو روانکار تراکم‌ناپذیر نیوتونی و فرض همراستایی روتور صلب و پوسته، بصورت ذیل بیان می‌گردد [۱۹]:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[ \frac{\bar{h}^3 \partial \bar{P}}{\mu_{nf} \partial \bar{x}} \right] + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ \frac{\bar{h}^3 \partial \bar{P}}{\mu_{nf} \partial \bar{z}} \right] = 6 \bar{R} \bar{\omega} \frac{d\bar{h}}{d\bar{x}} \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $\bar{P}$  فشار توزیع شده در فیلم سیال روانکار و  $\bar{h}$  به ضخامت فیلم روانکار تراکم‌ناپذیر مابین 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 بصورت:

$$\theta = \frac{\bar{x}}{\bar{R}}, z = 2 \frac{\bar{z}}{\bar{L}}, h = \frac{\bar{h}}{\bar{C}}, P = \frac{\bar{C}^2}{\mu_{nf} \bar{\omega} \bar{R}^2} \bar{P}, \mu_{rel} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} \quad (8)$$

معادله رینولدز بی‌بعد شده (۷) بصورت ذیل قابل بازنویسی است [۱۹]:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[ h^3 \frac{\partial P_0}{\partial \theta} \right] + \left( \frac{D}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left[ h^3 \frac{\partial P_0}{\partial z} \right] = 6 \mu_{rel} \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (9)$$

$$S = 1/\pi W \quad (18)$$

$$\varphi = \text{Arc tan}(X_1/Y_1) \quad (19)$$

$$F = \frac{2\bar{C}^2}{\mu_{br}\bar{\omega}R^2L} \bar{F} = \int_0^1 \int_{\theta_1}^{\theta_2} A d\theta dz \quad (20)$$

$$+ \int_0^1 \int_{\theta_2}^{\theta_e} A \frac{h}{h_{cav}} d\theta dz \quad \text{که در آن:}$$

$$A = \frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\mu_{rel}}{h}$$

$$\left(\frac{\bar{R}}{\bar{C}_m}\right) f = \frac{F}{W} \quad (21)$$

### ۶- بحث و بررسی پیرامون نتایج

پارامترهای مشخصه طراحی یاتاقان ژورنال مدور و ویژگی‌های سیال روانکار مورد استفاده در مطالعه حاضر در جدول ۱ ارائه شده‌اند. به منظور بررسی صحت عملکرد برنامه رایانه‌ای تدوین شده جهت تحلیل عملکرد هیدرودینامیکی یاتاقان ژورنال مدور با بافت‌های متنوع تحت روانکاری با نانو سیال  $TiO_2/SAE30$ ، در ابتدا نتایج خروجی برنامه برای زاویه وضعی روتور در فضای لقی در یاتاقان‌های ژورنال مدور بافت‌دار با نتایج مشابه مرجع [۲۰]، در جدول ۲ و همچنین برای میزان بار قابل حمل در یاتاقان ژورنال مدور بدون بافت با نانو روانکار  $TiO_2/SAE30$  مرجع [۳]، در شکل ۴ مقایسه شده است.

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

مقدار	تعریف	پارامتر
5	تعداد بافت‌ها در جهت محیطی	$N_{xD}$
11	تعداد بافت‌ها در جهت طولی	$N_{zD}$
0.047619	شعاع بی‌بعد بافت‌ها در جهت محیطی	$R_x$
0.0238095	شعاع بی‌بعد بافت‌ها در جهت طولی	$R_z$
2 mm	شعاع بایعد بافت‌ها در جهت طولی	$\bar{r}_x$
2 mm	شعاع بایعد بافت‌ها در جهت محیطی	$\bar{r}_z$
30 $\mu m$	لقی	$\bar{C}$
0.063 m	طول یاتاقان	$\bar{L}$
0.0315 m	شعاع یاتاقان	$\bar{R}$
0.7	نسبت خروج از مرکزی	$\varepsilon$
0.05	نقطه شروع بافت در راستای طولی	$z_1$
0.95	نقطه پایان بافت در راستای طولی	$z_2$
180°	زاویه شروع بافت در راستای محیطی	$\theta_1^\circ$
225°	زاویه پایان بافت در راستای محیطی	$\theta_2^\circ$

مقایسه نتایج ارائه شده در جدول ۲، تطابق مناسب مابین نتایج بررسی حاضر و نتایج گزارش شده قبلی را نشان داده و صحت عملکرد برنامه‌ی جدول ۲- مشخصات محدوددهی ایجاد بافت‌ها به انضمام مشخصه‌های عملکرد یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی مدور

a Ref [3]		b Present study				
$\theta_1^\circ$	$\theta_2^\circ$	$z_1$	$z_2$	$\varphi^{oa}$	$\varphi^{ob}$	
0	90	0	0.5	48.5	47.7	
0	45	0	0.25	50.4	51.3	
175	220	0.12	0.5	49	49.3	
180	225	0.2	0.5	49.6	49.5	
185	230	0.12	0.5	49	48.7	

$$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = r^2 \quad (13)$$

که در آن  $O_c$  مرکز هر استوانه 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 استوانه برابر است با:

$$\Delta h = r_y \quad (14)$$

### ۴- بررسی عددی

در پژوهش حاضر تأثیر وجود بافت‌های استوانه‌ای با عمق‌های مختلف در ناحیه‌های متفاوت بر سطح داخلی پوسته یاتاقان ژورنال مدور با نانو روانکار  $TiO_2/SAE30$  بر پارامترهای عملکرد استاتیکی مجموعه نظیر میزان بار قابل حمل<sup>۱</sup>، عدد سامرفیلد<sup>۲</sup>، زاویه وضعی<sup>۳</sup> روتور، نیرو و ضریب اصطکاک<sup>۴</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به فرض یاتاقان با طول محدود<sup>۵</sup> در تحلیل معادلات حاکم بر مسأله، روش حل عددی اجزاء محدود<sup>۶</sup> بر پایه مدل گالرکین [۲۱] جهت استخراج مقادیر فشار در فیلم سیال روانکار بکار گرفته شده است. همچنین شرط مرزی رینولدز<sup>۷</sup> مطابق رابطه‌ی (۱۵) به منظور تعیین نقطه پیدایش پدیده کاویناسیون در یاتاقان ژورنال مدور با روش تکرار استفاده گردیده است.

$$P = 0 \quad \text{in} \quad x = 0 \quad (15\text{-الف})$$

$$P = 0 \quad \text{in} \quad z = 0, z = 1 \quad (15\text{-ب})$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} = P = 0 \quad \text{in} \quad \theta = \theta_{cav} \quad (15\text{-ج})$$

### ۵- پارامترهای عملکرد حالت پایای یاتاقان

با تعیین توزیع فشار حالت پایا در فیلم روانکار، پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان نظیر قابلیت حمل بار و عدد سامرفیلد بصورت ذیل قابل تعریف خواهند بود [۲۱].

$$\left[\frac{W_x}{W_y}\right] = \int_0^{+1} \int_0^{2\pi} P \left[\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\right] d\theta dz \quad (16)$$

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 عبارتست از:

$$W = \frac{\bar{C}^2}{\mu_{br}\bar{\omega}R^3L} \bar{W} = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (17)$$

همچنین مقدار عدد سامرفیلد، زاویه وضعی ژورنال در فضای لقی یاتاقان با توجه به موقعیت تعادل استاتیکی مرکز روتور، نیروی اصطکاک ایجاد شده در یاتاقان ناشی از تنش برشی فیلم روانکار با توجه به نواحی فیلم فشاری همگرا و واگرا و متغیر ضریب اصطکاک در فیلم روانکار یاتاقان ژورنال تحت تأثیر توزیع فشار ایجاد شده به علت بارگذاری از روابط ذیل قابل محاسبه خواهند بود [۲۱].

<sup>1</sup> Load Carrying Capacity

<sup>2</sup> Sommerfeld Number

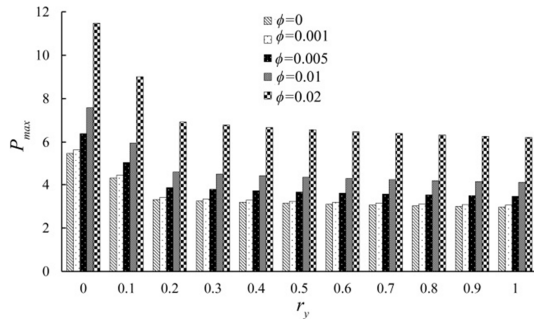
<sup>3</sup> Attitude Angle

<sup>4</sup> Force and Coefficient of Friction

<sup>5</sup> Finite Length Journal Bearings

<sup>6</sup> Finite Element Method (FEM)

<sup>7</sup> Reynolds Boundary Condition

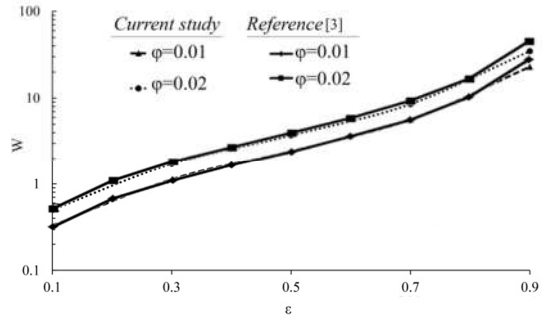


شکل ۶- اثر درصد حجمی نانو ذرات بر بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار بر حسب عمق مختلف بافت‌های سطحی

همچنین نتایج شکل ۶ نشان دهنده آن است که هم در سیال نیوتونی بعنوان روانکار و هم در سیال نانو با هر غلظتی بعنوان سیال روانکار، با ایجاد بافت‌های استوانه‌ای با عمق کم در پوسته، فشار بیشینه در فیلم سیال روانکار کاهش قابل توجهی خواهد داشت و با افزایش عمق بافت‌ها از یک محدوده خاص به بعد، روند کاهش فشار با افزایش عمق بی‌بعد بافت‌ها شکل تقریبی ثابتی به خود خواهد گرفت؛ در حالیکه روند افزایش فشار با تغییر در درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده به روغن در هر عمقی تغییرات قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت و این تغییرات با افزایش یا کاهش عمق بافت‌های سطحی، ثابت نخواهد شد.

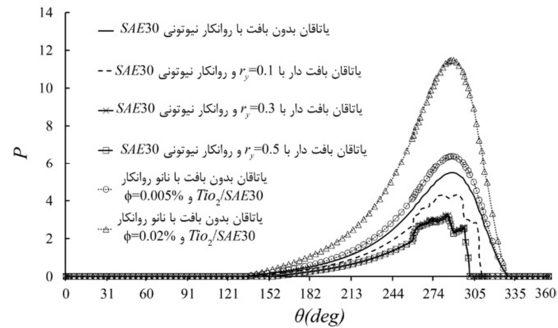
شکل ۷ کیفیت تغییرات میزان بار قابل حمل یاتاقان با تغییر در درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده به روغن موتور پایه روانکار در عمق‌های مختلف بافت‌های استوانه‌ای ایجاد شده در ناحیه پر فشار موجود در سطح داخلی پوسته یاتاقان را نشان می‌دهد. روند تغییرات بار قابل حمل در یاتاقان ژورنال مدور بافت‌دار بر حسب تغییر در درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده به سیال روانکار و تغییر در عمق بافت‌های استوانه‌ای ایجاد شده بر سطح داخلی پوسته یاتاقان همانند روند تغییر در بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار با تغییر در پارمترهای مورد بررسی می‌باشد. این موضوع را می‌توان به این مسئله نسبت داد که روند توزیع فشار در فیلم سیال روانکار در کل یاتاقان ژورنال همانند روند تغییرات فشار بیشینه در فیلم سیال و میزان بار قابل حمل در یاتاقان با تغییر در میزان درصد حجمی نانو ذرات به روغن پایه و تغییر در عمق بافت‌های استوانه‌ای بکار گرفته شده در سطح داخلی پوسته یاتاقان می‌باشد. نتایج ارائه شده در نمودارهای بار قابل حمل در یاتاقان با تغییر در عمق بافت‌ها و غلظت نانو ذرات نیز همانند نتایج ارائه شده در مورد بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار از کاهش قابل توجه میزان بار قابل حمل در یاتاقان با بکارگیری بافت‌هایی با عمق کم نسبت به یاتاقان مسطح و ثابت شدن تقریبی این پارامتر در یاتاقان با افزایش عمق بافت‌ها از یک محدوده خاص در هر درصد حجمی‌ای از نانو ذرات است. علاوه بر این نتایج ارائه شده بر این موضوع دلالت دارد که تغییر در میزان درصد حجمی نانو ذرات در روغن پایه در هر عمقی از بافت‌ها تأثیر خود را خواهد گذاشت و افزایش یا کاهش عمق بافت‌های سطحی روند تغییرات میزان بار قابل حمل با تغییر این پارمتر را تحت تأثیر قرار نخواهد داد.

رایانه‌ای تدوینی را تأیید می‌نماید. همچنین مقایسه نتایج برای قابلیت حمل بار در شرایط پایا برای یاتاقان ژورنال مدور بدون بافت با نانو روانکار  $TiO_2/SAE30$  از پژوهش حاضر و مرجع [۳] از دقت مناسب برنامه در محاسبه پارامترهای عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال مدور بدون بافت با روانکار نانو حکایت دارد.



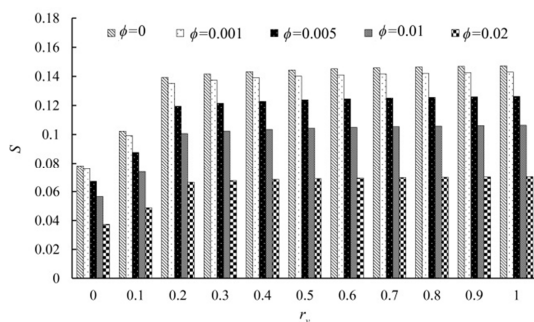
شکل ۴- میزان بار قابل در یاتاقان ژورنال مدور با نانو روانکار  $TiO_2/SAE30$

شکل ۵ چگونگی تأثیر بکارگیری نانوسیال و ایجاد بافت سطحی بر توزیع فشار محیطی یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی را برای شرایط مورد مطالعه حاضر نشان می‌دهد.



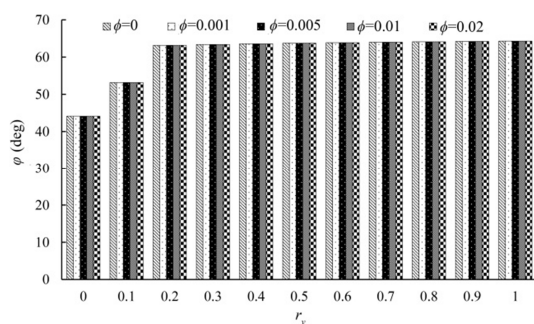
شکل ۵- تأثیر غلظت حجمی نانو روانکار و عمق بافت سطحی استوانه‌ای بر توزیع فشار محیطی یاتاقان ژورنال

همانگونه که از شکل فوق دیده می‌شود افزودن نانو ذرات و تأثیر مثبت آنها بر لزجت نسبی روانکار تقویت توزیع فشار را بدنبال دارد در حالیکه ایجاد بافت و افزایش عمق آن به علت افزایش ضخامت فیلم روانکار، نتیجه عکس را رقم خواهد زد. در ادامه، شکل ۶ تأثیر درصد حجمی نانو ذرات اضافه شده به سیال روانکار عمق‌های مختلف بافت‌های استوانه‌ای قرار گرفته در سطح داخلی پوسته یاتاقان بر بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار را نشان می‌دهد. نتایج شکل ۶ بیانگر افزایش بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار با افزایش درصد حجمی نانوذرات در روغن روانکار و کاهش بیشینه فشار در فیلم سیال با افزایش عمق بافت‌های سطحی در محدوده خاص بکار گرفته شده در سطح داخلی پوسته می‌باشد. افزایش فشار بیشینه با افزایش درصد حجمی نانو ذرات در روغن و کاهش این پارامتر با افزایش عمق بافت‌های استوانه‌ای را به ترتیب می‌توان به افزایش لزجت سیال با افزودن بیشتر نانو ذرات به روغن و افزایش ضخامت فیلم سیال با افزودن عمق بافت‌های استوانه‌ای نسبت داد.



شکل ۸- اثر درصد حجمی نانو ذرات بر عدد سامرفیلد در یاتاقان ژورنال مدور بر حسب عمق مختلف بافت‌های سطحی

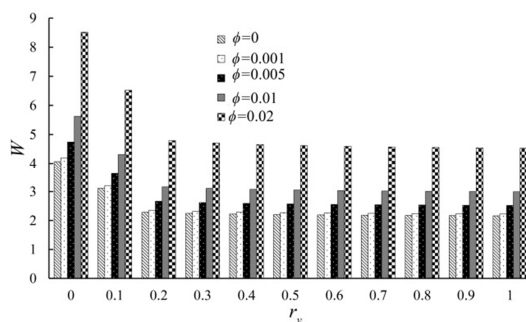
حجمی نانو ذرات در فضای روغن شده و با گذشت از یک حد معینی عمق بافت‌های سطحی، روند افزایش زاویه وضعی در فضای لقی یاتاقان متوقف می‌شود.



شکل ۹- اثر درصد حجمی نانو ذرات بر زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان ژورنال مدور بر حسب عمق مختلف بافت‌های سطحی

شکل ۱۰ میزان تغییرات در نیروی اصطکاک ایجاد شده در لایه‌های نانو روانکار بکار گرفته شده در روانکاری یاتاقان ژورنال مدور هیدرودینامیکی بافت‌دار با بافت‌های استوانه‌ای در عمق‌های مختلف بکار گرفته شده در ناحیه‌ای خاص از سطح داخلی پوسته یاتاقان را نشان می‌دهد. نتایج از افزایش قابل توجه نیروی اصطکاک مابین لایه‌های نانو روانکار بکار گرفته شده در یاتاقان با افزایش غلظت نانو ذرات در فضای روغن به سبب افزایش لزجت روانکار حکایت دارند. علاوه بر این، افزایش عمق بافت‌های سطحی در یاتاقان ژورنال مدور، نیروی اصطکاک مابین لایه‌های سیال روانکار را کاهش می‌دهد؛ که دلیل آن را می‌توان به افزایش ضخامت نانو روانکار در محل ایجاد بافت بر سطح داخلی پوسته یاتاقان نسبت داد.

تغییرات پارامتر ضریب اصطکاک در لایه‌های نانو سیال بکار گرفته شده در روانکاری یاتاقان ژورنال مدور بافت‌دار با تغییر در درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده به روغن در عمق‌های مختلف بافت‌های استوانه‌ای در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به رابطه ضریب اصطکاک با میزان بار قابل حمل در یاتاقان و نیروی اصطکاک تولیدی مابین لایه‌های سیال روانکار و همچنین اثر درصد حجمی نانو ذرات و عمق بافت‌های سطحی بر بار قابل حمل و نیروی اصطکاک می‌توان به این نتیجه رسید که تغییر درصد حجمی نانو ذرات در فضای روغن روانکار تأثیری بر ضریب اصطکاک نخواهد داشت.



شکل ۷- اثر درصد حجمی نانو ذرات بر میزان بار قابل حمل در یاتاقان ژورنال مدور بر حسب عمق مختلف بافت‌های سطحی

از نتایج حاصل شده از نمودارهای موجود در شکل های ۶ و ۷ این است که توزیع فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار و در پی آن فشار بیشینه ایجاد شده و بار قابل حمل در یاتاقان، با تبدیل نوع روانکار از نیوتونی به نانو روانکار و در روانکار نانو با افزایش درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده، افزایش می‌یابد که این موضوع را می‌توان به افزایش غلظت سیال روانکار با تبدیل آن از نیوتونی به نانو و همچنین افزایش درصد حجمی نانو ذرات در نانو روانکار مربوط دانست. علاوه بر این، کاهش توزیع فشار در فیلم سیال که کاهش بیشینه فشار و میزان بار قابل حمل در یاتاقان را به دنبال دارد، ناشی از تبدیل نوع یاتاقان با سطح صاف و صیقلی به یاتاقان بافت‌دار با بافت‌های استوانه‌ای و افزایش عمق بافت‌های استوانه‌ای در یاتاقان‌های بافت‌دار از دیگر نتایج این قسمت می‌باشد، که می‌توان این موضوع را به افزایش ضخامت فیلم سیال در محدوده ایجاد بافت در یاتاقان نسبت داد.

در شکل ۸ تغییرات عدد سامرفیلد با تغییر در درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده به روغن روانکار پایه در عمق مختلف بافت‌های استوانه‌ای نشان داده شده است. با توجه به رابطه ارائه شده در مورد عدد سامرفیلد و ارتباط آن با میزان بار قابل حمل در یاتاقان، روند تغییرات عدد سامرفیلد در یاتاقان با تغییر در عمق بافت‌های سطحی و تغییر در میزان درصد حجمی نانو ذرات در روغن روانکار، عکس تغییرات میزان بار قابل حمل در یاتاقان با تغییر در دو پارامتر مورد بررسی می‌باشد. یعنی افزایش درصد حجمی نانو ذرات در روغن روانکار، عدد سامرفیلد در یاتاقان را کاهش و افزایش عمق بافت‌های استوانه‌ای ایجاد شده در سطح پوسته، عدد سامرفیلد یاتاقان را افزایش خواهد داد.

شکل ۹ تغییرات زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان ژورنال مدور بافت‌دار با روانکار نانو در عمق‌های مختلف بافت‌های استوانه‌ای و درصد‌های حجمی متفاوت نانو ذرات را نشان می‌دهد. تغییرات زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان ژورنال مدور بافت‌دار با تغییر در درصد حجمی نانو ذرات تیتانیوم دی اکسید به روغن موتور SAE30 حاکی از عدم اثرگذاری قابل توجه نانو ذرات بر این مشخصه در هر عمقی از بافت‌های سطحی بکار گرفته شده می‌باشد. این در حالی است که ایجاد بافت با عمق کم تا یک حد مشخص بر سطح داخلی پوسته یاتاقان سبب افزایش زاویه وضعی یاتاقان به ازای هر مقداری از درصد



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 به ازای نسبت خروج از مرکزی معین به نحوی تعیین گردیده که جهت‌گیری بار برآیند قابل حمل توسط یاتاقان همانند آنچه اغلب در شرایط واقعی روی می‌دهد در راستای قائم باشد. از بررسی نتایج پژوهش حاضر موارد ذیل قابل استنباط می‌باشند:

۱- با تبدیل سیال روانکار از نوع نیوتونی به نانو و افزایش درصد حجمی نانو ذرات در نانو روانکار  $TiO_2/SAE30$ ، بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال و بار قابل حمل یاتاقان ژورنال در شرایط حضور بافت‌های سطحی و عدم آن، رشد چشم‌گیری خواهد داشت. این پدیده را می‌توان به افزایش لزجت نسبی روانکار با تبدیل آن از حالت نیوتونی اولیه به نانو و افزایش درصد حجمی نانو ذرات در نانو روانکار نهایی مورد استفاده نسبت داد.

۲- در یاتاقان‌های ژورنال مدور با روانکارهای نیوتونی و نانو سیال با هر غلظتی، تبدیل یاتاقان با سطح هموار به نوع بافت‌دار با بافت‌های استوانه‌ای واقع شده در محدوده بیشینه فشارهای همگرا، بیشینه فشار و بار قابل حمل در یاتاقان کاهش خواهد داشت که افزایش ضخامت فیلم سیال روانکار در ناحیه ایجاد بافت دلیل این رفتار می‌باشد.

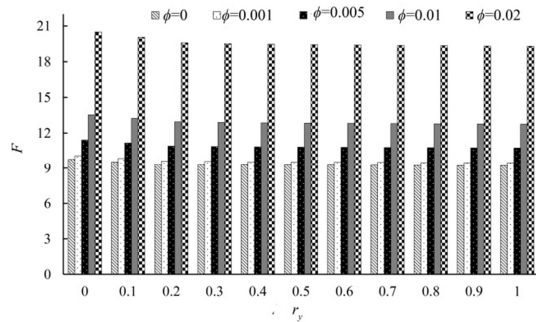
۳- بیشینه فشار و بار قابل حمل در یاتاقان‌های ژورنال مدور با تبدیل نوع مسطح به بافت‌دار با نانو روانکار برای بافت‌های سطحی با عمق کم، کاهش چشم‌گیری خواهد داشت؛ ولی با افزایش عمق بافت‌های سطحی روند کاهش این دو مشخصه کم رنگ خواهد شد. این در حالی است که در یاتاقان‌های ژورنال مدور بافت‌دار و مسطح در هر عمقی از بافت‌های سطحی ایجاد شده، افزایش غلظت نانو ذرات اضافه شده به روغن موتور پایه، افزایش قابل توجه پارامتر مورد اشاره را در پی دارد.

۴- زاویه وضعی روتور در فضای لقی یاتاقان ژورنال مدور مسطح و بافت‌دار تحت تاثیر کمتری از نوع روانکار نیوتونی و نانو و درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده به روغن قرار خواهد گرفت اما تبدیل نوع یاتاقان از مسطح به بافت‌دار سبب افزایش قابل توجه این مشخصه در یاتاقان ژورنال مدور با روانکارهای نیوتونی و نانو خواهد شد. این افزایش در بافت‌های کم عمق کاملاً محسوس بوده ولی با افزایش عمق بافت‌های استوانه‌ای میزان این افزایش تضعیف می‌شود.

۵- افزایش درصد حجمی نانو ذرات افزوده شده به روغن پایه تا رسیدن به مقدار معین، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیروی اصطکاک یاتاقان داشته و سبب افزایش آن می‌شود. ولی تبدیل یاتاقان ژورنال مدور هیدرودینامیکی از حالت مسطح به بافت‌دار با بافت‌های استوانه‌ای سبب کاهش این مشخصه شده و افزایش عمق بافت‌ها، شدت این روند کاهش را تضعیف می‌کند.

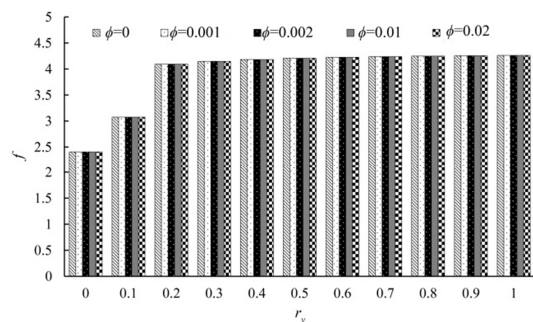
#### ۸- نمادها

$O_I$	مرکز روتور
$O_B$	مرکز یاتاقان
$O_C$	مرکز بافت
$\bar{\omega}$	سرعت زاویه‌ای روتور (rad/s)



شکل ۱۰- اثر درصد حجمی نانو ذرات بر نیروی اصطکاک یاتاقان ژورنال مدور بر حسب عمق مختلف بافت‌های سطحی

همچنین نتایج گویای افزایش مشخصه ضریب اصطکاک در یاتاقان ژورنال با افزایش در عمق بافت‌های سطحی تا یک حد معین و ثابت شدن تغییرات این مشخصه با افزایش عمق بافت‌ها با گذشتن از این مرز می‌باشد.



شکل ۱۱- اثر درصد حجمی نانو ذرات بر ضریب اصطکاک یاتاقان ژورنال مدور بر حسب عمق مختلف بافت‌های سطحی

#### ۷- نتیجه‌گیری

در کار حاضر تاثیر حضور بافت‌های استوانه‌ای شکل با عمق‌های متفاوت و تراکم ثابت در بخشی از سطح داخلی پوسته یاتاقان توأم با میزان غلظت نانو ذرات تیتانیوم دی اکسید افزوده شده به روغن نیوتونی پایه SAE30 به منظور تبدیل روانکار نیوتونی SAE30 به نانو روانکار  $TiO_2/SAE30$  مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای عملکرد حالت پایدار سیستم روتور- یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی مدور با طول محدود شامل بیشینه فشار ایجاد شده در فیلم سیال روانکار، بار قابل حمل و عدد سامرفیلد یاتاقان، زاویه وضعی جهت‌گیری روتور در فضای لقی یاتاقان و نیرو و ضریب اصطکاک ایجاد شده در لایه‌های فیلم سیال روانکار می‌باشند. به این منظور معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقان‌های ژورنال با نانو سیال تراکم‌ناپذیر، با توجه به فرض طول محدود (یاتاقان دو بُعدی) منجر به عدم امکان دستیابی به پاسخ تحلیلی مسأله و نیز لحاظ تغییرات ضخامت فیلم روانکار متناسب با عمق بافت‌های سطحی ایجاد شده در پوسته و تغییر لزجت نسبی سیال روانکار با تغییر در درصد حجمی نانو ذرات تیتانیوم دی اکسید افزوده شده به روغن موتور SAE30 به عنوان روانکار پایه سیستم دوار، به کمک روش حل عددی اجزاء محدود بر پایه روش گالرکین حل گردیده است. همچنین از شرط مرزی رینولدز جهت تفکیک نواحی فیلم

- distribution. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 168, pp. 344-353, 2005.
- [7] Ausas R., Ragot P., Leiva J., Jai M., Bayada G., Buscaglia G. C., The impact of the cavitation model in the analysis of micro textured lubricated journal bearings. *Journal of Tribology*, Vol. 129, pp. 868-875, 2007.
- [8] Kango S., Sharma R. K., 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*, Vol. 4, pp. 505-524, 2010.
- [9] Dadouche A., Conlon M. J., Dmochowski W., Koszela W., Galda L., Pawlus P., Effect of surface texturing on the steady-state properties and dynamic coefficients of a plain journal bearing: experimental study. *ASME Proceedings*, Vol. 6, pp. 695-704, 2011.
- [10] Wang S., Wu X., Zheng J., Influence of surface texture on lubrication performance of hydrodynamic journal bearing. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 120, pp. 426-431, 2012.
- [11] Rao T. V. V. L. N., Rani A. M. A., Nagarajan T., Hashim F. M., Partially textured slider and journal bearing analysis. *Jurnal Teknologi*, Vol. 58, pp. 77-84, 2012.
- [12] Ganji T. S. R., Kakoty S. K., Analysis on micro-elliptical textured journal bearings. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2014.
- [13] Meng F. M., Zhang L., Liu Y., Li T.T., Effect of compound dimple on tribological performances of journal bearing. *Tribology International*, Vol. 91, pp. 99-110, 2015.
- [14] Hamdavi S., Ya H. H., Rao T. V. V. L. N., Effect of surface texturing on hydrodynamic performance of journal bearing. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.11, No.1, 2016.
- [15] Sharma K., Investigation on the influence of spherical textures on the performance characteristics of porous journal bearing. *International Journal of Applied Engineering and Technology*, Vol.6, pp.97-106, 2016.
- [16] Biouki M. A. H., Rahmatabadi A. D., Mehrjardi M. Z., The effect of shell texturing on the performance of noncircular hydrodynamic two lobe journal bearings. *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 293-304, 2018 (in Persian).
- [17] Lin Q., Bao Q., Li K., Khonsari M. M., Zhao H., An investigation into the transient behavior of journal bearing with surface texture based on fluid-structure interaction approach. *Tribol. Int.*, Vol. 118, pp. 246-255, 2018.
- [18] Cupillard S., Thermo hydrodynamics of sliding contacts with textured surfaces. *Luleå university of technology*, 2009.
- [19] Rahmatabadi A. D., Mehrjardi M. Z., Fazel M. R., Performance analysis of micropolar lubricated journal bearings using GDQ method. *Tribol. Int.*, Vol. 43, No. 11, pp. 2000-2009, 2010.
- [20] Tala-Ighil N., Fillon M., Maspeyrot P., Effect of textured area on the performances of a hydrodynamic journal bearing. *Tribol. Int.*, Vol. 44, pp. 211-219, 2011.
- [21] Mehrjardi M. Z., Rahmatabadi A. D., Meybodi R. R., A study on the stability performance of noncircular lobed journal bearings with micropolar lubricant. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 230, No. 1, pp. 14-30, 2016.
- |   |                     |  |
|---|---------------------|--|
| لقی متداول (m)  | $\bar{C}$           |  |
| مختصات مرکز روتور   | $X_j, Y_j$          |  |
| فشار سیال (Pa)  | $\bar{P}$           |  |
| قطر یاتاقان (m)   | $\bar{D}$           |  |
| طول یاتاقان (m)   | $\bar{L}$           |  |
| راستای دوران و طولی یاتاقان (m)                           | $\bar{x}, \bar{z}$  |  |
| ضخامت فیلم روانکار (m)                                    | $\bar{h}$           |  |
| بار استاتیکی وارد بر ژورنال در راستای محورهای مختصات      | $W_x, W_y$          |  |
| بار بی‌بعد قابل حمل یاتاقان در شرایط پایدار               | $W$                 |  |
| عدد سامرفیلد  | $S$                 |  |
| نیروی اصطکاک  | $F$                 |  |
| ضریب اصطکاک   | $f$                 |  |
| شعاع و عمق بافت‌های استوانه‌ای در راستای محوره‌های مختصات | $r_x, r_y, r_z$     |  |
| جهت محوره‌های مختصات                                      | $x, y, z$           |  |
| مختصات محلی بافت  | $x_c, y_c, z_c$     |  |
|   | <b>علائم یونانی</b> |  |
| لزجت نسبی نانو سیال                                       | $\mu_{rel}$         |  |
| لزجت روغن پایه روانکار                                    | $\mu_{bf}$          |  |
| لزجت نانو روانکار   | $\mu_{nf}$          |  |
| زاویه سنجش از محور X                                      | $\theta$            |  |
| زاویه سنجش از محور از خط‌المرکزین روتور و یاتاقان         | $\theta'$           |  |
| زاویه وضعی روتور  | $\varphi$           |  |
- ۹- مراجع**
- [1] Shenoy B. S., Binu K. G., Pai R., Rao D. S., Pai R. S., Effect of nanoparticles additives on the performance of an externally adjustable fluid film bearing. *Tribol. Int.*, Vol. 45, pp. 38-42, 2012.
- [2] Babu K. S., Nair K. P., Rajendrakumar P. K., Computational analysis of journal bearing operating under lubricant containing  $Al_2O_3$  and ZnO nano particles. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 6, No.1, pp. 34-42, 2014.
- [3] Binu K. G., Shenoy B. S., Rao D. S., Pai R., 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.*, Vol. 75, pp. 69-79, 2014.
- [4] Babu S. K., Nair P. K., Rajendrakumar P. K., Static characteristics of thermo hydrodynamic journal bearing operating under lubricants containing nanoparticles. *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 67, No.1, pp. 38-46, 2015.
- [5] Yathish K., Binu K. G., Static characteristics of two-axial groove journal bearing operating on  $TiO_2$  nano lubricant using a temperature dependent viscosity model. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, Vol. 7, No.5, pp. 150-154, 2017.
- [6] Sinanoglu C., Nair F., Karamis M. B., Effects of shaft surface texture on journal bearing pressure