



# Analysis of Static Performance of Noncircular Lobed Journal Bearings with Lubricants Containing TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Using Couple Stress Fluid Model

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Maleki Varnoosfaderani M.<sup>1</sup> MSc,  
Dashti Rahmatabadi A.\*<sup>1</sup> PhD,  
Dehghan A.A.<sup>1</sup> PhD,

### How to cite this article

Maleki Varnoosfaderani M, Dashti Rahmatabadi A, Dehghan A.A. Analysis of Static Performance of Non-circular Lobed Journal Bearings with Lubricants Containing TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Using Couple Stress Fluid Model. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(1):151-157.

## ABSTRACT

In recent years, due to the increase in the speed of rotary machineries, demands for enhanced lubrication and bearing design to overcome this challenge has increased. To satisfy these need, researchers have proposed additive contained lubricants such as Nano-lubricants and bearings with different designs such as noncircular lobed bearings. In this article, effects of preload and aspect ratio on static performance of noncircular lobed journal bearings of finite length lubricated with lubricant containing TiO<sub>2</sub> Nano-particles for particle volume fraction of 0.01 are studied. Using finite element method, the steady-state film pressure is obtained by solving the modified Reynolds equation based on the Nano-lubricants and Couple Stress model theories. With the help of film pressure, attitude angle, friction coefficient, friction force, and side leakage of noncircular lobed journal bearings are obtained. The results show that using lubricants containing TiO<sub>2</sub> Nano-particles can enhance the performance of static characteristics of two, three, and four lobed journal bearings. According to results, increase in preload and bearing length will increase load carrying capacity noncircular lobed bearings. Based on results, choosing proper design parameters can have great impact on static performance of noncircular lobed journal bearings.

**Keywords** Noncircular Bearing; Nano-Lubricant; Static Performance; TiO<sub>2</sub> Nano-Particles; Couple Stress Model

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

### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.  
Postal Code: -  
Phone: +98 (35) 31232489  
Fax: +98 (35) 38212781  
dashti@yazd.ac.ir

### Article History

Received: May 26, 2018  
Accepted: October 03, 2018  
ePublished: January 01, 2019

## CITATION LINKS

[1] Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [2] Theories of fluids with microstructure: An introduction [3] Couple stresses in journal bearing lubricants and the effect of cavitation [4] A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants [5] Preparation and investigation of nano-AlN lubricant with high performance [6] A variable viscosity approach for the evaluation of load carrying capacity of oil lubricated journal bearing with TiO<sub>2</sub> nanoparticles as lubricant additives [7] Static characteristics of a fluid film bearing with TiO<sub>2</sub> based nanolubricant using the modified Krieger-Dougherty viscosity model and couple stress model [8] Computational analysis of journal bearing operating under lubricants containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnO nanoparticles [9] Copper oxide nanoparticles as friction-reduction and anti-wear additives in lubricating oil [10] Rheological behavior of nanofluids [11] A theoretical analysis of dynamic characteristic of finite hydrodynamic journal bearings lubricated with coupled stress fluids [12] The static and dynamic characteristics of a two-lobe journal bearing lubricated with couple stress fluid

## بررسی عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور لبدار تحت روانکار شامل نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید با استفاده از مدل سیال تنش کوپل

مهدی مالکی ورنوسفادراتی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

اصغر دشتی رحمت‌آبادی\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

علی اکبر دهقان PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش سرعت ماشین‌آلات چرخشی نیاز به روانکارها و یاتاقان‌های بهبودیافته برای پاسخ به این چالش افزایش یافته است. در راستای رفع این نیاز محققان روانکارهای حاوی مواد افزودنی از جمله نانوروانکارها و یاتاقان‌هایی با طرح‌های جدید از جمله یاتاقان‌های غیرمدور لبدار را پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله، اثر پیش‌بار و نسبت طول به قطر بر عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور با طول محدود روانکاری شده با روانکار حاوی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم در کسر حجمی نانوذرات ۰/۱ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور با در نظر گرفتن مدل سیال تنش کوپل برای نانوروانکارها، معادله رینولدز اصلاح شده به وسیله روش اجزا محدود حل و فشار ایجاد شده در لایه روانکار محاسبه می‌شود. با کمک فشار فیلم به دست آمده زاویه مشخصه، ظرفیت تحمل بار، نیروی اصطکاک، ضریب اصطکاک و نشی جانبی برای یاتاقان‌های دو، سه و چهار لب محاسبه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که روانکارهای حاوی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم می‌توانند مشخصه‌های عملکرد استاتیکی یاتاقان‌های ژورنال لبدار را بهبود بخشند. با توجه به نتایج افزایش پیش‌بار و نسبت طول به قطر باعث افزایش ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های لبدار می‌شود. همچنین از نتایج دیده می‌شود که انتخاب مقادیر مناسبی از پارامترها می‌تواند نقش بسزایی بر عملکرد این یاتاقان‌ها داشته باشد.

**کلیدواژه‌ها:** یاتاقان‌های غیرمدور، نانوروانکار، عملکرد استاتیکی، نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم، مدل تنش کوپل

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۱

\*نویسنده مسئول: dashti@yazd.ac.ir

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به واسطه گسترش ماشین‌آلات مدرن، شاهد موج روزافزون استفاده از سیالات غیرنیوتنی به عنوان روانکار هستیم. از آنجایی که تنش برشی در روانکار غیرنیوتنی همواره متناسب با نرخ کرنش برشی به خصوص در نرخ‌های برش بالا باقی نمی‌ماند، از این رو فرمولاسیون‌های مختلفی برای مدل کردن این دسته از سیالات با توجه به گستره وسیع آنها ارائه شده است.

علم نانو از زمان پیدایش، گسترش روزافزونی داشته است. نانومواد با توجه به خواص خود مورد توجه دانشمندان حوزه‌های مختلف قرار گرفته است. از نانوذرات برای بهبود خواص بسیاری از سیالات حامل از جمله خنک‌کارها و روانکارها استفاده شده است. این ذرات به دلیل ابعاد بسیار کوچک خود قابلیت دستیابی به نقاط بسیار ریز سطح فلز را دارند و در نتیجه باعث بهبود خواص روانکاری روانکار سطوح در تماس می‌شوند.

نانوسیالات که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی هستند. اندازه ذرات مورد استفاده در نانوسیالات از یک تا ۱۰۰ نانومتر است. این ذرات از جنس اکسیدهای فلزی، سولفیدها، ترکیبات بر پایه کربن، نانوالماس‌ها و دیگر ترکیبات

هستند.

محققان به علت اشکالات موجود در استفاده از سیالات سنتی و حتی میکروسیال‌ها از جمله رسوب یا ته‌نشینی ذرات، ساییدگی، مسدود کردن لوله‌ها و افزایش افت فشار در مجرای سیال، به نانوسیالات روی آورده‌اند. ایده نانوسیال توسط چوی و ایستمن در سال ۱۹۹۵ مطرح شد و انقلاب بزرگی در زمینه انتقال حرارت در سیالات پدید آمد<sup>[1]</sup>. در واقع نگاه تازه‌ای به سوسپانسیون سیال-جامد با ذراتی در ابعاد نانو مطرح شد. همچنین به علت کوچک بودن ذرات در مقایسه با میکروسیال‌ها به مقدار زیادی خوردگی، ناخالصی و مشکلات افت فشار، کاهش پیدا کرد و پایداری سیالات در مقابل رسوب‌گذاری بهبود چشمگیری یافت.

جریان سیالات شامل میکروساختارها می‌تواند تأثیرات فراوانی را که در سیالات غیرقطبی استوکسی کلاسیک وجود ندارد، به نمایش بگذارد. علاوه بر مفهوم عمومی مکانیک سیالات غیرقطبی، دو مفهوم فیزیکی اصلی وجود دارد که منجر به به وجود آمدن تئوری سیالات با میکروساختارها شامل تنش کوپل و مفهوم چرخش داخلی شده است. تنش کوپل نتیجه در نظر گرفتن آن بوده که کار مکانیکی یک عضو از پیکر بر عضو دیگر در یک سطح، برابر با توزیع نیرو و گشتاور است.

در مکانیک غیرقطبی کلاسیک، توزیع گشتاور در نظر گرفته نمی‌شود و کار مکانیکی فقط برابر با توزیع نیرو در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه قوانین حرکت را برای تعریف کردن تانسور درجه دومی که الزاماً متقارن می‌شود، می‌توان به کار برد. بدین ترتیب در مکانیک غیرقطبی، حالت تنش در یک نقطه به وسیله یک تانسور درجه دومی متقارن تعریف می‌شود که یک تابع نقطه‌ای شامل ۶ جزء مستقل است. در حالی که در مکانیک قطبی، کار مکانیکی برابر با توزیع نیرو و گشتاور در نظر گرفته و سپس حالت تنش به وسیله یک تانسور تنش و یک تانسور تنش کوپل اندازه‌گیری می‌شود. به طور کلی، هیچ کدام از این تانسورهای درجه دو متقارن نیستند، بنابراین حالت تنش در یک نقطه به وسیله ۱۸ جزء مستقل اندازه‌گیری می‌شود<sup>[2]</sup>.

تنش‌های کوپل ممکن است در موارد روانکارهای شامل مواد افزودنی یا روانکارهای با زنجیره مولکولی بلند مورد توجه قرار گیرند. همچنین تنش کوپل در مسایل روانکاری که معمولاً فیلم سیال نازک بوده و ممکن است تأثیر بسزایی بر عملکرد یاتاقان داشته باشد، مورد توجه است<sup>[3]</sup>.

لی و همکاران در سال ۲۰۰۹ خواص روانکاری نانوروانکارهای گرافیتی را گزارش کردند<sup>[4]</sup>. گزارشات آنها حاکی از آن است که سطوح پوشش داده شده با روانکار شامل نانوذرات گرافیت، ضریب اصطکاک کمتر و سایب کمتری در مقایسه با سطوح روانکاری شده با روانکار معمولی دارند. تهیه و بررسی روانکار شامل نانوذرات آلومینیم‌نیتريد توسط تائو و همکاران در سال ۲۰۱۴ از دیگر تحقیقات گزارش شده است<sup>[5]</sup>. بررسی ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های ژورنال با روانکار روغنی شامل نانوذرات تیتانیوم‌اکسید به روش لزجت متغیر توسط بینو و همکاران در سال ۲۰۱۴ گزارش شده است<sup>[6]</sup>. تحقیقات آنها افزایش ظرفیت تحمل بار در یاتاقان‌های ژورنال روانکاری شده با روانکار شامل نانوذرات تیتانیوم‌اکسید را نشان می‌دهد. بررسی خواص استاتیکی یاتاقان با روانکار شامل نانوذرات تیتانیوم‌اکسید با استفاده از مدل لزجت تعمیم‌یافته کریگر-دورتی و مدل کوپل تنش توسط بینو و همکاران در سال ۲۰۱۴ انجام شده است<sup>[7]</sup>. مطالعات آنها نشان می‌دهد که نانوذرات تیتانیوم‌اکسید تأثیر بسزایی در بهبود ظرفیت تحمل بار روانکارها

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (1)$$

$\phi_m$  بیشینه کسر تراکم ذره بوده که در برش‌های بالا حداکثر ۰/۶۰۵ است و  $[\eta]$  لزجت ذاتی بوده و معمولاً برای سوسپانسیون‌های تک‌ذره با ذرات کروی سخت برابر ۲/۵ است [7].

این معادله بعدها توسط چین و همکاران اصلاح شد [10] تا کسر تراکم درون ساختار توده ذره در نظر گرفته شود. بنابراین معادله اصلاح شده کریگر- دورتی به صورت روابط ۲ و ۳ ارایه شده است:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi_a}{\phi_m}\right)^{-2.5\phi_m} \quad (2)$$

$$\phi_a = \phi_n \left(\frac{a_a}{a}\right)^{3-D} \quad (3)$$

که  $a$  و  $a_a$  به ترتیب شعاع توده و شعاع اولیه ذره است.  $D$  شاخص فراکتال بوده که به صورت معمول برای نانوذرات برابر ۱/۸ است.  $\phi_n$  نیز کسر حجمی نانوذرات است. با جای‌گذاری معادله ۳ در معادله ۲ و جای‌گذاری مقادیر، معادله به صورت زیر به دست می‌آید [7].

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \left(1 - \frac{\phi_n}{0.605} \left(\frac{a_a}{a}\right)^{1.2}\right)^{-1.51} \quad (4)$$

با توجه به آزمایشات یک مرجع [7]، مقدار  $a_a/a$  برابر ۷/۷۷ است.

## ۲-۲- معادلات حاکم

شکل ۱ هندسه یاتاقان‌های غیرمدور دلب، سلب و چهارلب را نشان می‌دهد.  $O-X$  و  $O-Y$  محور مختصات دکارتی ثابت هستند که مبدأ آن از مرکز هندسه یاتاقان می‌گذرد.  $O$  اشاره به موقعیت مرکز محور در حالت پایدار دارد.  $W_0$  بار روی یاتاقان و  $\omega_0$  سرعت زاویه‌ای یکنواخت چرخش محور است.

معادله دیفرانسیل حاکم بر گستره فشار در روانکاری فیلم سیال، معادله رینولدز است. این معادله در حالت کلی از ترکیب معادلات بقای مومنوم خطی و زاویه‌ای و معادله پیوستگی سیال روانکار به دست می‌آید. معادله رینولدز اصلاح شده به صورت زیر است [7, 11]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ f(h, l) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ f(h, l) \frac{\partial p}{\partial z} \right] = 6\mu_{nf} U \frac{\partial h}{\partial x} + 12\mu_{nf} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

که در آن:

$$f(h, l) = h^3 - 12l^2 \left[ h - 2l \tanh \frac{h}{2l} \right] \quad (6)$$

$$l = \left(\frac{\eta}{\mu}\right)^{1/2} \quad (7)$$

$$\bar{l} = \frac{l}{C} \quad (8)$$

با در نظر گرفتن حل استاتیک برای مساله، معادله رینولدز اصلاح شده بی‌بعد به صورت زیر حاصل می‌شود [7, 11]:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[ f(\bar{h}, \bar{l}) \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right] + \left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} \left[ f(\bar{h}, \bar{l}) \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right] = 6\bar{\mu} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} \quad (9)$$

$$f(\bar{h}, \bar{l}) = \bar{h}^3 - 12\bar{l}^2 \left[ \bar{h} - 2\bar{l} \tanh \left(\frac{\bar{h}}{2\bar{l}}\right) \right] \quad (10)$$

که  $\bar{\mu}$  لزجت نسبی سیال است که به وسیله مدل کریگر- دورتی به

دارد. بابو و همکاران در سال ۲۰۱۴ تحلیل یاتاقان ژورنال با روانکار شامل نانوذرات اکسید آلومینیم و اکسید روی را گزارش نموده‌اند [8]. نتایج بررسی آنها نشان می‌دهد که افزایش مقدار نانوذرات، لزجت روانکار را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث تغییر در مشخصه‌های عملکردی یاتاقان ژورنال می‌شود. تاثیر نانوذرات اکسید مس به عنوان افزودنی کاهش‌دهنده اصطکاک و ساییدگی در روغن‌های روانکاری توسط جاتی و سینگ در سال ۲۰۱۵ مورد بررسی قرار گرفته است [9]. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که نانوذرات به طور کاملاً موثر خواص روانکاری روغن‌های موتور را افزایش می‌دهند. نانوذرات، اصطکاک لغزشی را به اصطکاک چرخشی، تغییر و در نتیجه ضریب اصطکاک موثر را کاهش می‌دهند.

با مروری بر کارهای گزارش شده قبلی مشاهده می‌شود که مطالعه‌ای در زمینه روانکاری یاتاقان‌های ژورنال لب‌دار با روانکار نانو صورت پذیرفته، حال آن که تحقیقاتی در زمینه مدل تنش کوپل بدون در نظر گرفتن نانو روانکار انجام پذیرفته است، لذا در کار حاضر تاثیر این نوع روانکارها بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال لب‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نوع روانکار استفاده شده در این پژوهش، روغن موتور استاندارد SAE30 حاوی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم به عنوان ماده افزودنی است. فرضیات در نظر گرفته شده در این مقاله بر این اساس استوار است که محور، پوسته و تکیه‌گاه‌های یاتاقان صلب هستند. محور طولی یاتاقان همواره با محور چرخان حین چرخش به صورت موازی قرار می‌گیرد، از تاثیرات دمای روانکار بر عملکرد یاتاقان صرف نظر می‌شود و جریان سیال روانکار، آرام و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود.

## ۲- یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور لب‌دار

امروزه یاتاقان‌های ژورنال به دلیل اصطکاک کم، مشخصه‌های ضربه‌گیری مناسب، کارکرد خوب در سرعت‌های بالا و طراحی و مونتاژ نسبتاً آسان و کم‌هزینه به طور گسترده در ماشین‌های دوار مورد استفاده قرار می‌گیرند. یاتاقان ژورنال می‌تواند یک آستر سیلندری ساده (بوش) پیچیده شده حول ژورنال (محور) باشد. تقاضا برای به کارگیری یاتاقان‌های ژورنال در سرعت‌های بالا و مسایل ارتعاشی به خاطر سرعت‌های بحرانی، نیاز به اشکال هندسی دیگری غیر از یاتاقان‌های ژورنال ساده مدور را به وجود آورده است.

این هندسه‌ها الگوهای متفاوتی از متغیر لقی را ایجاد می‌کنند. یاتاقان‌های دلب (بیضوی)، سلب و چهارلب که به ترتیب از دو، سه و چهار کمان دایره‌ای یکسان تشکیل می‌شوند، از معمول‌ترین یاتاقان‌های غیرمدور است. در این یاتاقان‌ها هر کفشک به سمت مرکز یاتاقان به اندازه کسری از لقی کفشک حرکت داده می‌شود تا ضخامت فیلم سیال را از آن چه در یک یاتاقان ژورنال ساده اتفاق می‌افتد، بیشتر همگرا و واگرا کند. در حالی که در یاتاقان‌های مدور تنها اثر ابعاد روی عملکرد یاتاقان نقش دارد، ولی در یاتاقان‌های غیرمدور، پارامترهای هندسی دیگری نیز وجود دارد که می‌تواند روی عملکرد سیستم تاثیرگذار باشد. از جمله این پارامترها می‌توان به تعداد لب‌ها و شدت غیرمدوربودن لب‌های یاتاقان (پریلود) اشاره نمود.

## ۲-۱- معادله کریگر- دورتی

معادله کریگر- دورتی برای لزجت برشی سیالات شامل ذرات پراکنده در سال ۱۹۵۹ ارایه شد که شامل محدوده وسیعی از کسر حجمی ذرات می‌شد. این معادله به صورت زیر است [7]:

دست می‌آید. با در نظر گرفتن شرایط مرزی برای یاتاقان غیرمدور به شکل زیر:

$$\bar{p}(\theta_1^i, \bar{z}) = 0 \quad (11)$$

$$\bar{p}(\theta, \pm \lambda) = 0 \quad (12)$$

$$\bar{p}(\theta_2^i, \bar{z}) = \frac{d\bar{p}}{d\theta}(\theta_2^i, \bar{z}) = 0 \quad (13)$$

می‌توان مقادیر فشار در فیلم سیال را به دست آورد.

### ۳-۲- مشخصه‌های استاتیک در حالت پایدار

با حل معادله ۹، میدان فشار در حالت پایدار به دست می‌آید و از این طریق می‌توان مشخصه‌های استاتیک یاتاقان‌های روانکاری شده با روانکار نانو با در نظر گرفتن مدل تنش کوپل را محاسبه کرد. مهم‌ترین مشخصه‌های استاتیک یاتاقان‌ها عبارت از ظرفیت تحمل بار یاتاقان ( $W$ )، زاویه مشخصه ( $\phi_0$ )، نیروی اصطکاک ( $F$ ) و نرخ جریان نشتی انتهایی ( $Q$ ) است. مولفه‌های نیروی سیال روی محور را می‌توان به صورت

$$\begin{bmatrix} \bar{W}_x \\ \bar{W}_y \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^L \begin{bmatrix} \bar{W}_x^i \\ \bar{W}_y^i \end{bmatrix} = - \sum_{i=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^i}^{\theta_2^i} \bar{P}_i \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} d\theta d\bar{z} \quad (14)$$

بیان کرد.

بنابراین ظرفیت تحمل بار کلی یاتاقان به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{W} = (\bar{W}_x^2 + \bar{W}_y^2)^{1/2} \quad (15)$$

زاویه مشخصه به زاویه‌ای اطلاق می‌شود که خط‌المركزین و بردار بار اعمال شده روی یاتاقان را می‌سازند و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_j}{Y_j}\right) = \arctan\left(\frac{\bar{W}_x}{\bar{W}_y}\right) \quad (16)$$

نیروی اصطکاک برای هر لب یاتاقان با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^i}^{\theta_2^i} \left[ \bar{\mu} + \frac{\bar{h}}{2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} - \bar{l} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \tanh\left(\frac{\bar{h}}{2\bar{l}}\right) \right] d\theta d\bar{z} \quad (17)$$

ضریب اصطکاک از تقسیم نیروی اصطکاک بر ظرفیت تحمل بار یاتاقان به دست می‌آید.

$$f\left(\frac{R}{C}\right) = \frac{\bar{F}}{\bar{W}} \quad (18)$$

نهایتاً نشتی انتهایی یاتاقان ژورنال غیرمدور تحت روانکار نانو با مدل تنش کوپل از رابطه زیر به دست می‌آید [7]:

$$\bar{Q} = \sum_{i=1}^L \int_{\theta_1^i}^{\theta_2^i} \left. \frac{\bar{f}(\bar{h}, \bar{l})}{6\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right|_{\bar{z}=\pm\lambda} d\theta \quad (19)$$

### ۳- بررسی نتایج

در مقاله حاضر پس از حل معادلات حاکم بر مساله، تاثیر دو پارامتر پیش‌بار و نسبت طول به قطر بر مشخصه‌های عملکردی یاتاقان‌های غیرمدور لبدار گزارش می‌شود. به منظور بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری تهیه شده، ابتدا برای مدل سیال تنش کوپل با  $\bar{l}=0.4$  و هندسه یاتاقان دولب با  $\delta=0.5$ ، مقادیر زاویه حالت در مقادیر مختلف نسبت خروج از مرکزی با یک مرجع [12] مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج در جدول ۱ آورده و همچنین توزیع فشار برای یاتاقان دولب در نسبت خروج از مرکزی  $0.4$  و

### ۳-۱- اثر پیش‌بار بر مشخصه‌های عملکردی یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور لبدار

در بررسی اثر پیش‌بار، نسبت طول به قطر، یک و پیش‌بار برابر با  $0.4$  و  $0.6$  در نظر گرفته شده و اثر این پارامتر بر مشخصه‌های عملکرد استاتیک یاتاقان‌های غیرمدور لبدار در مقادیر مختلف نسبت خروج از مرکزی مورد مطالعه قرار گرفته است.

نمودارهای ۵-۲، اثر پیش‌بار بر مشخصه‌های عملکرد استاتیک یاتاقان‌های لبدار را نشان می‌دهند. در یک نوع یاتاقان خاص با توجه به این که افزایش پیش‌بار باعث نزدیک شدن یاتاقان به هندسه یاتاقان دوار می‌شود، شاهد هستیم که ظرفیت تحمل بار افزایش و همچنین نشتی جانبی و ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد لب‌ها نیز هندسه یاتاقان لبدار به هندسه دوار نزدیک می‌شود که این امر نیز باعث افزایش ظرفیت تحمل بار و کاهش نشتی جانبی و ضریب اصطکاک می‌شود.

افزایش تعداد لب در یک پیش‌بار ثابت باعث کاهش زاویه حالت می‌شود. همچنین افزایش نسبت خروج از مرکزی زاویه حالت را کاهش می‌دهد. با افزایش پیش‌بار برای یک نوع یاتاقان خاص، زاویه حالت افزایش می‌یابد، ولی با افزایش مقادیر نسبت خروج از مرکزی در یاتاقان‌های دولب و سلب این روند در یک نسبت خروج از مرکزی خاص تغییر می‌کند که علت آن تاثیر همزمان دو متغیر نسبت خروج از مرکزی و پیش‌بار است. زیرا پیش‌بار باعث افزایش زاویه حالت و نسبت خروج از مرکزی باعث کاهش زاویه حالت می‌شود.

### ۳-۲- اثر نسبت طول به قطر بر مشخصه‌های عملکرد استاتیک یاتاقان‌های غیرمدور لبدار

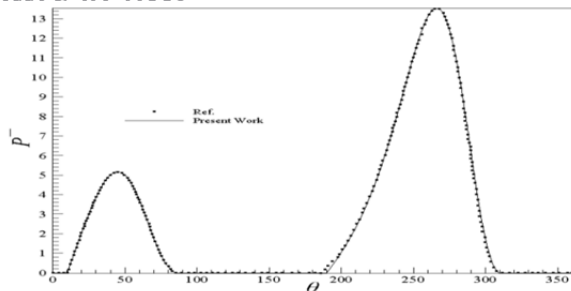
در این بخش، با در نظر گرفتن  $\varepsilon=0.5$  و  $\delta=0.5$  در مقادیر نسبت طول به قطر ۱،  $1.5$ ، و  $2$ ، مشخصه‌های عملکرد استاتیک یاتاقان‌های غیرمدور لبدار مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

نمودار ۶، اثر نسبت طول به قطر بر زاویه مشخصه یاتاقان‌های لبدار را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، با افزایش نسبت طول به قطر، زاویه حالت نیز افزایش می‌یابد. این بدین دلیل است که با افزایش نسبت طول به قطر، منتهج بار در راستای  $X$  افزایش می‌یابد و باعث افزایش زاویه حالت می‌شود.

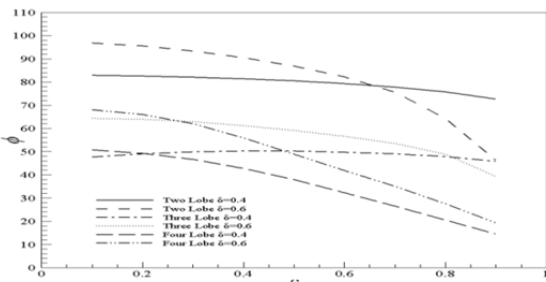
نمودار ۷، تاثیر نسبت طول به قطر بر ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های لبدار را نشان می‌دهد. روشن است با افزایش نسبت طول به قطر، با توجه به آن که ناحیه تصویر فشار افزایش می‌یابد، ظرفیت تحمل بار یاتاقان نیز افزایش می‌یابد.

در نمودار ۸، اثر نسبت طول به قطر بر نشت جانبی آورده شده است. بر اساس نمودار، با افزایش نسبت طول به قطر، نشت جانبی کاهش می‌یابد که علت آن افزایش طول یاتاقان و نزدیک شدن هندسه یاتاقان به هندسه یاتاقان طویل است که باعث کاهش جریان نشت می‌شود.

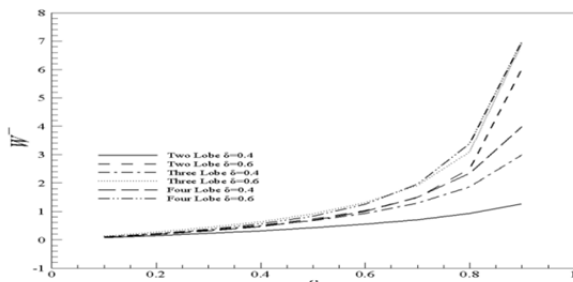
نمودار ۹ نیز اثر نسبت طول به قطر بر ضریب اصطکاک را نشان



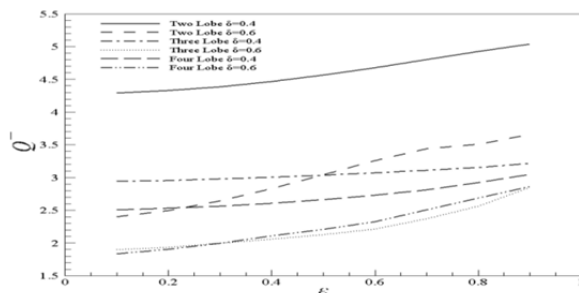
نمودار (۱) مقایسه فشار در یاتاقان دولب روانکاری شده با سیال تنش کوپل و  $\bar{\Gamma}=0/4, \delta=0/5, \varepsilon=0/4$



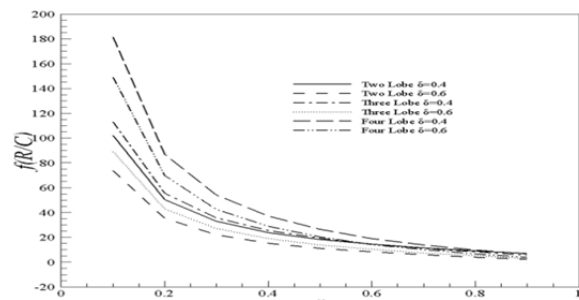
نمودار (۲) تاثیر پیش‌بار بر زاویه حالت یاتاقان‌های لبدار در مقادیر مختلف نسبت خروج از مرکزی



نمودار (۳) تاثیر پیش‌بار بر ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های لبدار در مقادیر مختلف نسبت خروج از مرکزی

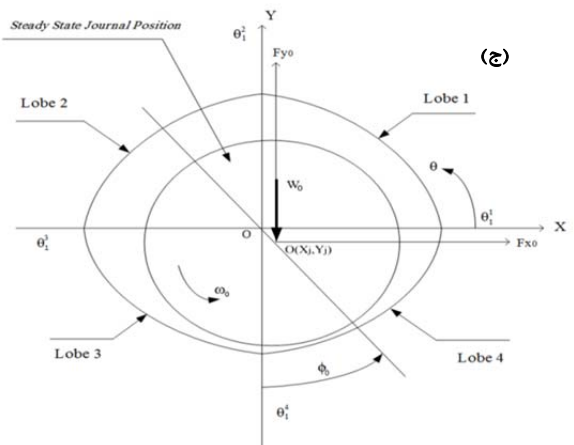
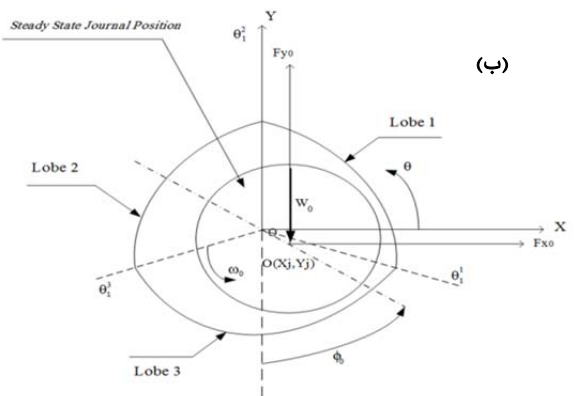
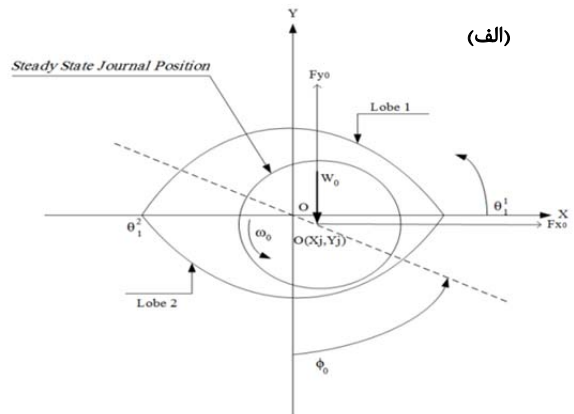


نمودار (۴) تاثیر پیش‌بار بر نشت جانبی یاتاقان‌های لبدار در مقادیر مختلف نسبت خروج از مرکزی



نمودار (۵) تاثیر پیش‌بار بر ضریب اصطکاک یاتاقان‌های لبدار در مقادیر مختلف نسبت خروج از مرکزی

می‌دهد. روشن است که با افزایش نسبت طول به قطر، ضریب اصطکاک کاهش یافته که علت این پدیده شدت بیشتر روند افزایش ظرفیت تحمل بار نسبت به نیروی اصطکاک است.



شکل (۱) هندسه یاتاقان‌های غیرمردور، (الف) دولب، (ب) سه‌لب، (ج) چهارلب

جدول (۱) تغییرات زاویه حالت بر حسب نسبت خروج از مرکزی یاتاقان غیرمردور دولب با سیال روانکار تنش کوپل،  $\bar{\Gamma}=0/4$  و  $\delta=0/5$

$\varepsilon$	$\phi_0$	$\phi_0^*$
0/1	83/05	83/31
0/2	82/36	82/23
0/3	81/15	81/25
0/4	79/28	79/51
0/5	76/38	76/41
0/6	71/26	71/43
0/7	49/42	48/48

کار حاضر، مرجع [12]

پارامترهای پیش‌بار، نسبت خروج از مرکزی و نسبت طول به قطر بر مشخصه‌های عملکرد استاتیک این یاتاقان‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یافته‌های پژوهش حاضر با توجه به نتایج حاصل عبارت از موارد زیر است:

۱- با توجه به تعریف نسبت خروج از مرکزی، افزایش مقدار این پارامتر با افزایش انحراف مرکز محور نسبت به مرکز یاتاقان یا کاهش مقدار لقی میسر می‌شود، لذا افزایش نسبت خروج از مرکزی باعث کاهش ضخامت کمینه فیلم سیال می‌شود و در نتیجه ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهد که با افزایش تعداد لب، شیب افزایش ظرفیت تحمل بار نیز افزایش می‌یابد. افزایش نسبت خروج از مرکزی، افزایش نیروی اصطکاک را به دنبال دارد، ولی با توجه به آن که رشد ظرفیت تحمل بار نسبت به نیروی اصطکاک شیب تندتری دارد، افزایش نسبت خروج از مرکزی در نهایت کاهش ضریب اصطکاک را به همراه دارد. همچنین افزایش نسبت خروج از مرکزی به علت افزایش ضخامت بیشینه فیلم سیال، باعث افزایش نشت جانبی می‌شود.

۲- با افزایش پیش‌بار، با توجه به آن که هندسه یاتاقان لبدار به هندسه یاتاقان مدور نزدیک می‌شود، مشخصه‌های عملکرد استاتیک یاتاقان‌های لبدار به یاتاقان دوار نزدیک می‌شود. از این رو با افزایش پیش‌بار، روند تغییر مشخصه‌های عملکرد استاتیک در یاتاقان‌های دولب نسبت به یاتاقان‌های سلب و چهارلب بیشتر است. این بدین دلیل است که با افزایش تعداد لب، هندسه یاتاقان به هندسه دوار نزدیک می‌شود و افزایش پیش‌بار تغییر چشمگیری در روند تغییر مشخصه‌های عملکرد استاتیک یاتاقان‌های چهارلب ندارد. بنابراین شاهد هستیم که افزایش پیش‌بار باعث افزایش ظرفیت تحمل بار و زاویه حالت می‌شود، حال آن که نشت جانبی و ضریب اصطکاک را کاهش می‌دهد.

۳- افزایش مقدار نسبت طول به قطر باعث می‌شود تا ناحیه ایجاد فشار گسترش یابد که این امر باعث افزایش ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های لبدار می‌شود. اما افزایش نسبت طول به قطر، افزایش طول یاتاقان را در بر دارد که این امر باعث کاهش نشت جانبی می‌شود و در یاتاقان‌های دولب نسبت به یاتاقان‌های سلب و چهارلب شیب تندتری دارد. همچنین با افزایش منته‌جه بار در راستای X شاهد افزایش زاویه حالت با افزایش نسبت طول به قطر هستیم.

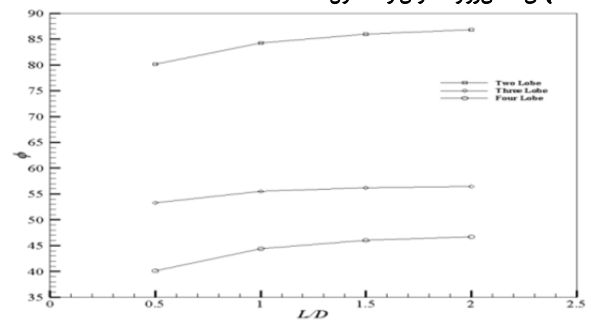
**تشکر و قدردانی:** نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت دانشگاه یزد در انجام این تحقیق کمال تشکر و قدردانی نمایند.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در نشریه دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. ضمناً محتویات علمی و ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده نویسندگان مقاله است.

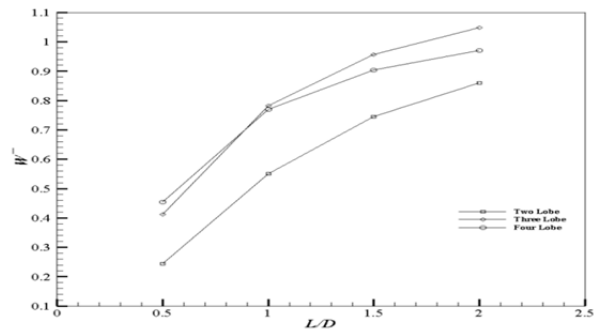
**تعارض منافع:** بدینوسیله نویسندگان اعلام می‌کنند که این اثر حاصل یک پژوهش مستقل بوده و هیچگونه تضاد منافعی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد.

**سهم نویسندگان:** مهدی مالکی ورنوسفادرنی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۷۰٪)؛ اصغر دشتی رحمت‌آبادی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)؛ علی‌اکبر دهقان (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۱۰٪)

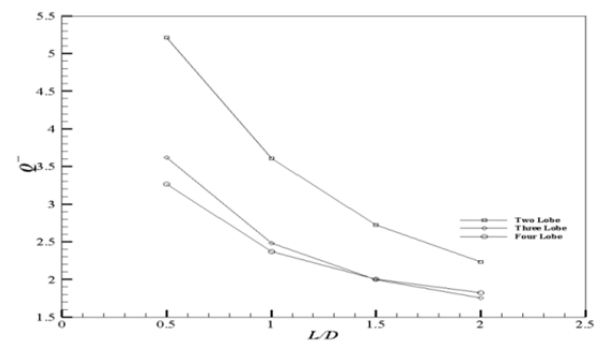
**منابع مالی:** منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.



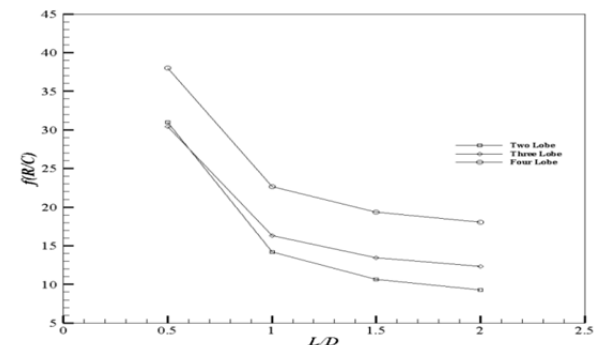
نمودار ۶) تاثیر نسبت طول به قطر بر زاویه حالت یاتاقان‌های لبدار



نمودار ۷) تاثیر نسبت طول به قطر بر ظرفیت تحمل بار یاتاقان‌های لبدار



نمودار ۸) تاثیر نسبت طول به قطر بر نشت جانبی یاتاقان‌های لبدار



نمودار ۹) تاثیر نسبت طول به قطر بر ضریب اصطکاک یاتاقان‌های لبدار

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، عملکرد مشخصه‌های استاتیک یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور لبدار تحت روانکار شامل نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم با در نظر گرفتن مدل سیال تنش کوپل مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور معادلات حاکم بر توزیع فشار استاتیک، استخراج و با توجه به عدم امکان ارایه حل تحلیلی برای یاتاقان‌های با طول محدود، معادلات به کمک روش حل عددی اجزای محدود حل شده‌اند. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده، اثر

Engineering Congress And Exhibition, San Francisco, CA (United States), 12-17 Nov, 1995. New York City: ASME; 1995.

2- Stokes VK. Theories of fluids with microstructure: An introduction. Berlin: Springer-Verlag; 1984. pp. 34-78.

3- Sinha P, Singh C, Prasad KR. Couple stresses in journal bearing lubricants and the effect of cavitation. *Wear*. 1981;67(1):15-24.

4- Lee CG, Hwang YJ, Choi YM, Lee JK, Choi C, Oh JM. A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2009;10(1):85-90.

5- Tao Y, Tao Y, Wang B, Tai Y. Preparation and investigation of nano-AlN lubricant with high performance. *Materials Chemistry and Physics*. 2014;147(1-2):28-34.

6- Binu KG, Shenoy BS, Rao DS, Pai R. A variable viscosity approach for the evaluation of load carrying capacity of oil lubricated journal bearing with TiO<sub>2</sub> nanoparticles as lubricant additives. *Procedia Materials Science*. 2014;6:1051-1067.

7- Binu KG, Shenoy BS, Rao DS, Pai R. Static characteristics of a fluid film bearing with TiO<sub>2</sub> based nanolubricant using the modified Krieger-Dougherty viscosity model and couple stress model. *Tribology International*. 2014;75:69-79.

8- Babu KS, Prabhakaran Nair K, Rajendrakumar PK. Computational analysis of journal bearing operating under lubricants containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnO nanoparticles. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2014;6(1):34-42.

9- Jatti VS, Singh TP. Copper oxide nano-particles as friction-reduction and anti-wear additives in lubricating oil. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29(2):793-798.

10- Chen H, Ding Y, Tan C. Rheological behavior of nanofluids. *New Journal of Physics*. 2007;9:1-27.

11- Guha SK. A theoretical analysis of dynamic characteristic of finite hydrodynamic journal bearings lubricated with coupled stress fluids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology*. 2004;218(2):125-133.

12- Crosby WA, Chetti B. The static and dynamic characteristics of a two-lobe journal bearing lubricated with couple stress fluid. *Tribology Transactions*. 2009;52(2):262-268.

## ۵- پی‌نوشت

### علامه شرح

### علامه اختصاری

لقی شعاعی (m)	$C$
کمترین میزان لقی زمانی که محور و یاتاقان هم‌مرکز باشند (m)	$C_m$
نیروی اصطکاک (N)	$F$
نیروی اصطکاک بی‌بعد $\left(\frac{c}{U_{RL}\mu_{bf}}F\right)$	$\bar{F}$
ضریب اصطکاک	$f\left(\frac{R}{C}\right)$
ضخامت فیلم سیال (m)	$h$
ضخامت فیلم سیال بدون بعد	$H$
فشار هیدرودینامیک $(N/m^2)$	$P$
فشار هیدرودینامیک بی‌بعد $\left(\frac{c}{U_{RL}\mu_{bf}}P\right)$	$\bar{P}$
نشستی جانبی $(m^3/s)$	$Q$
نشستی جانبی بی‌بعد $\left(\frac{cL}{cR^2U}\right)Q$	$\bar{Q}$
شعاع ژورنال (m)	$R$
سرعت خطی ژورنال (m/s)	$U$
مولفه‌های سرعت سیال روانکار (m/s)	$u, v, w$
منتجه بار روی یاتاقان (N)	$W$
منتجه بار بی‌بعد $\left(\frac{c^2}{U_{LR}^2\mu_{bf}}W\right)$	$\bar{W}$
محورهای مختصات با مبدأ عبوری از مرکز هندسی یاتاقان	$\bar{x}, \bar{y}$
عدد تنش کوپل (m)	$l$
عدد تنش کوپل بی‌بعد $(l/C)$	$\bar{l}$
<b>علامه یونانی</b>	
چگالی روانکار $(kg/m^3)$	$\rho$
نسبت خارج از مرکزی $(e/C_m)$	$\varepsilon$
زاویه شروع و انتهای ناحیه فشار مثبت لب ام $(rad)$	$\theta_1^i, \theta_2^i$
زاویه خط‌المركزین یاتاقان و لب ام با محور $x$ $(rad)$	$\theta_0^i$
مختصات زاویه‌ای اندازه‌گیری شده از محور $x$ $(rad)$	$\theta$
پرلود سیستم یاتاقان $(C_m/C)$	$\delta$
زاویه مشخصه برای نگهداری بار عمودی $(rad)$	$\phi$
ویسکوزیته روانکار پایه $(Ns/m^2)$	$\mu_{bf}$
ویسکوزیته نانو روانکار $(Ns/m^2)$	$\mu_{nf}$
ویسکوزیته نسبی	$\bar{\mu}$
نسبت طول به قطر $(L/D)$	$\lambda$
ویسکوزیته ذاتی	$[\eta]$
خواص ماده مرتبط با تنش کوپل	$\eta$
کسر حجمی نانوذرات	$\phi_n$

### منابع

1- Choi SUS, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *International Mechanical*