

# بررسی اثر لغزش سیال در روانکاری الاستوهیدرودینامیک

جواد شریفی یلمه ، امیر ترابی<sup>۱</sup>

**چکیده** شرط عدم لغزش از جمله شرایط پذیرفته شده در کاربردهای معمول حرکت سیالات است. در برخی موارد خاص این فرض به چالش کشیده می شود. وقتی سرعت و فشار بالایی در بخشی از جریان نزدیک سطح اتفاق افتد مانند روان کاری سطوح ناهمبند احتمال بروز لغزش روی سطح وجود دارد. در این مطالعه، اثر لغزش سیال روی سطح در روان کاری الاستوهیدرودینامیک، به صورت عددی بررسی شده است. مدلی عددی بر اساس معادلات حاکم بر جریان سیال روان کار و با فرض نیوتنی بودن سیال و همدم بودن جریان در هندسه ای شامل یک سطح استوانه ای بالایی و سطح مسطح پایینی استخراج و به شیوه ای تفاضل محدود گسسته سازی و با روش حداقل مربعات حلی گردید. در بررسی ها علاوه بر اثبات وجود لغزش، اثر آن به ازای مقادیر گوناگون پارامترهای مسئله نظیر سرعت سطوح، میزان بار، نسبت سرعت سطوح و تنش برشی حدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت و بار لغزش قابل ملاحظه ای اتفاق می افتد و شرط عدم لغزش باعث انحراف ۲۰ تا ۹۰ درصدی در تخمین ضریب اصطکاک می شود. در نسبت سرعت سطوح برابر میزان لغزش بیشتر بوده و با بالا رفتن تنش برشی حدی وقوع لغزش محدودتر می شود. لغزش باعث کاهش اصطکاک روان کاری می شود.

واژه های کلیدی: روانکاری، الاستوهیدرودینامیک، لغزش، اصطکاک، مدل سازی، معادله رینولدز

## Investigation of Slip Condition in the Elastohydrodynamic Lubrication

Javad Sharifi Yalameh, Amir Torabi

### Abstract:

The non-slip condition is one of the acknowledged conditions in the common fluid dynamic applications. In some specific cases, this assumption is challenged. When high speed and pressure occur in a part of the flow near the surface, such as in the lubrication of non-conformal surfaces, there is a possibility of slippage on the surface. In this study, the effect of fluid slipping on the surface in elastohydrodynamic lubrication has been numerically investigated. A numerical model was derived based on the equations governing the flow of the lubricating fluid and with the assumption that the fluid is Newtonian and the flow is isothermal. The geometry includes an upper long cylindrical surface and a lower flat surface. The equations were discretized by the finite difference method and solved by the least squares method. In this investigation, in addition to proving the existence of slip, its effect was considered for various values of problem parameters, such as the speed of the surfaces, load, the ratio of the speed of the surfaces, and the limit shear stress. The results showed that with the increase in speed and load, a significant slip occurs and the no-slip condition causes a deviation of 20% till 90% in the estimation of the friction coefficient. At the speed ratio

near one, the slippage is higher. As the shear stress increases, the occurrence of sliding becomes more limited. Slipping reduces the friction of lubrication.

**Keywords:** Lubrication, Elastohydrodynamic, Slip condition, Friction, Modeling, Reynolds equation

گذشته نشان داده‌اند که امکان لغزش مایعات نیوتنی در امتداد دیواره‌های جامد بسیار صاف وجود دارد و این نتیجه ممکن است استفاده از روان‌کننده‌های مایع را برای این دستگاه‌ها امکان‌پذیر کند.

با پیشرفت‌های صورت یافته در اندازه‌گیری‌های نانو مقیاس، مشاهده لغزش مرزی برای دانشمندان میسر شده است. وونگ و همکاران [۵]، شواهد وقوع لغزش روان‌کار بر روی سطح فولادی در تماس روان‌کاری الاستوهیدرودینامیک را در آزمایشگاه ارائه نموده‌اند. پونژاویچ و وونگ [۶]، با آزمایش استدلال کردند ضخامت فیلم به دلیل فشار جریان کاسته می‌شود و به دلیل کاهش تنش برشی، اصطکاک کم می‌شود که در نهایت منجر به وقوع لغزش در سطح تماس می‌گردد. گو و همکاران [۷]، ارتباط میان زاویه‌ی پسماند تماس و روان‌کاری هیدرودینامیکی یک یاتاقان لغزشی را مورد بررسی و آزمایش قرار داده‌اند. زاویه‌ی تماس با نیروی جاذبه میان مولکول‌ها در سطح تماس جامد و سیال مرتبط است و از این طریق می‌تواند بر امکان وقوع لغزش در سطح مشترک تأثیر بگذارد. جین و همکاران [۸]، تغییرات فیلم روانکار در حرکت رفت و برگشتی با سرعت ورود صفر را مورد آزمایش و تحقیق قرار داده‌اند. نتایج بیانگر وابستگی لغزش به اثرات گذرا و بار بود. کالین و کوس [۹]، راهبردی جدید برای کاهش اصطکاک روان‌کاری الاستوهیدرودینامیک در تماس‌های فولادی با استفاده از فیلم‌های مرزی چربی‌گریز تشکیل شده از مواد افزودنی آلی ساده مانند آمینه، الکل، آمید و اسید چرب ارائه کرده‌اند.

در برخی مطالعات با استفاده از گزارش‌های وقوع لغزش و تفاوت عملکرد یاتاقان‌ها در حالت وقوع لغزش در سطح تماس دیواره و سیال روان‌کار، مدلی نظری برای تحلیل عددی روان‌کاری ارائه داده‌اند و با استفاده از روش‌های مرسوم مانند حل به کمک روش المان محدود برای این نوع مسائل یک پاسخ عددی پیشنهاد نموده‌اند. ژانگ و ون [۱۰]، خط تماس هم‌دمای روان‌کاری الاستوهیدرودینامیکی میان یک استوانه و یک صفحه‌ی کاملاً صاف تحت نسبت لغزش به غلش‌های متفاوت و با استفاده

## ۱- مقدمه:

فرض عدم لغزش سطح در مجاورت سطح متحرک، که نخستین بار توسط نیوتن عرضه گردیده، به صورت گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل مورد پذیرش است [۱]؛ این فرض بیان می‌دارد که سیال در محل تماس با سطح جامد مجاور با سرعت برابر با سرعت سطح جامد حرکت می‌نماید. بر خلاف کاربرد گسترده‌ی این فرض، در آزمایش‌ها لغزش مرزی در جریان‌های پلی‌مری، جریان گوشه، روان‌کاری هیدرودینامیکی و به خصوص روان‌کاری الاستوهیدرودینامیکی مشاهده و گزارش گردیده است [۲-۴]. روان‌کاری الاستوهیدرودینامیک صورتی از روان‌کاری هیدرودینامیکی است. یک فیلم نازک روان‌کار میان سطوح غلتنده و لغزنده‌ی جفت شونده‌ی ناهمدیس اجزاء یک ماشین شکل می‌گیرد. عوامل تأثیرگذار در این رژیم روان‌کاری، تغییر شکل الاستیک سطوح در اثر بار اعمال شده، رفتار هیدرودینامیکی که روان‌کار میان سطوح در تماس وارد می‌سازد و همچنین تغییر لزجت روان‌کار با فشار می‌باشد. از این رو است که با نام روان‌کاری الاستوهیدرودینامیک شناخته می‌شود.

از مهم‌ترین زمینه‌هایی که مطالعه‌ی اثر لغزش سطح را در روان‌کاری الاستوهیدرودینامیک ترغیب می‌نماید، حوزه‌ی مطالعه‌ی سیستم‌های میکروالکترومکانیکی است. یکی از مشکلات اساسی که استفاده گسترده و قابلیت اطمینان این سامانه‌ها را محدود می‌کند، چسبندگی قوی، همراه با اصطکاک و سایش متعاقب آن در این نوع سیستم‌هاست. بسیاری از این دستگاه‌ها سطوح متحرک (لغزشی/غلتنشی) دارند و در نتیجه لازم است از روان‌کار بین سطوح در تماس استفاده شود تا اصطکاک و سایش کاهش یابد. با این حال، یک مانع مهم برای توسعه روان‌کاری، مشکل دستیابی به عملکرد تریبولوژیکی موثر قطعات متحرک آن‌ها است. در سامانه میکروالکترومکانیکی جلوگیری از چسبندگی با استفاده از پوشش جامد در مقایسه با روان‌کاری مایع، عملی‌تر است. با این حال، مطالعات یک دهه

## ۲- معادلات حاکم:

مدل ریاضیاتی شامل سه معادله است: معادله‌ی رینولدز تغییر یافته که مستخرج از معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی با در نظر گرفتن شرط لغزش مرزی است و فشار فیلم روان کار را به هندسه‌ی تماس و سرعت حرکت سطوح مرتبط می‌سازد؛ معادله‌ی ضخامت فیلم که فاصله‌ی میان دو سطح تماس را با در نظر گرفتن تغییر شکل الاستیک بیان می‌دارد و در نهایت، معادله‌ی تعادل بار که بر اساس آن باید مجموع فشار ایجاد گردیده در فیلم روان کار با مجموع بارگذاری عمودی در تعادل باشد. همچنین به سبب فشار بسیار بالا، خواص روان کار مانند لزجت و چگالی تغییر می‌یابد که مدل ارائه شده با روابطی که لزجت و چگالی را به فشار مرتبط می‌سازد، تکمیل گردیده است.

### ۲-۱- معادله‌ی رینولدز

معادله‌ی رینولدز، معادله‌ی دیفرانسیل جزئی حاکم بر توزیع فشار در تئوری روان کاری کلاسیک است. این معادله برگرفته از معادله‌ی ناویر-استوکس و معادله بقای جرم بوده و فرم استاندارد آن برای تماس یک سطح استوانه‌ای یا یک سطح مسطح به صورت زیر است [۱۵]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho h (u_1 + u_2)) \quad (1)$$

که در این رابطه  $\rho$  فشار،  $h$  ضخامت لایه روان کار،  $\rho$  چگالی،  $\mu$  ویسکوزیته و  $u$  سرعت سطوح است. اندیس‌های ۱ و ۲ نشان دهنده‌ی سطوح بالایی و زیرین فیلم سیال می‌باشند. برای استخراج این معادله فرض شده است که سیال روان کار نیوتنی است، نیروهای لزجت سیال بر اینرسی سیال غالبند، از نیروهای حجمی صرف نظر شده‌است، تغییرات فشار در طول فیلم سیال ناچیز است و ضخامت فیلم سیال نسبت به عرض و طول بسیار کوچک است.

### ۲-۲- مدل سازی لغزش

مدل لغزش مرزی استفاده شده در این مطالعه با نام مدل تنش برشی حدی (بحرانی) شناخته می‌شود. مطابق این مدل لغزش

از مدل لغزش تنش برشی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. اورلثان و همکاران [۱۱]، یک روش المان محدود برای بررسی اثر و بافت لغزش دیواره بر یاتاقان ژورنال (الاستو) هیدرودینامیک ارائه داده‌اند. در این اثر به مطالعه‌ی تأثیر توأمان بافت سطح و لغزش پرداخته شده و با انجام مقایسه میزان ظرفیت حمل بار و تلفات بار نشان داده شده‌است که با انتخاب یک الگوی مناسب برای سطح، عمل کرد یاتاقان را به طور مؤثری می‌توان بهبود بخشید. چن و همکاران [۱۲]، آثار لغزش ناهمسانگرد بر روان کاری الاستو هیدرودینامیک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. ژائو و همکاران [۱۳]، یک راه حل تکمیلی خطی برای لغزش مرزی دو بعدی تماس روان کاری الاستو هیدرودینامیکی ارائه داده‌اند. حل عددی فوق، برای تماس نقطه‌ای روان کاری الاستو هیدرودینامیکی تحت شرایط هم‌دما و غلتش خالص انجام یافته‌است. سون و همکاران [۱۴]، اثر لغزش مرزی محلی بر افزایش ظرفیت حمل بار را مورد بررسی قرار داده‌اند. شواهد تجربی توسط دستگاه آزمایش لغزنده‌ی روی دیسک نوری حاصل شده‌است. بررسی تحلیل عددی اثر لغزش با استفاده از مدل تنش برشی حدی (بحرانی) و با کمک معادله رینولدز تغییر یافته برای روان کاری هیدرودینامیک برای تعیین ظرفیت حمل بار انجام یافته‌است. نتایج تحلیل عددی و داده‌های حاصل از آزمایش بیان داشته‌اند، الگوی لغزش مناسب روی سطح ثابت یاتاقان می‌تواند ظرفیت حمل بار را بهبود بخشد.

همانطور که مرور مطالعات نشان می‌دهد موضوع لغزش سیال روی سطح در شرایط روانکاری می‌تواند بسیاری از تخمین‌های رایج با اشتباه همراه کند. مدل سازی الاستو هیدرودینامیک در متون مختلف تشریح شده است ولی در نظر گرفتن لغزش و نحوه مدل سازی آن امری نسبتاً جدید محسوب می‌شود. در این مقاله مدلی برای امکان بروز لغزش سیال بیان شده و بر اساس آن معادلات حاکم بر حرکت سیال استخراج شده است. این مدل لغزش بر مبنای تنش برشی حدی است. با حل مجموعه معادلات، رفتار روانکار تحت شرایط امکان بروز لغزش مدل سازی شده و تأثیر پارامترهای کاری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

مرزی در صورتی رخ می‌دهد که تنش برشی سطح تماس سیال و جامد برابر با مقداری بحرانی به عنوان تنش برشی حدی (بحرانی) باشد. این مدل به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۶ و ۱۷]:

$$\begin{cases} \tau = \mu \dot{\gamma} & \cdot \mu \dot{\gamma} < \tau_L \\ \tau = \tau_c & \cdot \mu \dot{\gamma} = \tau_L \end{cases} \quad (2)$$

که  $\tau$  تنش برشی،  $\dot{\gamma}$  کرنش برشی و  $\tau_L$  نشان‌گر تنش برشی حدی (بحرانی) است. تنش برشی حدی در مدل‌های رئولوژیکی متفاوتی به کار گرفته شده و توسط مطالعات تجربی نیز مقدار عملی آن اندازه‌گیری شده است. در این مطالعه نیز از مدلی بر پایه‌ی تنش برشی حدی استفاده گردیده است که به صورت خطی با فشار تغییر می‌یابد:

$$\tau_L = \tau_0 + \gamma p \quad (3)$$

که  $\tau_0$ ، تنش برشی اولیه در فشار محیط و  $\gamma$  ضریب تناسب تنش برشی حدی است. مطابق با مدل مورد استفاده، برای هندسه‌ی حل که شامل یک سطح بالایی که سرعت و تنش برشی آن با اندیس یک نمایش داده می‌شود و یک سطح زیرین که پارامترهای یاد شده در آن سطح با اندیس دو شناخته می‌شود، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} & (|\tau_1| < \tau_{L1}) \cdot (|\tau_2| < \tau_{L2}) \\ & \rightarrow \begin{cases} u_{lub1} = u_1 \\ u_{lub2} = u_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & (|\tau_1| \geq \tau_{L1}) \cdot (|\tau_2| < \tau_{L2}) \\ & \rightarrow \begin{cases} u_{lub1} = u_{lub1}^{NN} \\ u_{lub2} = u_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & (|\tau_1| < \tau_{L1}) \cdot (|\tau_2| \geq \tau_{L2}) \\ & \rightarrow \begin{cases} u_{lub1} = u_1 \\ u_{lub2} = u_{lub2}^{NN} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & (|\tau_1| \geq \tau_{L1}) \cdot (|\tau_2| \geq \tau_{L2}) \cdot (|\tau_1| < |\tau_2|) \\ & \rightarrow \begin{cases} u_{lub1} = u_{lub1}^{NN} \\ u_{lub2} = u_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (|\tau_1| \geq \tau_{L1}) \cdot (|\tau_2| \geq \tau_{L2}) \cdot (|\tau_1| > |\tau_2|) \\ & \rightarrow \begin{cases} u_{lub1} = u_1 \\ u_{lub2} = u_{lub2}^{NN} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

$u$  سرعت سطح،  $u_{lub}$  سرعت روان کار در مجاورت سطح و  $u_{lub}^{NN}$  سرعت روان کار در هنگام وقوع لغزش تعریف می‌گردند. از تعریف تنش برشی برای سیال نیوتنی داریم:

$$\tau_1 = -\frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{u_2 - u_1}{h} \quad (9)$$

$$\tau_2 = \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{u_2 - u_1}{h} \quad (10)$$

که جهت مثبت  $\tau$ ، در سطح زیرین (سطح ۱) خلاف جهت محور  $x$  و در سطح بالایی (سطح ۲) موافق جهت محور  $x$  در نظر گرفته می‌شود. در لحظه‌ی وقوع لغزش، مقدار سرعت روان کار در سطح ۱، به کمک روابط بالا به دست می‌آید:

$$u_{lub1}^{NN} = u_2 - \frac{h}{\mu} \left( \pm \tau_{L1} + \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (11)$$

و برای سطح ۲ نیز به روش مشابه خواهیم داشت:

$$u_{lub2}^{NN} = u_1 + \frac{h}{\mu} \left( \pm \tau_{L2} - \frac{h}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (12)$$

علامت مثبت یا منفی، بر اساس جهت  $\tau_1$  و  $\tau_2$  می‌بایست انتخاب گردند.

### ۲-۳ معادله‌ی تغییر ضخامت

هندسه‌ی تحلیل شامل دو سطح ناهم‌دیس متشکل از یک استوانه و یک صفحه است. مختصات و هندسه‌ی مورد نظر مطابق شکل ۱ می‌باشد. طول استوانه در قیاس با شعاع آن بسیار بزرگ فرض گردیده است؛ پس بنابراین از نشت جانبی صرف نظر گردیده شده است.

شده باشد؛ معادلات حاکم بر تغییرات لزجت و چگالی روان کار با فشار از مدل یاسوتومی [۱۹] به صورت زیر به دست می آید:

$$\mu = \mu_g \exp \left[ \frac{-2.303 C_1 (T - T_g(p)) F(p)}{C_2 + (T - T_g(p)) F(p)} \right] \quad (15)$$

$$T_g(p) = T_{g0} + A_1 \ln(1 + A_2) \quad (16)$$

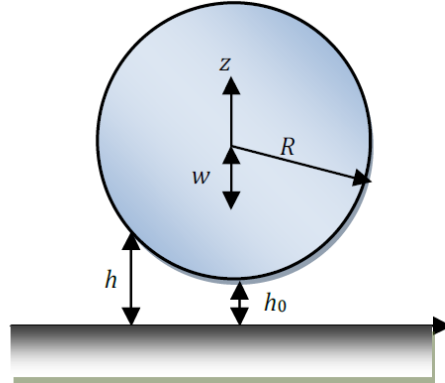
$$F(p) = (1 + b_1 p)^{b_2} \quad (17)$$

مقادیر ثابت‌های معادلات (۱۵) تا (۱۷) در جدول ۱ ارایه شده است. به خاطر فرض هم‌دمایی، دمای  $T$  ثابت و برابر دمای محیط ۲۹۸ کلوین در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: ثابت‌های معادلات خواص روان کار [۱۹]

یکا	مقدار	پارامتر
[Pa.s]	$1/23 \times 10^7$	$\mu_g$
[°C]	-۸۸/۶۹	$T_{g0}$
[°C]	۲۶۳/۸	$A_1$
[GPa <sup>-1</sup> ]	۰/۳۵۲۷	$A_2$
[GPa <sup>-1</sup> ]	۱۳/۷۳	$b_1$
[-]	-۰/۳۴۳۶	$b_2$
[-]	۱۱/۶۶	$C_1$
[°C]	۳۹/۱۷	$C_2$
[-]	۹/۲	(%)SD

تغییرات چگالی در مقایسه با تغییرات لزجت، کوچک است. با این حال در فیلم روان کاری الاستوهیدرودینامیک فشار بسیار بالایی وجود دارد و روان کننده را نمی‌توان به عنوان یک محیط تراکم ناپذیر در نظر گرفت؛ بنابراین لازم است وابستگی چگالی به فشار در نظر گرفته شود. مقدار چگالی در این مطالعه با استفاده از رابطه‌ی موسوم به رابطه‌ی داوسون-هیگینسون [۱۸] به دست می آید:



شکل ۱ تماس میان سطح صاف و استوانه

علاوه بر این از آثار زبری سطح نیز چشم پوشی گردیده شده است. همچنین روان کاری از نوع الاستوهیدرودینامیک است که منجر به وقوع تغییر شکل الاستیک در سطح می‌گردد. با در نظر گرفتن این موارد، رابطه‌ی تغییر ضخامت فیلم، به صورت زیر خواهد بود:

$$h = h_0 + \frac{x^2}{2R} + \delta(x) \quad (13)$$

که در آن  $h_0$  کمینه ضخامت فیلم در مرکز مختصات در اثر روان کاری هیدرودینامیکی، عبارت  $\frac{x^2}{2R}$  فاصله‌ی بین سطح جسم معادل تغییر شکل نیافته و  $\delta$  تغییر شکل الاستیک واقعی سطح جسم معادل از یک سطح مسطح نسبت به حالت اولیه‌اش است. برای دو صفحه از دو جنس متفاوت اما با خواص الاستیکی یکسان، تغییر شکل در هر نقطه از  $x$  بر روی صفحه‌ی تماس ( $z=0$ )، برابر خواهد بود با [۱۸]:

$$\delta = -\frac{2}{\pi E'} \int_{x_{min}}^{x_{end}} p \ln(x - x')^2 dx' \quad (14)$$

که  $x_{min}$  مختصات مکان ابتدای بخش محاسبات،  $x_{end}$  مختصات انتهای بخش محاسبات،  $p$  فشار که تابعی از  $x$  است و  $E'$  مدول مؤثر الاستیسیته است.

## ۲-۴ معادلات رفتار روان کار

خواص روان کارها با تغییر فشار و دما تغییر می‌یابد. وقتی در یک تحلیل از آثار حرارت صرف نظر گردیده و حالت ساده‌ی هم‌دمایی در نظر گرفته

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{0.6p}{1 + 1.7p}\right) \quad (18)$$

که  $\rho_0$  چگالی سیال در فشار برابر با صفر بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و  $p$  فشار نسبی بر حسب  $GPa$  می‌باشند و  $\bar{\rho}$  نیز نمایانگر چگالی بی‌بعد است.

## ۲-۵ معادله‌ی بار

بارگذاری قائم اعمال گردیده بر محل تماس، توسط فیلم روان‌کار الاستوهیدرودینامیک منتقل می‌گردد. بنابراین برای تعادل نیرو لازم است که انتگرال توزیع فشار در طول تماس برابر با بارگذاری عمودی بر واحد عرض  $W$  باشد. در حالت یک بعدی یا تماس خطی حاصل تقسیم بار بر طول تماس مطرح بوده که برابر با انتگرال فشار در ناحیه‌ی تماس است و به صورت معادله زیر به دست می‌آید:

$$\int_{x_{min}}^{x_{end}} p(x) dx = W \quad (19)$$

## ۳- نتایج

### ۳-۱ بررسی شبکه

انتخاب اندازه‌ی ابعاد مناسب المان‌های شبکه از مهم‌ترین بخش‌ها در حل عددی می‌باشد. در تحقیق حاضر برای انتخاب مناسب تقسیم‌بندی شبکه بدین صورت عمل گردیده است که حداقل ضخامت فیلم روان‌کار ( $h_{min}$ )، بیشینه فشار ( $p_{max}$ ) و ضریب اصطکاک ( $COF$ ) برای ورودی‌های مطابق با داده‌های جدول ۲ به ازای تعداد مش‌های متفاوت محاسبه گردیده و سپس درصد اختلاف میان هر سری از داده‌ها محاسبه شده است و نتایج در جدول ۲ درج شده است.

جدول ۲: حداقل ضخامت فیلم، بیشینه فشار و ضریب اصطکاک در شبکه‌بندی‌ها با اندازه‌های متفاوت

تعداد مش	$h_{min}$ [ $\mu m$ ]	اختلاف (%)	$p_{max}$ [MPa]	اختلاف (%)	$COF$	اختلاف (%)
----------	-----------------------	------------	-----------------	------------	-------	------------

۱۲۹	۰/۳۷	---	۳۴۶/۴۵	---	۰/۱۰۴	---
۱۹۹	۰/۲۹	۲۱/۶۲	۲۷۱/۷۲	۲۱/۵۷	۰/۰۰۶۹	۳۳/۶۵
۲۴۹	۰/۲۸	۳/۵۷	۲۷۱/۵۳	۰/۰۷	۰/۰۰۷۳	۵/۸۰
۲۹۹	۰/۳۴	۲۱/۴۳	۲۶۹/۰۱	۰/۹۳	۰/۰۰۵۹	۱۹/۱۸
۳۴۹	۰/۳۳	۲/۹۴	۲۶۸/۹۹	۰/۰۱	۰/۰۰۶۱	۳/۳۹
۳۹۹	۰/۳۲	۳/۰۳	۲۶۸/۹۷	۰/۰۱	۰/۰۰۶۲	۱/۶۴
۴۴۹	۰/۳۲	۰/۰۰	۲۶۸/۹۶	۰/۰۰	۰/۰۰۶۴	۳/۲۳

هدف از این مقایسه آن است که تعداد تقسیم‌بندی شبکه‌ای یافت گردد که به ازای مقادیر بالاتر، اختلاف ناچیز باشد. با توجه به اینکه ریزتر کردن تقسیم‌بندی میدان حل از ۳۴۹ مش بیش‌تر، تأثیر چندانی بر روی پارامترهای روان‌کاری ندارد، همه‌ی حل‌های ارائه شده با این تعداد مش انجام گرفته است.

### ۳-۲ اعتبار سنجی

مقایسه و سنجش داده‌های حل عددی با داده‌های به‌دست آمده از تحقیقات پیشین، امری ضروری در مدل‌سازی‌های عددی است. به همین منظور، برای اعتبار سنجی داده‌های به‌دست آمده از برنامه‌ی کامپیوتری، مقایسه‌ای میان نتایج آن با داده‌های چند کار تحقیقاتی مشابه انجام شده است. جدول ۳ شرایط کاری ورودی مدل برای کارهای تحقیقاتی مشابه را نشان می‌دهد.

جدول ۳: شرایط کاری مطالعه‌ی جیکوبسون و همراک [۲۱] و مطالعه‌ی لی و همراک [۲۲]

پارامتر	جیکوبسون و همراک [۲۱]	لی و همراک [۲۲]	یکا
$W$	$۲/۰۴۷۸ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۳ \times ۱۰^{-۴}$	[-]
$U$	$۱ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۱ \times ۱۰^{-۱۱}$	[-]
$G$	۵۰۰۰	۳۴۸۰	[-]
$\tau_0$	$۵ \times ۱۰^۶$	$۱۹/۸ \times ۱۰^۶$	[Pa]

$-0.122 \leq X \leq 0.152$	$1/18687 \times 10^{-5}$	جیکوبسون و همراک [۲۱]
$-0.127 \leq X \leq 0.170$	$2/0.860 \times 10^{-5}$	استاهل و جیکوبسون [۲۰]
$-0.136 \leq X \leq 0.170$	$2/410.5 \times 10^{-5}$	مطالعه‌ی حاضر
$-0.155 \leq X \leq 0.155$	$1/270.5 \times 10^{-5}$	لی و همراک [۲۲]
$-0.174 \leq X \leq 0.180$	$1/3250 \times 10^{-5}$	استاهل و جیکوبسون [۲۰]
$-0.181 \leq X \leq 0.188$	$1/0.790 \times 10^{-5}$	مطالعه‌ی حاضر

### ۳-۳ اثر در نظر گرفتن فرض لغزش

در این بخش، مقایسه‌ای میان هندسه‌های متشابه، با سطوح تماس در حالت‌های متفاوتی شامل شرط وقوع لغزش دیواره و نیز عدم وقوع لغزش دیواره صورت پذیرفته‌است. در جدول ۵ مجموعه‌ای از ورودی‌ها و شرایط کاری مرجع برای باتاقان داده شده‌است. دامنه‌ی حل در بازه‌ی  $-4 \leq X \leq 4$  قرار داشته‌است.

از میان پارامترهای فوق، آثار تغییرات پنج پارامتر مجموع سرعت سطوح، نسبت سرعت سطوح، تنش برشی حدی اولیه، ضریب تناسب تنش برشی حدی و میزان بارگذاری بر خواص روان کاری مد نظر بوده‌است. همچنین بیشینه فشار هرتزی نیز با توجه به این که تابعی از میزان بارگذاری است؛ با تغییر این پارامتر تغییر می‌یابد. شکل ۲ توزیع فشار و ضخامت فیلم را در طول سطح تماس بی‌بعد و با شرایط مندرج در جدول فوق را نمایش می‌دهد. در این نمودار مسطح شدن لایه روانکار که ناشی از تغییر شکل سطوح تحت فشار بالاست مشخص است. در نظر گرفتن نوع روانکاری به صورت الاستوهیدرودینامیک در اینجا به اثبات می‌رسد. قله فشار که یک پدیده منحصر به فرد در این مسئله است نیز در شکل ۲ دیده می‌شود. این قله فشار به خاطر جلوگیری از خروج ناگهانی سیال از ناحیه روانکاری پس از واگرا شدن سطوح ایجاد می‌شود. علاوه بر پروفیل فشار و ضخامت فیلم می‌توان بازه‌ی وقوع لغزش در طول سطح تماس را نیز بررسی نمود. در هندسه‌ی مورد بررسی در شرایط فوق، لغزش دیواره در بازه‌ی

$[-]$	$0.076$	$0.07$	$\gamma$
$[N/m]$	---	$50000$	$w$
$[Pa]$	$2/0.02 \times 10^{11}$	$2/0.6 \times 10^{11}$	$E_1, E_2$
$[-]$	$0.3$	$0.3$	$\nu_1, \nu_2$
$[m]$	$0.020461$	$0.010786$	$R$
$[Ns/m^2]$	$0.01326$	$0.0411$	$\mu_0$
$[Pa^{-1}]$	$1/5816 \times 10^{-8}$	$2/21 \times 10^{-8}$	$\alpha$
$[Pa]$	$1 \times 10^9$	$0.4078 \times 10^9$	$p_h$
$[-]$	$0.6$	$0.923$	$U_2/U_1$
$[m/s]$	$6/789$	$1/188$	$U_1 + U_2$

کار تحقیقاتی استاهل و جیکوبسون [۲۰] که مشابه مطالعه‌ی جیکوبسون و همراک [۲۱] و مطالعه‌ی لی و همراک [۲۲] است برای مقایسه کار حاضر مورد استفاده قرار گرفته‌است. مقایسه‌ی صورت گرفته براساس مختصات هندسی دامنه‌ی وقوع لغزش در طول ناحیه‌ی تماس و همچنین برای نسبت کمینه ضخامت فیلم روان کار به شعاع منحنی معادل ( $R$ ) صورت یافته‌است.

با استفاده از داده‌های جدول ۳، نتایج متناظر هر یک از مطالعات، به دست آمد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره گردید برای مقایسه و اعتبارسنجی نتایج کامپیوتری، مختصات مکان وقوع لغزش و نسبت میان کمینه ضخامت فیلم و شعاع منحنی معادل استفاده شده‌است. جدول ۴ مقایسه مربوطه را نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی داده‌ها با داده‌های مطالعات پیشین نشان دهنده‌ی آن است که نتایج اختلاف کمی با یکدیگر دارند. ناحیه‌ی وقوع لغزش به ویژه با مطالعه‌ی استاهل و جیکوبسون [۲۰] همپوشانی بالایی دارند. درصد اختلاف در میزان  $h_{min}/R$ ، در مقایسه با مطالعه‌ی جیکوبسون و همراک [۲۱] و در پارامترهای این مطالعه،  $28\%$  و با استاهل و جیکوبسون [۲۰]  $15/5\%$  درصد است و در مقایسه با مطالعه‌ی لی و همراک [۲۲] و در پارامترهای این مطالعه،  $15/07\%$  و با استاهل و جیکوبسون [۲۰]  $18/56\%$  درصد است.

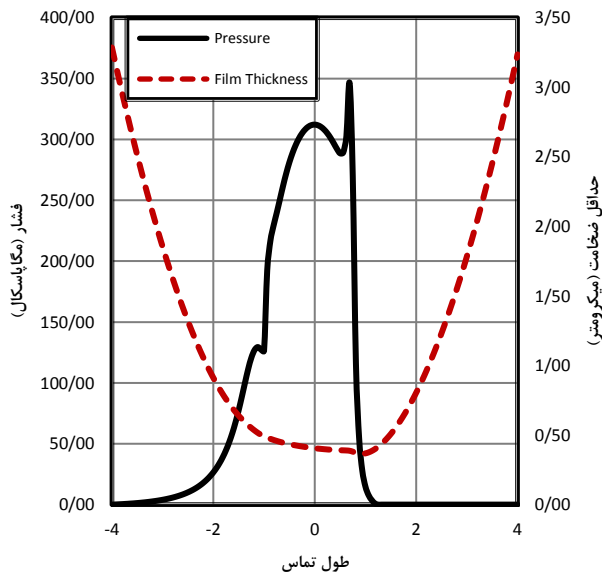
جدول ۴: مقایسه میان نتایج مطالعات پیشین و نتایج مدل حاضر

تحقیق	$h_{min}/R$	ناحیه‌ی وقوع لغزش
-------	-------------	-------------------

$0/87 \leq X \leq 0/87$  رخ می‌دهد؛ این بازه همچنین متناظر با نواحی دارای بیشینه‌ی فشار است. به عنوان نمونه در جدول ۶ میزان فشار در نقاط مجاور با ناحیه‌ی وقوع لغزش و همچنین نقاط دارای بیشینه‌ی فشار داده شده است.

بنابراین می‌توان انتظار داشت، لغزش دیواره در نواحی با بیشینه فشار می‌تواند رخ بدهد.

اولین نقطه‌ی وقوع لغزش	۲۱۶/۵۴	۰/۸۷
نقطه با فشار بیشینه	۳۱۲/۱۷	۰/۰۰
آخرین نقطه‌ی وقوع لغزش	۵۴/۹۱	۰/۸۷
آخرین نقطه مجاور ناحیه‌ی لغزش	۲۸/۱۴	۰/۹۴



شکل ۲: توزیع فشار و ضخامت فیلم در شرایط مندرج در جدول ۵ اصطکاک در طول سطح تماس و ضریب اصطکاک از دیگر پارامترهایی است که برای مقایسه میان حالت‌های وقوع لغزش دیواره و عدم وقوع لغزش دیواره می‌تواند مورد استفاده باشد. محاسبه‌ی نیروی اصطکاک از توزیع فشار گسسته شده و ضخامت لایه روانکار با استفاده از رابطه‌ی زیر انجام می‌گیرد:

$$fr = \sum_{i=1}^N \left( \frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta x} \frac{h_i}{2} + \mu U / h_i \right) \Delta x \quad (20)$$

که در آن  $fr$  نیروی اصطکاک است. بنابراین ضریب اصطکاک نیز به این صورت محاسبه می‌گردد:

جدول ۵: مقادیر ورودی و شرایط کاری روان کاری

پارامتر	مقدار	یکا
نمایه‌ی فشار-لزجت ( $Z$ )	۰/۶۱	[-]
ثابت فشار-لزجت ( $\alpha$ )	$2 \times 10^{-8}$	$[Pa^{-1}]$
تنش برشی حدی در فشار محیط ( $\tau_0$ )	$2 \times 10^6$	$[Pa]$
ضریب تناسب تنش برشی حدی ( $\gamma$ )	۰/۰۲	[-]
مدول الاستیسیته ( $E$ )	$2/11 \times 10^{11}$	$[Pa]$
نسبت پواسون ( $\nu$ )	۰/۳	[-]
لزجت روان کار در فشار محیط ( $\eta_0$ )	۰/۰۴	$[Ns/m^2]$
مجموع سرعت سطوح	۱/۰	$[m/s]$
نسبت سرعت سطوح	۰/۸	[-]
شعاع منحنی سطح زیرین ( $R1$ )	۰/۰۱۷۰	$[m]$
شعاع منحنی سطح بالایی ( $R2$ )	-۰/۱۰۰۵	$[m]$
بیشینه فشار هر تزی ( $P_h$ )	$2/6859 \times 10^8$	$[Pa]$
عرض تماس ( $d$ )	۰/۰۲	$[m]$
بار ( $w$ )	۸۰۰	$[N]$

جدول ۶: فشار در همسایگی ناحیه‌ی وقوع لغزش و نقاط دارای بیشینه فشار

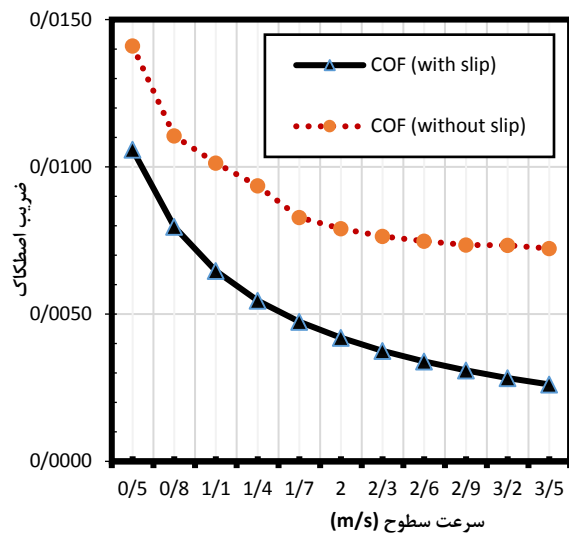
توضیح	فشار $[MPa]$	مکان
اولین نقطه مجاور ناحیه‌ی لغزش	۱۹۲/۴۰	۰/۹۴



۲/۸	$-0.165 \leq X \leq 0.177$
۳/۵	$-0.169 \leq X \leq 0.177$

$$COF = \frac{fr}{W} \quad (21)$$

با محاسبه‌ی طول بازه‌ی وقوع لغزش، مشخص می‌گردد که بیشترین بازه‌ی وقوع لغزش در سرعت‌های بالاتر دیده می‌شود؛ همچنین حد نهایی وقوع لغزش، به‌جز در دو مورد نخست،  $X=0.177$  است. کوچک‌ترین بازه‌ی وقوع لغزش با طولی برابر با  $0.172$  به ازای  $0.5$  متر بر ثانیه بوده و طولانی‌ترین بازه‌ی وقوع نیز با طول  $1/46$  به ازای  $3/5$  متر بر ثانیه بوده است که نشان از افزایش سه برابری طول ناحیه‌ی لغزش با افزایش هفت برابری مجموع سرعت دارد. شکل ۴ برای مقایسه‌ی اثر لغزش بر کارایی روان‌کاری به صورت ضریب اصطکاک در حالت‌های همراه با فرض وقوع لغزش و فرض عدم وقوع لغزش محاسبه و ترسیم شده‌است.



شکل ۴: مقایسه‌ی ضریب اصطکاک با فرض وقوع/عدم وقوع لغزش به ازای سرعت‌های مختلف

افزایش سرعت نرخ تنش برشی را بالا می‌برد و این تنش را به تنش بحرانی نزدیک می‌کند و انتظار لغزش بیشتر را توجیه می‌کند. میزان ضرایب اصطکاک، در حالت وقوع لغزش کم‌تر از حالت عدم وقوع لغزش است. مقایسه میان ضرایب اصطکاک به‌دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مجموع سرعت سطوح، اختلاف میان ضریب اصطکاک سطح در حالت‌های

برای شرایط کاری و داده‌های اولیه‌ی داده شده در جدول ۵، میزان نیروی اصطکاک برابر با  $8/34$  نیوتن بوده و ضریب اصطکاک برابر با  $0.104$  محاسبه گردیده‌است و برای شرایط یکسان به همراه شرط وقوع لغزش به ترتیب برابر  $5/33$  نیوتن و  $0.067$  به‌دست آمده‌است که اختلاف  $55$  درصدی را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت در نظر گرفتن شرط وقوع لغزش در تخمین وضعیت تماس و نیروی اصطکاک بسیار تأثیر دارد.

### ۳-۴ بررسی تأثیر پارامترهای مختلف

در این بخش به بررسی اثر پنج پارامتر مختلف شامل سرعت سطوح، میزان بارگذاری، نسبت سرعت سطوح، تنش برشی حدی اولیه و ضریب تناسب تنش برشی حدی بر روان‌کاری الاستوهیدرودینامیک در دو حالت وقوع لغزش در دیواره و نیز عدم وقوع لغزش در دیواره پرداخته شده‌است. مقایسه‌ی صورت گرفته شامل بررسی بازه‌ی وقوع لغزش، نوع لغزش‌های روی داده در سطح و ضریب اصطکاک است.

### ۳-۴-۱ اثر تغییرات سرعت

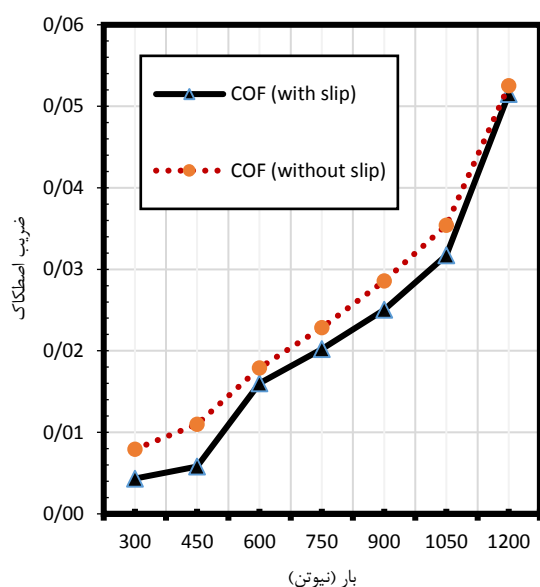
جدول ۷ اثر تغییرات سرعت بر بازه‌ی وقوع لغزش را نمایش می‌دهد. برای این منظور بازه‌های وقوع لغزش برای ۶ مورد از مجموع سرعت سطح‌ها بین  $0.5$  تا  $3/5$  متر بر ثانیه داده شده‌است.

جدول ۷: بازه‌های وقوع لغزش برای سرعت‌های مختلف

سرعت سطوح [m/s]	بازه‌ی وقوع لغزش
0/5	$-0.28 \leq X \leq 0.44$
1/1	$-0.44 \leq X \leq 0.57$
1/7	$-0.53 \leq X \leq 0.77$
2/3	$-0.57 \leq X \leq 0.77$

کارایی روان کاری در حالت‌های با فرض وقوع لغزش و فرض عدم وقوع لغزش، در شکل ۵ نمودار مقادیر ضرایب اصطکاک برای مقایسه ترسیم شده‌است.

در تمامی بارگذاری‌ها، میزان ضریب اصطکاک در حالت وقوع لغزش، کوچک‌تر از حالت عدم وقوع لغزش بوده‌است و با افزایش بارگذاری در هر دو حالت، ضریب اصطکاک افزایش یافته‌است. با این وجود در بارگذاری ۱۲۰۰ نیوتنی، اختلاف بسیار کوچک بوده و تنها در حدود ۲ درصد اختلاف وجود دارد در حالی‌که در ازای بارگذاری ۴۵۰ نیوتنی، اختلاف افزون بر ۸۰ درصدی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: مقایسه‌ی ضریب اصطکاک با فرض وقوع/عدم وقوع لغزش به ازای بارگذاری‌های داده‌شده

### ۳-۴-۳ اثر نسبت سرعت دیواره‌ها بر لغزش

نسبت سرعت دیواره‌ها از جمله پارامترهایی است که به طور ویژه بر روی خواص مرتبط با لغزش مانند نوع و بازه‌ی لغزش اثر گذار است. در جدول ۹ بازه‌ی وقوع لغزش برای ۵ نسبت سرعت متفاوت داده شده‌است.

وقوع و عدم وقوع لغزش افزوده می‌گردد که می‌توان آن را نتیجه‌ی افزایش بازه‌ی وقوع لغزش در مجموع سرعت‌های بالاتر قلمداد نمود. بیش‌ترین این کاهش در بزرگ‌ترین مجموع سرعت، ۹۳/۸۸٪ و کم‌ترین در کوچک‌ترین مجموع سرعت با ۲۸/۳۴٪ بوده‌است.

### ۳-۴-۲ اثر تغییرات بار

جدول ۸ اثر تغییرات میزان بار بر بازه‌ی وقوع لغزش را نمایش می‌دهد. برای این منظور بازه‌های وقوع لغزش برای ۸ مورد میزان بارگذاری دارای مقداری بین ۱۵۰ تا ۱۲۰۰ نیوتن داده شده‌است.

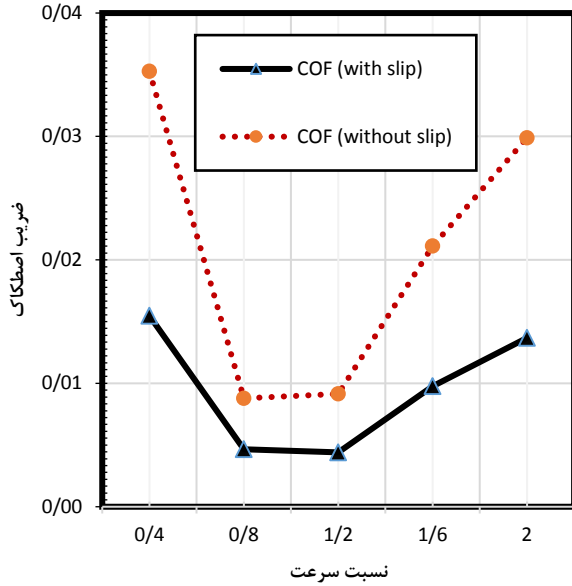
جدول ۸: بازه‌های وقوع لغزش برای بارگذاری‌های متفاوت

میزان بارگذاری [N]	بازه‌ی وقوع لغزش
۳۰۰	$-0.32 \leq X \leq 0.48$
۴۵۰	$-0.19 \leq X \leq 0.73$
۶۰۰	$-0.93 \leq X \leq 0.81$
۷۵۰	$-0.93 \leq X \leq 0.81$
۹۰۰	$-0.93 \leq X \leq 0.85$
۱۰۵۰	$-0.93 \leq X \leq 0.89$
۱۲۰۰	$-1.09 \leq X \leq 0.89$

با انجام مقایسه میان بازه‌های وقوع لغزش مشاهده می‌گردد که افزایش میزان بار منجر به افزایش طول بازه‌ی وقوع لغزش می‌گردد. افزایش بار باعث کاهش ضخامت لایه روانکار شده و در نتیجه تغییرات سرعت در فاصله کوتاه‌تری رخ می‌دهد. این موضوع باعث افزایش تنش برشی شده و احتمال رسیدن آن به حد تنش برشی بحرانی را افزایش می‌دهد. به طوری که در ازای بالاترین مقدار بارگذاری، شاهد بزرگ‌ترین دامنه‌ی وقوع لغزش نیز می‌باشیم. بزرگ‌ترین بازه‌ی وقوع لغزش نیز با طول ۱/۹۸ در  $w=1200N$  روی داده‌است که به نسبت کوچک‌ترین بازه با طول ۰/۸ در  $w=300N$ ، میزان ۱۴۸ درصد به آن افزوده شده‌است. برای مقایسه‌ی

جدول ۹: بازه‌های وقوع لغزش برای نسبت سرعت‌های متفاوت

نسبت سرعت	بازه‌ی وقوع لغزش
۰/۴	$-۰/۹۷ \leq X \leq ۰/۸۱$
۰/۸	$-۰/۷۳ \leq X \leq ۰/۷۷$
۱/۲	$-۰/۶۹ \leq X \leq ۰/۷۷$
۱/۶	$X = -۰/۹۷$ و $-۰/۸۹ \leq X \leq ۰/۸۱$
۲/۰	$-۰/۹۷ \leq X \leq ۰/۸۱$



شکل ۶: مقایسه‌ی ضریب اصطکاک با فرض وقوع/عدم وقوع لغزش به ازای

نسبت سرعت‌های داده‌شده

### ۳-۴ اثر تنش برشی اولیه و ضریب تناسب تنش برشی حدی

#### بر لغزش

تنش برشی حدی در شرایط محیط و ضریب تناسب تنش برشی حدی بر روی تعریف تنش برشی سطح اثر گذار بوده و این اثر از طریق نوع لغزش و بازه‌ی لغزش قابل اثبات است. جدول‌های ۱۰ و ۱۱ اثر این دو پارامتر را بر بازه‌ی وقوع لغزش را نشان می‌دهند.

جدول ۱۰: بازه‌های وقوع لغزش برای تنش برشی حدی های مختلف

تنش برشی حدی در شرایط محیط	بازه‌ی وقوع لغزش
$۱ \times ۱۰^۶$	$-۰/۷۷ \leq X \leq ۰/۸۱$
$۲ \times ۱۰^۶$	$-۰/۶۹ \leq X \leq ۰/۸۱$
$۳ \times ۱۰^۶$	$-۰/۶۵ \leq X \leq ۰/۸۱$
$۴ \times ۱۰^۶$	$-۰/۶۱ \leq X \leq ۰/۸۱$
$۵ \times ۱۰^۶$	$-۰/۵۷ \leq X \leq ۰/۷۷$

با افزایش تنش برشی اولیه، بازه‌ی وقوع لغزش کوچک‌تر می‌گردد.

داده‌های جدول نشان می‌دهد با پنج برابر شدن آن، طول بازه‌ی وقوع

لغزش ۱۶ درصد کاهش یافته‌است. با افزایش تنش برشی اولیه، اندازه‌ی

از جدول ۹ و نمودار شکل ۶ می‌توان استنباط کرد که هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد یا آن‌که به سمت صفر میل نماید، می‌توان بازه‌ی وقوع لغزش بزرگ‌تری را می‌توان انتظار داشت. بزرگ‌ترین بازه‌ی وقوع لغزش در دیواره، به طور مشترک به ازای نسبت سرعت‌های برابر با ۲/۰ و ۰/۴ روی می‌دهد. این بزرگ‌ترین بازه، طولی برابر با ۱/۷۸ دارد. همچنین کوتاه‌ترین طول بازه‌ی وقوع لغزش، به ازای نسبت سرعت ۱/۲، با طول ۱/۴۶ به دست می‌آید که اختلاف ۱۸ درصدی را نشان می‌دهد. با این حال، این گسترش بازه‌ی وقوع لغزش در اثر تغییر نسبت سرعت نمی‌تواند از افزایش اتلاف انرژی به دلیل افزوده شدن به مقدار نیروی اصطکاک جلوگیری نماید. در شکل ۶ نمودار میزان ضرایب اصطکاک برای نسبت سرعت‌های متفاوت در دو حالت وقوع و عدم وقوع لغزش داده شده‌است.

مطابق با مقایسه‌ی صورت گرفته؛ به طور کلی به ازای تمامی نسبت سرعت‌ها، با وقوع لغزش از میزان ضرایب اصطکاک کاسته شده است، یعنی آن‌که صرف وقوع لغزش از میزان نیروی اصطکاک می‌کاهد. با افزایش نسبت سرعت، در خارج از بازه‌ی ۰/۸ تا ۱/۲، ضریب اصطکاک با شیب بسیار تندی افزایش می‌یابد؛ بنابراین باید در انتخاب نسبت سرعت میان دو سطح بالایی و پایینی به این نکته توجه نمود که برای به کار واداشتن بهینه‌ی یاتاقان، انتخاب نسبت سرعت نزدیک به یک، انتخابی درست‌تر خواهد بود.

تنش برشی حدی نیز افزایش یافته است و در نتیجه طول بازه ی وقوع لغزش نیز کاهش می یابد.

جدول ۱۱: بازه های وقوع لغزش برای ضریب تنش برشی های مختلف

بازه ی وقوع لغزش	ضریب تنش برشی حدی
$-0.69 \leq X \leq 0.81$	۰/۰۲
$-0.53 \leq X \leq 0.77$	۰/۰۴
$-0.40 \leq X \leq 0.53$	۰/۰۶
$-0.24 \leq X \leq 0.36$	۰/۰۸
عدم وقوع لغزش	۰/۱۰

با افزایش ضریب تنش برشی نیز از طول بازه ی وقوع لغزش کاسته شده است و در بزرگترین مقدار آن اصلا لغزشی روی نداده است. افزایش ضریب تنش برشی منجر به افزایش اندازه ی تنش برشی اولیه و کاهش بازه ی وقوع لغزش می گردد. البته اثر ضریب تنش برشی در مقایسه با تنش برشی اولیه بیش تر است.

#### ۴- نتیجه گیری:

در مطالعه ی حاضر ضمن استفاده از روش تفاضل محدود، حل عددی برای مسئله ی روان کاری الاستوهیدرودینامیک میان یک سطح صاف و یک استوانه، با فرض وقوع لغزش در ناحیه ی تماس میان دیواره ی جامد و سیال روان کار نیوتنی ارائه شده است. در حل ارائه گردیده، فرض های آرام، هم دما و پایا برای جریان سیال روان کار فرض گردیده است. مطابق با فرضیات مسئله، معادلات حاکم معرفی شدند و سپس ضمن بی بعدسازی و گسسته سازی آن ها با کمک برنامه ی کامپیوتری، حلی عددی ارائه شد. برنامه ی کامپیوتری با به حداقل رساندن مجموع مربعات اجزاء دستگاه معادلات جبری، اقدام به حل آن می نماید و با صفر شدن این مجموع مربعات، به حل دستگاه دست می یابد. حل برای دو حالت فرض وقوع و عدم وقوع لغزش حاصل شده است؛ مهمترین نتیجه بدست آمده از این تحقیق وجود لغزش روس سطوح در تماس روان کاری الاستوهیدرودینامیک

است. نتایج به طور عمومی اثر مثبت لغزش دیواره را بر کارایی روان کاری نشان داده است. نتایج بدست آمده به صورت زیر خلاصه می شود:

- افزایش سرعت سطوح به افزایش دامنه ی وقوع لغزش منجر می شود.
- وقوع لغزش باعث کاهش ضریب اصطکاک می گردد و هر چه میزان سرعت بالاتر بوده، کاهش ضریب اصطکاک نیز بیش تر بوده است. همچنین وقوع لغزش منجر به کاهش بیشینه فشار و کمینه ضخامت فیلم روان کار شده است.
- افزایش میزان بار منجر به افزایش طول بازه ی وقوع لغزش می گردد.
- وقوع لغزش منجر به کاهش ضریب اصطکاک می گردد و هر چه میزان بارگذاری بیش تر باشد، ضریب اصطکاک نیز بزرگ تر خواهد بود.
- بازه ی وقوع لغزش به ازای نسبت های بزرگ یا نسبت ها مایل به صفر، بزرگ تر شده است.
- وقوع لغزش منجر به کاهش ضریب اصطکاک شده است و کم ترین ضریب اصطکاک به ازای نسبت سرعت نزدیک به یک حاصل شده است.
- افزایش  $\tau_0$  و  $\gamma$  منجر به کاهش طول بازه ی وقوع لغزش می گردد، اثر  $\gamma$  در مقایسه با  $\tau_0$  بیش تر است.

#### ۵- فهرست علائم

مدول الاستیسیته معادل	$E'$
ضخامت فیلم	$h$
ضخامت فیلم اولیه	$h_0$
فشار	$p$
بیشینه فشار هرتزی	$p_h$
شعاع انحنای معادل	$R$
پارامتر سرعت بی بعد	$U$
سرعت سطوح	$u_1 \cdot u_2$
سرعت روان کار	$u_{tub1} \cdot u_{tub2}$

تغییر شکل	Deformation	سرعت روان کار در هنگام لغزش	$u_{lub1}^{NN} \cdot u_{lub2}^{NN}$
الاستوهیدرودینامیک	Elastohydrodynamic	بار	w
ضخامت لایه	Film thickness	مختصات	x
تفاضل محدود	Finite difference	ضریب تناسب تنش برشی حدی	$\gamma$
مدل تنش برشی حدی	Limited shear stress model	تغییر شکل سطح	$\delta$
معادله بار	Load equation	لزجت روان کار	$\mu$
روانکاری	Lubrication	لزجت روان کار در فشار محیط	$\mu_0$
سیستم‌های میکروالکترومکانیکی	Micro Mechanical Micro Electrical Systems	چگالی روان کار	$\rho$
		چگالی روان کار در فشار محیط	$\rho_0$
سطح ناهمدیس	Non-comformal surface	تنش برشی روان کار در سطوح	$\tau_1 \cdot \tau_2$
قله فشار (نقطه حداکثر فشار)	Pressure spike	تنش برشی روان کار در فشار محیط	$\tau_0$
		تنش برشی حدی	$\tau_L$
معادله رینولدز	Reynolds equation		
شرط لغزش	Slip condition		
طول لغزش	Slip length		

۶- واژه نامه

۷- مراجع:

- [1] A. A. Nadushan; D Bahrami; and M. Bayareh, " Numerical study of forced convection in a microchannel in the presence of nanofluid using the slip condition", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 34, 4, pp.53-64, (2022). (In Persian)
- [2] S.A. Sajadifar, A. Karimipour, D. Toghraie, "Simulation of the Forced Convection Heat Transfer Non-Newtonian Nanofluid, Aqueous Solution of Carboxymethyl Cellulose-Aluminum Oxide, in Slip Flow Regime Through a Microtube", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 28, 1, pp 47-62, (2017). (In Persian)
- [3] M.R. Meigounpoory, Gh. Atefi, and H. Niazmand, "Analytical Investigation of Slip Effects on Boundary Drag in Flow Around of a Nano Spherical Particle at Low Reynolds Numbers", *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, 21, 2, pp.71-88, (2010). (In Persian)
- [4] M.Kaneta, H. Nishikawa, and K. Kameishi, "Observation of Wall Slip in Elastohydrodynamic Lubrication." *ASME. J. Tribol.* 112(3), pp. 447-452, (1990).
- [5] P. L.Wong, , X. M. Li, and F. Guo. "Evidence of lubricant slip on steel surface in EHL contact." *Tribology International*, 61, pp. 116-119, (2013).
- [6] A. Ponjavic, and J. SS Wong, "The effect of boundary slip on elastohydrodynamic lubrication", *RSC Advances*, 4,40, pp. 20821-20829, (2014).
- [7] L. Guo, P.L. Wong, and F. Guo, "Correlation of contact angle hysteresis and hydrodynamic lubrication", *Tribology Letters*, 58,3, pp. 1-9, (2015).

- [8] X. Jin, J. Wang, Y. Han, N. Sun, and J. Zhu, "Discrepancy in oil film distribution observed in ZEV reciprocating motion", *Industrial Lubrication and Tribology*, 73, 1, pp. 177-189. (2021).
- [9] M. Kalin, and M. Kus, "New strategy for reducing the EHL friction in steel contacts using additive-formed oleophobic boundary films" *Friction*, 9,6, pp.1346-1360, (2021).
- [10] Y. Zhang, and W. Shizhu, "An analysis of elastohydrodynamic lubrication with limiting shear stress: part I— theory and solutions", *Tribology Transactions*, 45,2, pp. 135-144, (2002).
- [11] F. Aurelian, P. Maspeyrot, and M. Hajjam, "Wall slip effects in (elasto) hydrodynamic journal bearings", *Tribology International*, 44, 7-8, pp. 868-877, (2011).
- [12] Q. Chen, H. Jao, L. Chu, and W. Li, "Effects of Anisotropic Slip on the Elastohydrodynamic Lubrication of Circular Contacts", *ASME. J. Tribol.* 138(3), pp. 031502, (2016).
- [13] Y. Zhao, P. L. Wong, and L. Guo. "Linear complementarity solution of 2D boundary slip EHL contact." *Tribology International*, 145, pp.106178, (2020).
- [14] B. W. Sun, L. Chen, L. Guo, W. Wang, and P. L. Wong "Experimental evidence on the enhancement of bearing load capacity by localised boundary slip effect." *Tribology Letters*, 69,2, pp.1-8, (2021).
- [15] B.J. Hamrock, S. R.Schmid, , B.O. Jacobson, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Press, (2004).
- [16] B. O. Jacobson, "Elasto-Solidifying Lubrication of Spherical Surfaces", *ASME Paper*, No. 72-Lub-7, (1972).
- [17] B. O. Jacobson, "On the Lubrication of Heavily Loaded Cylindrical Surfaces Considering Surface Deformations and Solidification of the Lubricant", *ASME Paper*, No. 72-Lub-44, (1972).
- [18] D. Dowson, and G. R. Higginson, *Elastohydrodynamic Lubrication, The Fundamentals of Roller and Gear Lubrication*, Pergamon Press, Oxford, Great Britain, (1966).
- [19] S. Yasutomi, S. Bair, and W. O. Winer, "An application of a free volume model to lubricant rheology I— dependence of viscosity on temperature and pressure," *JASME Journal of Lubrication Technology*, vol. 106, no. 2, pp. 291–303, (1984).
- [20] J. Stahl, and B. O. Jacobson. "A lubricant model considering wall-slip in EHL line contacts." *Journal of Tribology*, 125,3, pp. 523-532, (2003).
- [21] B.O. Jacobson, and B.J. Hamrock. "Non-Newtonian fluid model incorporated into elastohydrodynamic lubrication of rectangular contacts", *Journal of Tribology*, 106,2, pp.275-282, (1984).
- [22] R.T. Lee, and B. J. Hamrock. "A circular non-Newtonian fluid model: Part I—used in elastohydrodynamic lubrication." *Journal of Tribology*, 112, 3, pp. 486-495, (1990).