



مدل سازی روان کاری الاستوهیدرودینامیک مکانیزم پیرو و بادامک مسطح با روان کار گریس به روش چند شبکه ای

امیر ترابی¹، صالح اکبرزاده^{2*}، محمدرضا سلیم پور³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 آبان 1393

پذیرش: 28 دی 1393

ارائه در سایت: 28 بهمن 1393

کلید واژگان:

روانکار غیرنیوتونی

الاستوهیدرودینامیک

پیرو و بادامک

گریس

روش چند شبکه ای

چکیده

مسئله روان کاری پیرو و بادامک از جمله مسایل پر چالش علم تریبولوژی است که در آن بسیاری از مکانیزم های روان کاری نقش دارند. اثراتی نظیر تغییرات گذرا به همراه فشردگی لایه روان کار، تغییر شکل الاستیک سطوح و تغییر خواص روان کار با افزایش فشار به طور همزمان وجود دارند. در این مقاله تلاش شده است تا علاوه بر منظور کردن پارامترهای مختلف مؤثر در این مسئله، اثر استفاده از یک روان کار غیر نیوتونی مانند گریس با استفاده از مدل سازی عددی بررسی شود. مدل رفتاری اسوالد برای گریس به همراه دیگر معادلات حاکم بر مسئله روان کاری الاستوهیدرودینامیک مکانیزم پیرو و بادامک فرمول بندی و با استفاده از روش اختلاف محدود گسسته شده اند. به منظور حل مجموعه معادلات از روش پیشرفته چندشبکه ای استفاده شده و نتایج به صورت مقایسه یک روان کار نیوتونی که روغن پایه گریس محسوب می شود با روان کار غیرنیوتونی گریس ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده با یافته های حاصل از روش های عددی دیگر نظیر نیوتن رافسون صحت سنجی شده است. حل مسئله بیانگر کاهش حداکثر فشار روان کار در هنگام استفاده از گریس و در عین حال کم شدن ضخامت لایه روان کار گریس است. افزایش سرعت باعث افزایش ضخامت لایه روانکار در حالت استفاده از روغن می شود اما اثر محسوسی بر روی ضخامت گریس ندارد.

Modeling elastohydrodynamic lubrication of cam and flat follower mechanism with grease via Multi-grid method

Amir Torabi, Saleh Akbarzadeh*, Mohammad Reza Salimpour

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, s.akbarzadeh@cc.iut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 November 2014
Accepted 18 January 2015
Available Online 17 February 2015

Keywords:
Non-Newtonian Lubricant
Elastohydrodynamics
Cam and Follower
Grease
Multi-Grid Method

ABSTRACT

One of the challenging problems of tribology is cam and follower elastohydrodynamic lubrication due to the simultaneous effect of various lubrication mechanisms. These mechanisms are transient, squeeze film, elastic deformation of contacting surfaces and variation of lubricant properties with pressure. In this paper, besides studying the mentioned factors, the effect of using a non-Newtonian lubricant such as grease is numerically investigated. The lubrication governing equations and Oswald's grease behavior equation have been discretized using finite difference technique. The system of equation has been solved via Multi-Grid method which is an advanced iterative method in solving system of partial differential equations. The results are shown for Newtonian oil compared to grease for different cam rotational speed. Also, different grease behaviors are investigated. The results are verified by comparison of the results obtained using the famous Newton-Raphson method. Findings show that the minimum lubricant thickness as well as the maximum pressure is lower when using grease compared to the case that a Newtonian lubricant is used. In the case of Newtonian lubricant, increasing the speed results in an increase in the lubricant film thickness but it is shown that, in the case of Non-Newtonian lubricant, speed does not affect the lubricant thickness.

1- مقدمه

در علم تریبولوژی است. در این مکانیزم به خاطر تغییر پروفیل بادامک و پیرو در محل تماس شرایط کلی سطح تماس و از جمله شعاع انحنا، لحظه به لحظه با چرخش بادامک در حال تغییر است. در کل علاوه بر ویژگی های روان کاری سطوح ناهمديس، یک مسئله حالت گذرا نیز هست. تغییر لحظه ای شعاع انحنا روی سرعت ورود روان کار به فضای بین محل تماس دو جسم

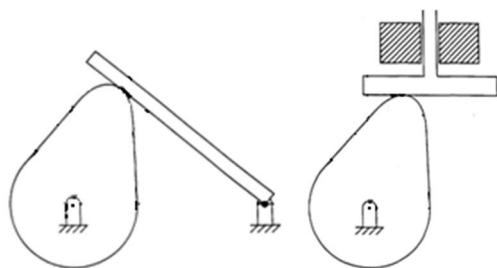
مکانیزم پیرو و بادامک برای ایجاد یک حرکت خاص تکرارشونده در ماشین توسط دو یا چند قطعه که یکی از آنها شکلی شبیه بادام دارد، بکار می رود. در شکل 1 نمایی از مکانیزم پیرو و بادامک نشان داده شده است. ولی مسئله روان کاری مکانیزم پیرو و بادامک یک مسئله عام تماس دو سطح ناهمديس

Please cite this article using:

A. Torabi, S. Akbarzadeh, M.R. Salimpour, Modeling elastohydrodynamic lubrication of cam and flat follower mechanism with grease via Multi-grid method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 41-50, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[8-11]. گولزارچ و گرین وود نشان دادند که بیشتر گریس ها رفتار شبه پلاستیک از خود نشان می دهند [12]. با آن که تنش برشی در یک نرخ برش مشخص کمتر از تنش برشی روغن پایه مربوطه نمی شود، ممکن است ضخامت لایه روانکار کمتر از حالت مربوط به روغن پایه شود. علت آنرا جریان گرمایی سیال در ورودی ها دانسته اند. جانکیز و کرژمینسکی فردا با کار عددی تأیید کردند که مقادیر برون یابی شده ضخامت لایه روان کار در فرمول های روان کاری الاستوهیدرودینامیک برای روغن پایه تقریب خوبی برای استفاده در مواقعی است که از گریس به عنوان روان کار استفاده شود [13]. علت آنرا جریان گرمایی سیال در ورودی ها دانسته اند. جانکیز و کرژمینسکی فردا با کار عددی تأیید کردند که مقادیر برون یابی شده ضخامت لایه روان کار در فرمول های روان کاری الاستوهیدرودینامیک برای روغن پایه تقریب خوبی برای استفاده در مواقعی است که از گریس به عنوان روان کار استفاده شود [13]. جنگ نیز تحقیق جامعی در مورد رفتار گریس ها با استفاده از روش عددی ارائه کرده است [14]. وی امکان جامد شدن گریس را تحت تنش مطرح می کند و به جریان متفاوت آن با سیال روغن می پردازد. محققین زیادی تلاش داشته اند تا روان کاری گذرا با گریس را به صورت تجربی آزمایش کنند. سوگیمورا و آکیاما با تکنیک استفاده از گریس های فلورسنت روی دستگاه آزمایشگاهی گوی و دیسک اقدام به بررسی تجربی این وضعیت نموده اند [15]. لو و خوانساری در تحقیقی تجربی یاتاقان ژورنالی که با گریس روان کاری شده و حرکت نوسانی دارد را مورد بررسی قرار داده اند [16]. حرکت نوسانی که نوعی حرکت گذراست سبب تغییر لحظه ای رژیم روان کاری از هیدرودینامیکی تا مخلوط و شدت بروز اصطکاک شده است. همچنین آنها پیشتر در تحقیق دیگری اثر روان کاری با گریس را در یاتاقان های ژورنال با استفاده از روش تجربی بررسی کردند [17]. اثر پارامترهایی نظیر بار، نوع گریس و جنس مواد یاتاقانی از جمله مواردی بودند که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حل حاکی از نازک بودن بیش از حد لایه روان کار و قرار گرفتن رژیم روان کاری مخلوط بوده است. کوزیو و همکارانش در تحقیق تجربی نسبتاً جدیدی سه نوع گریس متفاوت را با دستگاه آزمایشگاهی پین روی دیسک آزمایش کردند تا رابطه ای بین ضخامت لایه گریس و خواص آن پیدا کنند [18]. بررسی تجربی مکانیزم پیرو و بادامک مسئله بسیار دشوارتری است و تاکنون دستگاه دقیقی برای بررسی تجربی معرفی نشده است. ولا و همکاران در تلاشی قابل توجه دستگاهی را با محدودیت حرکت پیرو ارائه کرده اند که نتایج آن قابل استناد برای بحث صحنه سنجی نیست [19]. در تحقیق های عددی برای حل مسئله معمولاً ناحیه حل را به سه بخش تقسیم می کنند. روش تکراری پیش رونده در ناحیه های کم فشار که متناظر با ورودی و خروجی است و روش تکراری معکوس در ناحیه مرکزی پرفشار استفاده می شوند. همچنین برای محدود کردن نوسانات فشار و دستیابی به همگرایی از ضرایب رها سازی بهره برده شده است. روش رها سازی خواص تصحیح خطای خوبی دارد ولی در عوض بسیار کند است. نکته اساسی در اینجا است که در گسسته سازی معادلات دیفرانسیل جزئی خطا با طول موج متناسب با اندازه شبکه کاهش می یابد.



شکل 1 طرح شماتیک مکانیزم بادامک و پیرو مسطح [20]

تأثیر می گذارد. این سرعت در برخی مواقع از دوره کاری مکانیزم می تواند صفر شود و یا جهت ورود روان کار معکوس گردد که در این حالت ها سطح تماس با وضعیت روان کاری ناکافی روبرو خواهد شد. احتمال تماس فلز با فلز افزایش یافته و ممکن است سایش و خرابی سطوح را در پی داشته باشد. مطلوب ترین طراحی برای داشتن عملکرد بهینه یک مکانیزم پیرو و بادامک از نظر کاهش اصطکاک و سایش آن است که این دو قطعه به طور کامل توسط یک لایه روان کار از هم جدا شوند و امکان درگیری زبری های دو سطح وجود نداشته باشد. این مهم محقق نمی شود مگر آنکه در مرحله طراحی همه عوامل مؤثر با دقت مناسب برای مدل سازی روان کاری پیرو و بادامک در نظر گرفته شوند.

مهمترین عامل تأثیرگذار بر شرایط تماس که در مدل سازی روان کاری باید مورد توجه قرار گیرد، اثرات فشار بالای ایجاد شده در عرض لایه روان کار است. در تماس ناهمدیس همراه با روان کاری با افزایش بار عمودی وارده بین دو جسم سطح تماس تغییر چندانی ندارد و فشار در لایه روغن افزایش پیدا می کند؛ مشاهده شده که فشار می تواند تا 2GPa بالا برود [1]. در چنین فشارهایی سطوح تماس تغییر شکل الاستیک می دهند و دیگر صلب نخواهند بود. این تغییر شکل فضای بیشتری به روان کار می دهد تا دو سطح را از هم جدا کند که به آن روان کاری الاستوهیدرودینامیک می گویند.

دستیابی به این مدل تریبولوژیکی برای مکانیزم پیرو و بادامک توجه محققان زیادی را به خود معطوف کرد. داوسون و همکارانش با فرض سطوح کاملاً صلب برای بادامک و پیرو یک تحلیل شبه گذرا با در نظر گرفتن فشردگی شدن لایه روغن ارائه دادند [2]. گسیم روانکاری بادامک و پیرو غلتان را مورد بررسی قرار داده است [3]. او در تحلیل خود با صرف نظر از نشتی جانبی و فرض عدم لغزش در ناحیه تماس، اثر فشردگی شدن لایه روغن و اثرات گرمایی را برای محاسبه تغییر ضخامت لایه روغن مدل کرده است. داوسون و همکارانش در ادامه تحقیق قبلی خود بر پایه یک تحلیل گذرا با استفاده از اصول الاستوهیدرودینامیک برای منظور کردن تغییر شکل الاستیک سطوح تحت فشار بالای تماس، مسئله را مورد بررسی قرار داده اند [4]. در نظر گرفتن حالت گذرا برخلاف تحلیل شبه استاتیک قبلی سبب شد تا پیش بینی نبود لایه روغن در سرعت ورود صفر اصلاح شود. برجسته ترین کار در تحلیل عددی پیرو و بادامک با در نظر گرفتن نشتی جانبی، تغییر شکل الاستیک، فشردگی شدن لایه روغن و تغییرات زمانی توسط کوشواها و راهنجات انجام شده است [5]. آنها روانکاری یک بادامک سیکلوئیدی و پیرو تخت را با تحلیل دینامیکی نسبتاً کاملی شامل دینامیک غیرخطی فدر ارائه کردند. سیول جانگ در دومین مقاله خود محاسبه ضخامت لایه روغن را در تماس خطی دارای غلتش و لغزش بررسی کرده و برای این حالت مکانیزم پیرو و بادامک را مثالی مناسب در نظر گرفته است [6]. این تحقیق با در نظر گرفتن مدل دینامیکی دقیق تر و محاسبه ضخامت لایه روانکار با در نظر گرفتن شرط فشردگی شدن لایه روانکار تکمیل تحقیق قبلی وی در این زمینه محسوب می شود. در این تحقیق ها، تنها مدل سازی روان کاری پیرو و بادامک با روان کار روغن نیوتنی بحث شده است. ناکاهارا و همکاران روانکاری پیرو و بادامک را با در نظر گرفتن اثرات گرمایی شامل تولید حرارت به خاطر تماس زبری ها و ویسکوزیته متغیر تحلیل کردند [7] ولی تاکنون اثر روان کارهای غیر نیوتنی مانند گریس ها روی این مکانیزم بررسی نشده است.

تلاش های متعددی برای مدل سازی عددی روان کاری الاستوهیدرودینامیک با گریس انجام شده و پارامترهای متعددی از فشردگی شدن لایه روان کار، شرط مرزی حفره زایی، نوع گریس و اضمحلال لایه روان کار در آنها بررسی شده است

که در آن m_{eq} جرم معادل مجموعه مکانیزم در حرکت انتقالی است و به صورت رابطه (5) تعریف می شود:

$$m_{eq} = m_v + m_T + \frac{1}{3} m_{sp} \quad (5)$$

توجه شود که جرم فنر، m_{sp} ، جرم پیرو، m_v ، و جرم متعلقات پیرو، m_T ، قابل صرف نظر کردن نیست و باید در نابالانسی انتقالی دینامیک سیستم در نظر گرفته شود. نیروی تماسی در نقطه دلخواه روی سطح مجموع نیروی ناشی از فنر و پیش بارگذاری پیرو است که به صورت رابطه (6) بیان می شود:

$$F_{ck} = k_{sp}s + F_p \quad (6)$$

که در آن k_{sp} ثابت فنر، s خیز پیرو و F_p نیروی پیش بار است و با در نظر گرفتن نیروهای اینرسی، ناشی از چرخش بادامک با سرعت زاویه ای ω نیروی تماس طبق رابطه (7) خواهد شد:

$$F_{ck} = k_{sp}s + F_p + m_{eq}\omega^2 J_0 \quad (7)$$

این نیرو در عرض تماس پیرو و بادامک، d ، عمل می کند و بنابراین نیرو بر واحد طول را به صورت رابطه (8) بیان می کنند:

$$F = \frac{F_{ck}}{d} \quad (8)$$

مدل دینامیکی فوق به سادگی اتفاقات دینامیکی روی داده در مکانیزم پیرو و بادامک را بیان می کند و برای انجام تحلیل روان کاری مناسب است.

2-2- معادله رفتار روان کار

خواص روانکارهای معمول و به خصوص لزجت و چگالی آنها با فشار و دما متغیر است. وقتی از اثرات گرمایی صرف نظر شده باشد و حالت ساده شده همدمایی در نظر گرفته شود، معادلات حاکم بر تغییرات لزجت و چگالی روانکار با فشار برای روانکارهای معمولی مانند روغن پایه گریس به قرار روابط (9) و (10) هستند [21]:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{0.6p}{1 + 1.7p}\right) \quad (9)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\eta}{\eta_0} = \exp\{(\ln \eta_0 + 9.67)[(1 + 5.1 \times 10^{-9}p)^{0.68} - 1]\} \quad (10)$$

اما گریس نوعی روان کار است که با افزودن عامل ضخیم کننده مانند صابون-های فلزی به روغن به صورت ماده ای شبه جامد یا ژله ای بدست می آید. فیبرهای صابون ساختاری مش گونه برای نگهداری روغن شکل می دهند. ساختار سه بعدی فیبرهای گریس به گونه ای است که فرایند روان کاری آنرا کاملاً پیچیده، متغیر با زمان و همراه با اثرات ویسکو پلاستیک خواهد کرد. گرانیرو گریس معمولاً با کاهش نرخ کرنش برشی افزایش می یابد و ارتباط نرخ تنش و کرنش برشی در آن خطی نیست. همچنین در گریس ها معمولاً یک آستانه تحمل تنش برشی وجود دارد و تا هنگامی که تنش برشی از این حد آستانه فراتر نرود مانند یک جامد رفتار می کند [22]. در هنگام جریان لایه گریس، سرعت عمود بر لایه روان کار جاری ثابت است. گریس وقتی تحت نرخ برش مشخصی جریان می یابد، هم تنش برشی و هم گرانیرو به تدریج با زمان رو به کاهش می گذارند.

رفتار گریس را معمولاً به صورت رابطه اسوالد یا بینگهام و یا صورت کلی تر هرشل - بالکلی به صورت رابطه (11) بیان می کنند [23].

$$\tau = \tau_s + \eta \dot{\gamma}^n \quad (11)$$

که در آن معمولاً $n < 1$ و η گرانیرو پلاستیسیته مشابه گرانیرو روغن است. این مدل نزدیک ترین نتایج نسبت به تجربی را به خصوص در سرعت های پایین، سرعت بدون بعد کمتر از 10^{-8} ، بدست می دهد [22]. اگر $n=1$ باشد، مدل هرشل - بالکلی به مدل بینگهام تبدیل می شود و هنگامی که تنش آستانه τ_s صفر باشد، به مدل اسوالد می رسیم. بنابراین مدل مطرح شده

اگر این طول موج ها نسبت به اندازه مش بزرگ باشند، همگرایی آهسته خواهد بود. مشخص است که یک خطای هموار بیانگر حل در یک شبکه درشت است. با استفاده از شبکه های اندازه درشت برای حل مؤلفه های خطای هموار، یک سرعت همگرایی مستقل از شبکه بدست خواهد آمد که منجر به الگوریتمی برای حل مسئله در N عملیات می گردد. این الگوریتم پیشرفته به عنوان روش چند شبکه ای شناخته می شود و روشی است که در این مقاله برای مدل سازی استفاده شده است.

در این مقاله مسئله مدل سازی روان کاری مکانیزم پیرو و بادامک با روان کاری گریس حل شده و نتایج تحلیل با روان کاری روغن مقایسه گردیده است. بدین منظور ابتدا معادلات حاکم بر مسئله از قبیل معادلات حرکتی مکانیزم تا معادلات بقای جرم و اندازه حرکت بیان شده و سپس در بخش بعدی نحوه گسسته سازی و آماده سازی آن ها برای حل در چارچوب روش عددی چند شبکه ای تشریح شده است. سپس نتایج و تحلیل آنها ارائه گردیده است. برای صحت سنجی نیز از نتایج مدل سازی الاستوهیدرو دینامیک با روش نیوتن رافسون استفاده شده است.

2- معادلات حاکم بر مسئله

مهمترین مسئله در مکانیزم پیرو و بادامک متغیر بودن مشخصات تماس، سرعت و بار است. بنابراین بدست آوردن معادلات حاکم بدون حل سینماتیک و دینامیک آن میسر نیست. در تحلیل های تریبولوژی قطعات در حال تماس، می توان دو سطح با انحناهای مختلف را به یک سطح مسطح و یک سطح مدور تصویر کرد. بنابراین حل مسئله برای مکانیزم تماس مستقیم مسطح انجام گردیده است.

2-1- سینماتیک و دینامیک

از نگاه سینماتیک، در تماس پیرو و بادامک مسطح امکان ترکیب لغزش و غلتش مشاهده می شود که نیازمند تحلیل جامع در این زمینه است. معادلات حرکتی دو جسم نسبت به یکدیگر برای محاسبه سرعت ورود روانکار به فضای تماس کاربرد دارند. این معادلات برای هفت مکانیزم مختلف پیرو و بادامک نوسانی و رفت و برگشتی توسط متیو و همکاران ارائه شده است [20]. ورودی این روش، حرکت پیرو است که شامل منحنی صعود، سرعت زاویه ای بادامک و هندسه مکانیزم می شود. شعاع انحنا در نقطه تماس با استفاده از ضرایب سینماتیکی محاسبه شده و از جمع برداری سرعت ها در این نقطه، سرعت ورود محاسبه می شود. به صورت ساده برای یک مکانیزم پیرو و بادامک مسطح مقادیر شعاع انحنا تماس به قرار رابطه (1) است:

$$R = R_0 + L + J_0 \quad (1)$$

که در آن R_0 شعاع دایره مبنا، L مقدار خیزش پیرو و J_0 شتاب هندسی یا مشتق دوم خیزش پیرو نسبت به زاویه چرخش بادامک است. اگر ω سرعت چرخش بادامک باشد، سرعت ورود روان کار و سرعت بدون بعد از رابطه (2) بدست می آید [20]:

$$U = \frac{1}{2}(\omega R + \omega J_0) = \frac{\omega}{2}(R_0 + L + 2J_0) \quad (2)$$

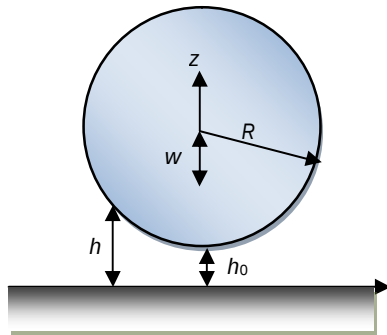
$$\bar{U} = \frac{\eta U}{E'R}$$

برای پیرو مسطح، بادامک صلب فرض شده و از چرخش پیرو صرف نظر می شود. در این تحلیل شتاب پیرو از رابطه (3) بدست می آید:

$$a_F = \frac{d^2 s}{dt^2} = \omega^2 J_0 \quad (3)$$

بنابراین نیروی اینرسی ناشی از این شتاب نیز به قرار رابطه (4) است:

$$F_V = m_{eq}\omega^2 J_0 \quad (4)$$



شکل 2 نگاشت تماس به دایره و سطح و نمایش پارامترها

که در آن h_0 ضخامت لایه روانکار در مرکز مختصات قبل از تغییر شکل سطح، عبارت دوم سمت راست همان فاصله بین سطح جسم معادل تغییر شکل نیافته و یک سطح مسطح و سرانجام تغییر شکل الاستیک واقعی سطح جسم معادل از حالت اولیه اش است. شکل کمانش سطح در درون و برون محدوده اثر بار در جهت x با اندکی محاسبات به صورت رابطه (19) بدست می آید [21]:

$$w(\bar{x}) = \pi [\ln(4a) + 0.5 - \bar{x}^2], 0 \leq \bar{x} \leq 1$$

$$w(\bar{x}) = \pi \left\{ \bar{x} \sqrt{\bar{x}^2 - 1} - \ln \left[\bar{x} + \sqrt{\bar{x}^2 - 1} \right] + [\ln(4a) + 0.5 - \bar{x}^2] \right\}, \bar{x} \geq 1 \quad (19)$$

که در آن a نیم عرض توزیع فشار هرتزین و $\bar{x}$ مختصات طولی بدون بعد محل محاسبه کمانش است.

5-2- معادله بار

بار حمل شده توسط لایه روانکار الاستوهیدرودینامیک از انتگرال گیری توزیع فشار در آن بدست می آید، در حالت یک بعدی یا تماس خطی حاصل تقسیم بار بر طول تماس مطرح بوده که برابر با انتگرال فشار در عرض تماس است و به صورت معادله (20) بدست می آید:

$$\frac{W}{d} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} p dx \quad (20)$$

که در آن d عرض بادامک و $x_{\min}$ و $x_{\max}$ محدوده طولی توزیع فشار است.

3- آماده سازی و روش حل

الگوریتم حل مسئله روان کاری مکانیزم پیرو و بادامک در شکل 3 آورده شده است. جزئیات مراحل روش حل در این شکل مشخص شده است و بخش حل توزیع فشار و همگرایی که از پیچیدگی برخوردار است، در این بخش ارائه شده است.

در روان کاری هدف از حل یافتن توزیع فشار است و پارامترهای دیگر جریان نظیر سرعت ها از اهمیت کمتری برخوردارند. به همین منظور روش های عددی که برای حل مسئله روانکاری استفاده می شوند عموماً بر پایه گسسته سازی به روش اختلاف محدود استوار هستند. معادله رینولدز در حالت یک بعدی، یک معادله مشتق جزئی غیرخطی است که از گسسته سازی صورت بدون بعد آن برای روغن نیوتنی به صورت رابطه (21) خواهد شد:

$$\frac{\varepsilon_{i-\frac{1}{2}} P_{i-1} - P_i \left(\varepsilon_{i-\frac{1}{2}} + \varepsilon_{i+\frac{1}{2}} \right) + \varepsilon_{i+\frac{1}{2}} P_{i+1}}{\Delta X^2} = \frac{\bar{p}_i H_i - \bar{p}_{i-1} H_{i-1}}{\Delta X} + \frac{\bar{p}_i H_i^n - \bar{p}_{i-1} H_{i-1}^n}{\Delta T} \quad (21)$$

که در آن P و H به ترتیب فشار و ضخامت بدون بعد، E' مدول الاستیسیته معادل دو سطح است و دیگر پارامترها به صورت زیر تعریف می شوند [21]:

$$\varepsilon = \frac{\bar{p} H^3}{\psi \eta}, \psi = 12 \frac{\bar{u} \eta_0 R^2}{P_h a^3}, a = R \sqrt{\frac{8W}{\pi}}, P_h = E' \sqrt{\frac{W}{2\pi}}, \varepsilon_{i \pm \frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (\varepsilon_i + \varepsilon_{i \pm 1}), P = \frac{p}{P_h}, H = \frac{hR}{a^2} \quad (22)$$

عمومیت بیشتری دارد. پارامترهای مدل η و τ_s تابعی از فشار هستند و n را مستقل از فشار می گیرند. در این مقاله با توجه به حجم بالای محاسبات از مدل اسوالد استفاده شده تا هم کلیت موضوع و هم ساده تر شدن حل رعایت شود. این مدل را می توان به صورت رابطه (12) بازنویسی کرد:

$$\left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{\eta} (\tau) \quad (12)$$

از تعادل نیرو روی یک المان سیال طبق رابطه (13) داریم:

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (13)$$

از ترکیب دو رابطه اخیر و شرایط مرزی زیر:

$$y = \frac{y_c}{2}: \frac{\partial u}{\partial y} = 0, y = \frac{h}{2}: u = U \quad (14)$$

که در آن h ضخامت لایه روان کار و y_c اندازه عرض قسمتی از جریان بوده که در آن سرعت ثابت است می توان سرعت در راستای طولی عرض تماس را به قرار رابطه (15) بدست آورد [14]:

$$u = U - \frac{n}{n+1} \left(\frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{h}{2} - \frac{y_c}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} - \left(y - \frac{y_c}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (15)$$

با قرار دادن رابطه فوق در معادله بقای جرم به معادله رینولدز حاکم بر مسئله روان کاری گریس خواهیم رسید که در بخش بعدی صورت نهایی آن آورده شده است.

2-3- معادلات بقای جرم و اندازه حرکت

برای سیالات نیوتنی از معادله بقای جرم و ممنتوم همانند همراک و همکاران [21] می توان معادله رینولدز یک بعدی را بدست آورد که صورت کلی آن در یک بعد به قرار رابطه (16) است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12U \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + 12 \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} \quad (16)$$

معادله حاکم بر روان کار گریس مشابه دیگر روان کارهای روغنی است. البته به خاطر آنکه معادله رفتار گریس متفاوت از رفتار روغن نیوتنی است و تنش برشی آستانه ای نیز وجود دارد، لایه روان کار به دو بخش تقسیم می شود که به ترتیب بخش لایه بدون برش و بخش لایه برشی هستند. این دو بخش باید به صورت مجزا بررسی شوند. با استفاده از مدل اسوالد، معادله رینولدز به صورت معادله 17 بدست می آید. جزئیات بیشتر استخراج این معادله را چنگ در تحقیق خود ذکر کرده است [14].

$$\frac{n}{2n+1} \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^{\frac{2n+1}{n}} \left(\frac{1}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{\frac{1}{n}} \right) = U \frac{\partial}{\partial x} (\rho h) + \frac{\partial (\rho h)}{\partial t} \quad (17)$$

این معادلات باید با شرایط مرزی صفر بودن فشار در ورودی و شرط مرزی حفره زایی در خروجی حل شوند. شرط حفره زایی به معنای آن است که در خروجی به خاطر هندسه واگرای دو سطح امکان بروز فشار منفی وجود دارد. این مسئله در واقعیت ممکن نیست و فشار از فشار بخار سیال در دمای مربوطه که بسیار به صفر نزدیک است، کمتر نمی شود. بنابراین خروجی را جایی فرض می کنند که فشار و شیب آن صفر شود و بعد از آن موقعیت فشار منفی از حل بدست آید. در حل نیز فشارهای منفی را با صفر جایگزین می کنند.

2-4- معادله هندسه لایه روانکار

با صرف نظر کردن از زبری سطح، ضخامت لایه روانکار در یک بعد را مطابق شکل 2 می توان با بسط تیلور هندسه دایره ای به صورت رابطه (18) بیان کرد:

$$h(x) = h_0 + \frac{x^2}{2R} + w(x) \quad (18)$$

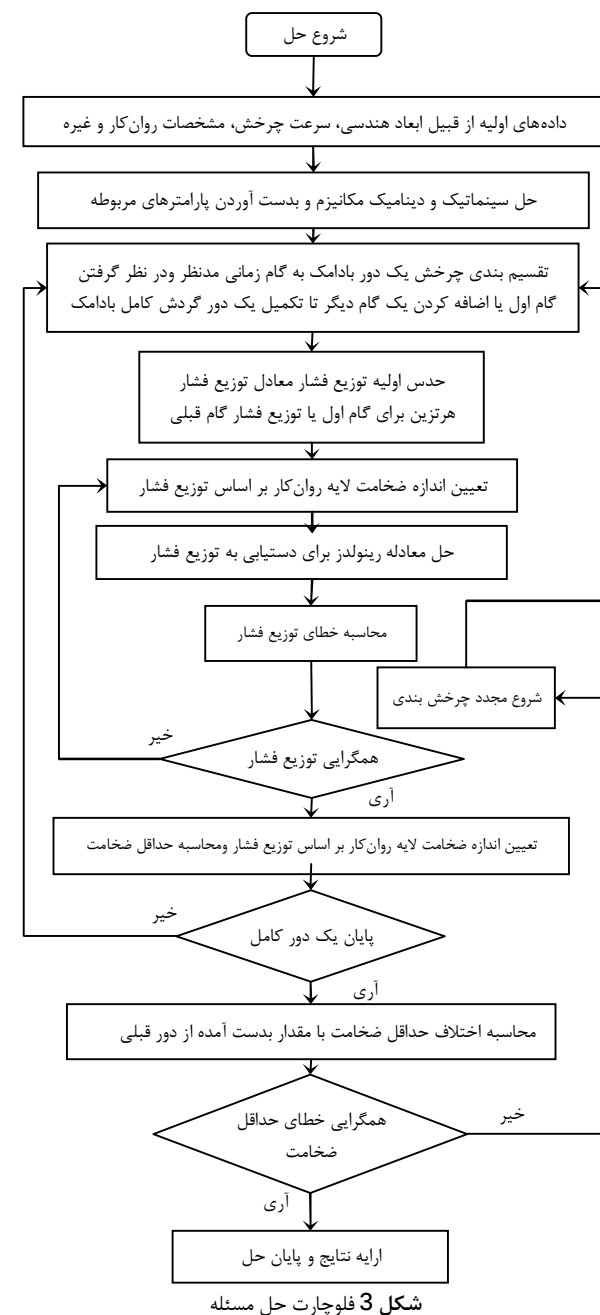
درشت انجام شود.

راهکار ساده تر آن است که از یک الگوی ثابت دوره ای بین شبکه ریز و درشت استفاده شود. به عبارتی پس از چند بار مشخص انجام رهاسازی انتقال از ریز به درشت انجام شود و ادامه کار پیگیری گردد. از آنجا که ممکن است با یک مرحله درشت کردن شبکه هزینه محاسباتی کم نشود، فرایند درشت کردن آن قدر ادامه می یابد تا به شبکه بهینه برسیم. الگوریتم روش چند سطحی در شکل 4 نشان داده شده است.

در حل مسئله حاضر تعداد رهاسازی روی هر مش ریزتر یک بار و روی هر مش درشت تر 19 بار است. متغیر بار بدون بعد در درشت ترین شبکه برابر $\pi/2$ است و در هر بار ریزتر شدن و درشت تر شدن شبکه به صورت رابطه (28) اصلاح می شود.

$$W_{K-1} = W_{K-1} - \Delta X \times \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) \quad (28)$$

$$W_{K-1} = W_{K-1} + \Delta X \times \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right)$$



شکل 3 فلوچارت حل مسئله

برای گریس معادله رینولدز به صورت رابطه (23) در می آید:

$$\frac{\varepsilon_{i+\frac{1}{2}}(P_{i+1} - P_i)^{\frac{1}{n}} - \varepsilon_{i-\frac{1}{2}}(P_i - P_{i-1})^{\frac{1}{n}}}{\Delta X^{1+\frac{1}{n}}} = \frac{\bar{p}_i H_i - \bar{p}_{i-1} H_{i-1}}{\Delta X} + \frac{\bar{p}_i H_i^n - \bar{p}_{i-1} H_{i-1}^n}{\Delta T} \quad (23)$$

که در آن

$$\lambda = \frac{P_h^{\frac{1}{n}} a^{(2+\frac{1}{n})}}{2\bar{u} \left(2 + \frac{1}{n} \right) R^{(2+\frac{1}{n})} \eta_0^{\frac{1}{n}}}, \quad \varepsilon = \lambda \frac{\bar{p} H^{(2+\frac{1}{n})}}{\eta^n} \quad (24)$$

ارتباط پیچیده بین ضخامت و فشار در این معادله حل مسئله را دشوار می سازد. روش های متعددی برای حل این معادله در مقالات ارائه شده است. انتخاب روش بهینه به مقدار بار عمودی، سرعت و خواص روانکار بستگی دارد. برای حل این مسئله معمولاً از روش های تکراری استفاده می شود [24]. در این روش ها مقادیر جدیدی که در هر تکرار بدست می آیند را مستقیماً در تکرار بعدی استفاده نمی کنند و ترکیب خطی از مقادیر جدید و مقادیر تکرار قبلی را به صورت رابطه (25) استفاده می کنند.

$$\bar{P}_i = P_i + c \delta_i \quad (25)$$

که در آن c ضریب رها سازی، P_i فشار در تکرار قبلی و $\bar{P}_i$ فشار در تکرار جدید است. برای تصحیح فشار عموماً از روش گاوس سایدل در ناحیه کم فشار استفاده می شود و برای پرهیز از واگرایی جواب در ناحیه پرفشار روش ژاکوبی به کار می رود [25]. مرز بین ناحیه پرفشار و کم فشار نیز از مقایسه عبارات معادله رینولدز بدست می آید. برای این منظور از معادله (21) نسبت به P_i مشتق گرفته و عبارات بدست آمده از سمت چپ و راست معادله را مقایسه کرده، در صورتی که سمت چپ بزرگتر باشد در ناحیه کم فشار بوده و از روش تکرار گاوس سایدل مطابق رابطه (26) استفاده می نماییم. در غیر این صورت در ناحیه پرفشار قرار داشته و روش تکرار ژاکوبی یا رابطه (27) پیشنهاد می شود.

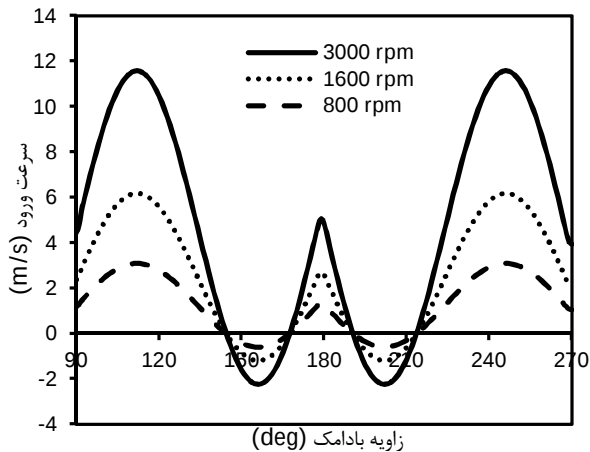
$$\delta_i = \left(\frac{\partial L_i}{\partial P_i} \right)^{-1} \gamma_i \quad (26)$$

$$\delta_i = \left(\frac{\partial L_i}{\partial P_i} - \frac{\partial L_i}{\partial P_{i-1}} \right)^{-1} \bar{\gamma}_i \quad (27)$$

که در آن L_i و γ_i همان صورت گسسته شده معادله حاکم یا معادله رینولدز هستند. در این روش انتخاب ضرایب رهاسازی بسیار در همگرایی اهمیت دارد که معمولاً به صورت تجربی تعیین می گردند.

اما این روش کاستی های خود را نیز دارد که همانا کندی همگرایی است. در چند رهاسازی اولیه مؤلفه های فرکانس بالا کاملاً از خطا حذف می شوند. بنابراین پس از چند تکرار، مؤلفه هایی با طول موج بزرگ نسبت به اندازه مش بر خطا حاکم می شوند. با هموار شدن خطا، دیگر نیازی به مش ریزتر جهت افزایش دقت نخواهد بود. بنابراین به جای آنکه فرایند رهاسازی روی شبکه ابتدایی ادامه بیابد، پس از آنکه سرعت همگرایی کاهش یافت، می توان به یک شبکه درشت تر رفته تا حل تقریبی با هموار ماندن خطا بدست آید. از آنجا که نسبت طول موج خطا به اندازه مش کوچک تر شده و از طرفی به خاطر تعداد نقاط کمتر شبکه درشت تر حجم محاسبات فرایند رهاسازی کاهش خواهد یافت، سرعت همگرایی بیشتر می شود. به محض اینکه تقریب خطا روی شبکه درشت حل شد، می توان آنرا روی شبکه اصلی میان یابی کرد. با انجام چند تکرار در این شبکه خطاهای فرکانس بالای ناشی از میان یابی حذف می شوند. جزئیات کامل برای انتقال و میان یابی در مرجع [26] آورده شده است.

نکته مهم موقع شناسی برای رفتن از شبکه ریز به درشت و برعکس است. دو روش برای این کار وجود دارد. روش اول این است که خطاها زیر نظر گرفته شود، در صورتی که از مقدار مشخصی کمتر شد، تبدیل شبکه ریز به



شکل 7 منحنی تغییرات سرعت ورود روانکار برحسب زاویه چرخش بادامک

4- نتایج شبیه‌سازی دینامیکی

انواع حرکت پیرو عبارت‌اند از سرعت ثابت، شتاب ثابت، هارمونیک، سیکلوئیدی و غیره که برای هر کدام می‌توان پروفیل مشخصی را برای پیرو مسطح رفت و برگشتی بدست آورد.

بادامک انتخاب‌شده برای تحلیل از نوع منحنی خیزش سیکلوئیدی مطابق رابطه (29) با مشخصات جدول 1 به صورت زیر است که در شکل 5 نیز نشان داده شده است.

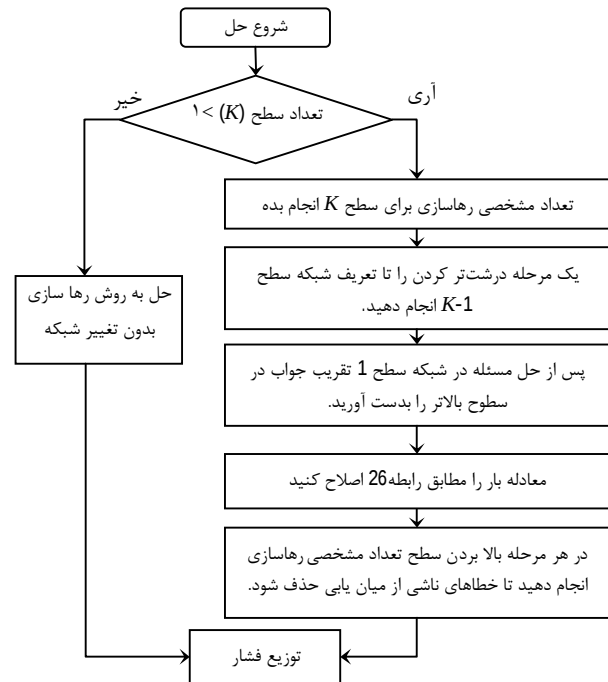
$$L_{cam} = 9.90 \left(\frac{\theta}{90} - \left(\frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi\theta}{90} \right) \right) \right) \quad (29)$$

منحنی تغییرات شعاع معادل تماس نیز با استفاده از روابط بخش سینماتیک در شکل 6 نشان داده شده است. تغییرات زیاد شعاع تماس در هر چرخش بادامک قابل توجه است. شعاع تماس مهمترین پارامتر سینتیک است که روی همه جوانب مسئله روانکاری و از جمله سرعت ورودی روغن به فضای روان کاری تأثیر خواهد داشت.

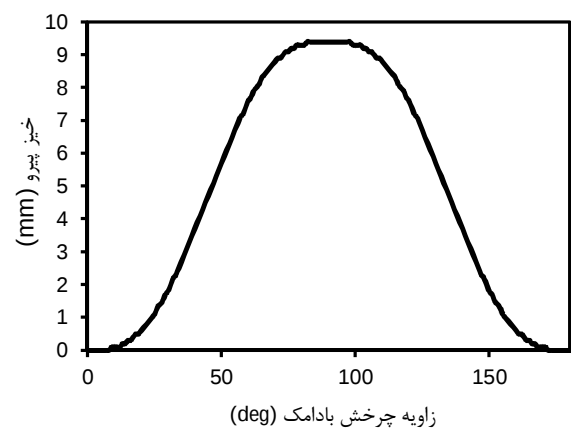
در منحنی‌های شکل 7 تغییرات سرعت ورود به فضای روانکاری برای سه سرعت دورانی مختلف بادامک نشان داده شده است. نکته مهم در این نمودارها تغییر جهت دادن سرعت در حین چرخش بادامک است. این بدان معناست که در زاویه‌های خاصی سرعت جریان روغن صفر می‌شود و به نظر لایه روانکار قطع خواهد شد ولی اگر اثر فشرده شدن لایه روغن در نظر گرفته شود، ضخامت لایه روانکار صفر نمی‌شود. در مجموع چهار مرتبه تغییر جهت در سرعت ورودی روانکار به فضای تماس رخ می‌دهد که سرعت تغییر جهت‌ها در سومین و چهارمین تغییر جهت کمتر است و کاهش ضخامت و وخیم‌تر شدن وضعیت تماس از نظر سایش و برخورد زبری‌ها در هنگامی که بادامک از روی قله رد شده محتمل‌تر است.

در منحنی‌های شکل 8 تغییرات نیروی تماسی برای سه سرعت مختلف بادامک آورده شده است. تغییرات نیروی تماسی حاصل جمع نیروهای فنر و اینرسی است. با افزایش سرعت نیروهای اینرسی قابل ملاحظه می‌شوند و رفتار مکانیزم را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

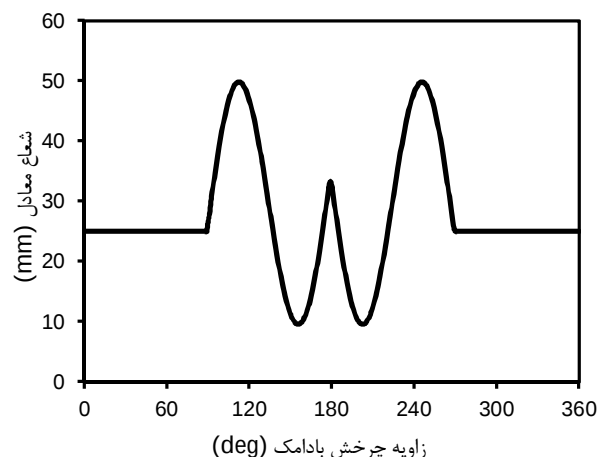
در سرعت‌های پایین چرخش بادامک مقدار شتاب کوچک‌تر است و مؤلفه نیرو ناشی از فشرده شدن فنر غالب است. شکل سهمی وار برای سرعت 800rpm نیز ناشی از این حقیقت است. با افزایش سرعت دورانی شتاب‌ها بیشتر شده و در موقعیت‌های تغییر جهت سرعت ورود روان کار اهمیت می‌یابد به نحوی که آرام آرام در سرعت دورانی 1600rpm و به طور واضح در سرعت دورانی 3000rpm، نیروی اینرسی افزایش می‌یابد و اندازه آن به



شکل 4 فلوچارت روش چند سطحی



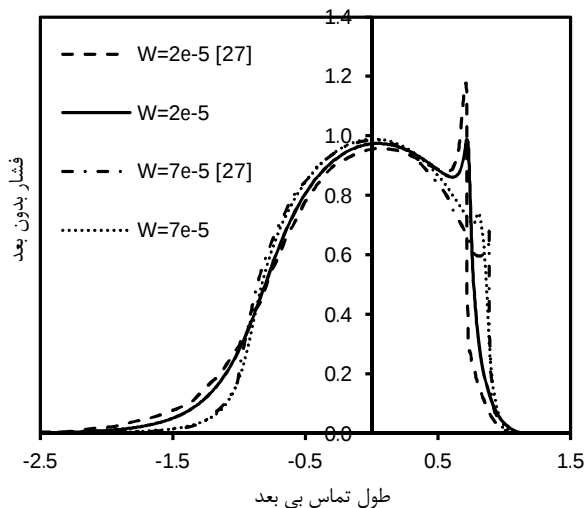
شکل 5 منحنی لیفت بادامک



شکل 6 منحنی تغییرات شعاع انتخابی معادل برحسب زاویه چرخش بادامک

جدول 1 مشخصات بادامک

نوع بادامک	عرض بادامک	زاویه عمل	قطر دایره مبنا
سیکلوئیدی	20 میلی‌متر	90 درجه	25 میلی‌متری



شکل 9 مقایسه نتایج بدست آمده برای روان کاری با پارامترهای $G=5007$, $U=1 \times 10^{-11}$ و $W=30 \times 10^{-5}$ با نتایج مرجع [27]

جدول 2 پارامترهای مورد استفاده در مدل سازی	
پارامتر	مقدار
بار	100 kN
مدول الاستیسیته	$2/26e11$ Pa
شعاع معادل	0/012 m
سرعت	0/87 m/s
پارامتر گریس	$n=0/87$
گرانروی روغن پایه در فشار جو	0/4 Pa.s

تغییرات بعد بروز قله و نحوه ارضا شدن شرط مرزی حفره زایی احتمال دقیق تر بودن نتایج تحقیق حاضر را بیشتر خواهد کرد. به عبارتی در حل مسئله به روش چند شبکه ای شیب تغییرات فشار بعد از بروز قله نسبت به روش نیوتن کندتر است و افت ناگهانی فشار به شدت روش نیوتن رافسون نیست. از طرفی فشارها در مجانب شدن به سمت صفر با یکدیگر تطابق دارند که می توان چنین استنباط کرد که حل از نظر ارضای شرایط مرزی دقیق است و از طرفی پدیده ای مانند قله فشار را نیز با دقت بیشتر و قابل قبول تر از نظر ماهیت فیزیکی مواد پیش بینی می کند.

6- نتایج حل روان کاری با گریس

اکنون که توانمندی روش چند شبکه ای در حل مسئله با روغن نیوتنی آشکار شد، به حل مسئله پیچیده تر روان کار غیر نیوتنی گریس پرداخته خواهد شد. برای پارامترهای جدول 2 با حل مسئله الاستوهیدرودینامیک خطی نتایج بدست آمده است.

در شکل 10 منحنی تغییرات فشار در راستای طول ناحیه تماس برای گریس و روغن پایه اش نشان داده شده است. در شکل 11 نیز منحنی تغییرات ضخامت لایه روان کار آورده شده است. شکل توزیع فشار و وجود قله فشار در نمودار گریس با آن چیزی که از توزیع فشار در حالت الاستوهیدرودینامیک انتظار می رود بسیار شبیه است. در شکل این توزیع در مقایسه با روغن پایه گریس آورده شده و تفاوت بسیار جزئی آن ها در ناحیه قله فشار مشهود است. شرط مرزی حفره زایی نیز در هر دو نوع روان کار مشخص است. ضخامت لایه روان کار نیز ناحیه مسطح مربوط به شرایط الاستوهیدرودینامیک را به همراه افت ناگهانی در نزدیکی خروجی نشان می دهد. همانطور که مطالعات و پیش بینی ها بیان داشته اند، با وجود فشار

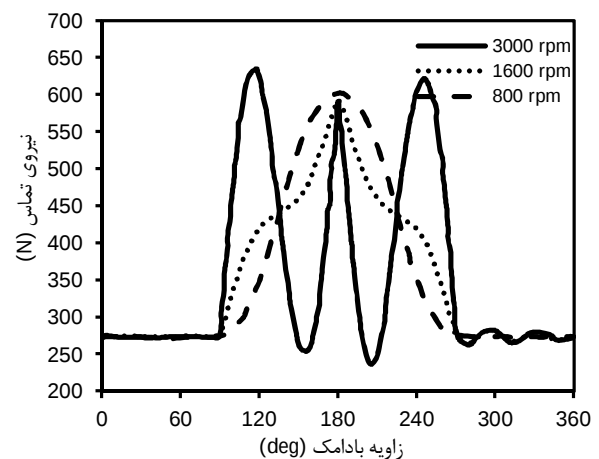
حدود نیروی فشردگی فتر می رسد. بنابراین نقاط کمینه و بیشینه نیروی تماسی روی موقعیت های تغییر جهت سرعت ورود بسته به شتاب منفی و مثبت و همچنین در حداکثر فشردگی فتر قرار می گیرند.

وقتی نوک بادامک رد می شود و به اصطلاح به فاز بسته شدن می رویم، اثر این نیروهای عکس العملی زیاد شده و سبب شتاب گیری جرم ها در راستای نیرو می شوند. در این نقطه اینرسی هر یک از جرم ها قابل ملاحظه می گردد. به خاطر سختی متفاوت بین جرم های نقطه ای، شتاب هایشان متفاوت بوده و این مسئله روی دامنه نوسانات تأثیر می گذارد. این اثرات در مراحل بعدی حل که بحث تغییرات زمانی وارد حل الاستوهیدرودینامیک خواهند شد، اهمیت پیدا می کنند. مدل ارائه شده امکان جدایی پیرو و بادامک را منظور نکرده است که در این صورت نیروی تماسی باید صفر می شد. از آنجا که هدف اصلی بحث مدل سازی روان کاری است، این مسئله که در سرعت های بالا رخ می دهد در اینجا قابل اغماض است.

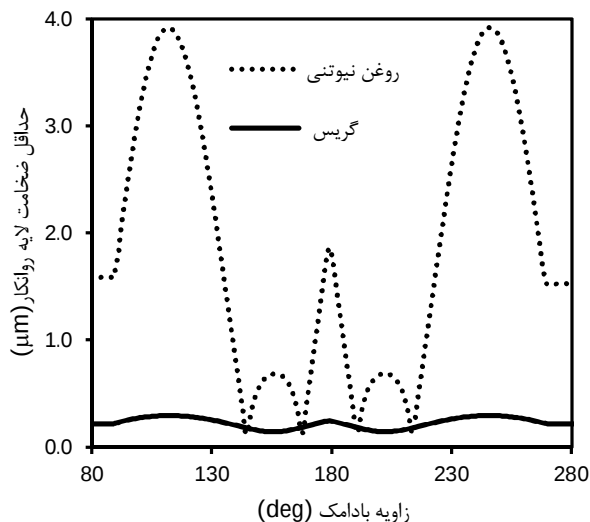
5- صحت سنجی حل روان کاری

پس از محاسبه مقدار نیروی تماسی، سرعت ورود و شعاع انحنا داده های دینامیکی و سینماتیکی مورد نیاز برای حل مسئله روان کاری در دسترس خواهند بود. حدس اولیه فشار را معمولاً فشار هرتزین در نظر می گیرند و با حل دستگاه معادلات فشار به روز می شود تا به جواب برسد. با توجه به آنکه عملاً امکان مقایسه تجربی داده ها به خاطر حرکت مکانیزم، اندازه های بسیار کوچک و متغیر ضخامت و فشارهای بالا وجود ندارد، حل عددی ارائه شده با فرض روغن نیوتنی با داده های معتبری که در مقالات اعلام شده صحت سنجی خواهد شد. بدین منظور داده های بدست آمده برای روان کار روغن نیوتنی در شرایط $G=5007$ ، $U=1 \times 10^{-11}$ و $W=30 \times 10^{-5}$ که با شرایط بررسی هوپرت و همراک [27] همخوانی دارد، انتخاب شده است.

در شکل 9 مقایسه بین نتایج مشخص می کند که داده های بدست آمده از شبیه سازی روش چند شبکه ای با آنچه که هوپرت و همراک از روش نیوتن رافسون بدست آوردند، همخوانی بسیار خوبی دارد. اختلاف بین دو توزیع فشار برای نیروی تماس کوچکتر کمی بیشتر است. برای این نیرو اختلاف در بخش اعظم طول تماس کمتر از 5% است و اختلاف اندکی در حدود 18% در محل بروز قله فشار وجود دارد انطباق در نیروی بزرگتر بهتر بوده و در بیشتر سطح تماس اختلاف کمتر از 2% و در محل بروز قله فشار کمتر از 10% است. با توجه به روش های مختلف حل استفاده شده، این مقدار اختلاف اجتناب ناپذیر است.



شکل 8 منحنی تغییرات نیروی تماسی برحسب زاویه چرخش بادامک



شکل 12 تغییرات حداقل ضخامت لایه روان کار در مسئله روان کاری مکانیزم پیرو و بادامک با روان کار گریس و روغن

مکان هایی که حداقل ضخامت در طول یک دور گردش بادامک شکل می گیرد از نظر افزایش احتمال سایش از اهمیت خاصی برخوردار است. این نواحی همانطور که از شکل 12 برمی آید در دو طرف قبل و بعد از تماس پیرو با قله بادامک سیکلوئیدی هستند. برای روان کار روغن این ناحیه در قبل از قله بادامک نسبت به بعد از آن ضخامت کمتری دارد. حال آنکه برای گریس تفاوت چندانی بین این دو بخش وجود ندارد. در بررسی روان کاری پیرو و بادامک همانطور که قبلاً ذکر شد مسئله مهم تغییر لحظه ای هندسه، سینماتیک و دینامیک آن است. این موضوع در تحلیل روان کاری علاوه بر تغییر لحظه ای شعاع معادل تماس، سرعت ورود و بار عمودی در عبارت متغیر با زمان ضخامت لایه روغن نیز دیده می شود. برای این منظور این عبارت به سادگی با گسسته سازی اختلاف محدود پیشرو در یک پله زمانی در معادلات وارد می شود. تغییرات لایه روان کار بدست آمده حاکی از نازک بودن لایه گریس نسبت به روغن معادل آن است.

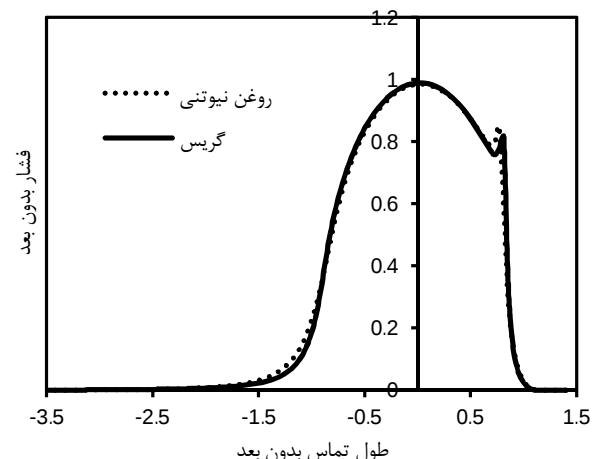
نکته دیگر تغییرات ضخامت لایه روان کار با سرعت گردش بادامک است. این موضوع برای روان کار نیوتنی و گریس اثر سرعت با مقایسه تغییرات ضخامت لایه روان کار برای سه سرعت مختلف پیرو و بادامک در شکل های 13 و 14 نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل 13 نیز مشهود است با افزایش سرعت ضخامت لایه روان کار روغنی افزایش می یابد. ولی محل های بحرانی ضخامت و یا به عبارتی شکل کلی تغییرات تفاوت نمی کند. حداقل ضخامت لایه روان کار نیوتنی با افزایش سرعت از 800rpm تا 3000rpm 65% افزایش می یابد و متوسط ضخامت نزدیک به 48% افزایش نشان می دهد. اما در مورد گریس مطابق شکل 14 می توان چنین استنباط کرد که سرعت چرخش بادامک اثری روی ضخامت لایه روان کار نمی گذارد و در هر سه دور با توجه به تغییرات زیاد دینامیک و سینماتیک مسئله حداقل ضخامت تقریباً مشابهی بدست می آید. حداقل ضخامت لایه روان کار نیوتنی با افزایش سرعت از 800rpm تا 3000rpm 4% افزایش می یابد و متوسط ضخامت محسوسی تغییری نمی کند.

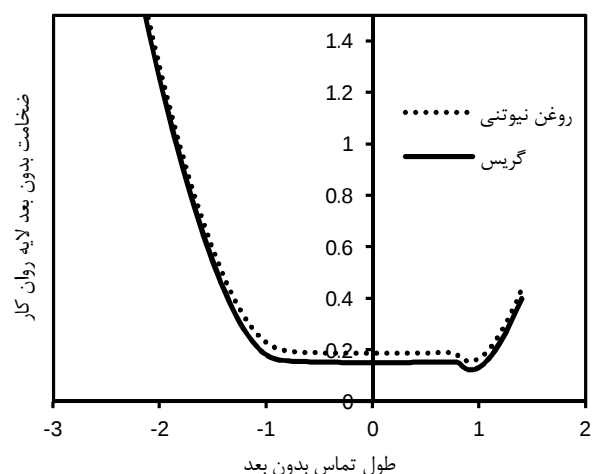
موضوع دیگری که جای تحقیق و کنکاش دارد، استفاده از گریس های مختلف است. گریس ها بسته به اینکه صابون مصرفی آنها بر چه پایه ای باشد، رفتارهای مختلفی از خود نشان می دهند. این رفتار در توان n رابطه (11) اثر

تقریباً برابر در عرض لایه تماس بین گریس و روغن ولی ضخامت گریس تقریباً 26% کمتر شده است. این نکته در مسائل روان کاری که هدف تأمین ضخامت مناسب روان کار مابین سطوح است، از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از دلایل اصلی کاهش ضخامت متفاوت بودن سرعت در محیط روان کار روغن و گریس است که از ماهیت رفتار غیر نیوتنی گریس سرچشمه می گیرد. سرعت ها در گریس کمتر از روغن خواهد بود.

پس از بررسی تحلیل یک حالت مشخص بین روغن و گریس نتایج تحلیل پیوسته روان کاری پیرو و بادامک با ارائه تغییرات هندسی و دینامیکی به مدل در هر زاویه چرخش قابل دستیابی است. تغییرات حداقل ضخامت لایه روان کار با استفاده از روان کار روغن در شکل 12 نشان داده شده است. الگوی تغییرات در منحنی شکل 12 بسیار تحت تأثیر تغییرات سرعت ورود روان کار است. حداکثر و حداقل ضخامت ها به ترتیب در نواحی با سرعت ورود بالا و تغییر جهت آن رخ می دهد. این الگوپذیری به خاطر اثر عمده مکانیزم روان کاری گوه فیزیکی برای سطوح همگرایی است که نسبت به هم حرکت می کنند. در مورد روان کار روغن تأثیرپذیری از سرعت ورود کاملاً مستقیم است و با تغییر جهت سرعت ورود ضخامت کم و با افزایش آن ضخامت زیاد می شود. اما در مورد گریس تأخیر پاسخ ناشی از ماهیت آن باعث می شود که به جای نقاط خاص با ضخامت کم، یک محدوده با ضخامت کم برقرار شود که به تدریج ضخامت کم و زیاد می شود.



شکل 10 تغییرات فشار در فضای تماس برای روان کار گریس در مقایسه با روغن پایه



شکل 11 تغییرات ضخامت لایه روان کار در فضای تماس برای روان کار گریس در مقایسه با روغن پایه آن

می توان دید که بهترین عملکرد را گریس های با توان n بزرگتر دارند. هر چه مقدار ضریب بزرگتر باشد، سرعت در روان کار بالا رفته و ضخامت بیشتری را شکل می دهد. با افزایش ضریب از $0/75$ تا $0/9$ حداقل ضخامت لایه گریس و متوسط آن به ترتیب $4/5$ برابر و $4/2$ برابر شده است که نشان از تغییر شگرف ضخامت لایه روان کار با نوع گریس استفاده شده دارد. اثر مقدار n روی تغییرات فشار نیز قابل بررسی است که با افزایش آن قله فشار به سمت مرکز تماس متمایل شده و اندازه آن افزایش می یابد.

7- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر استفاده از روان کارهای غیر نیوتنی به خصوص گریس ها در مقایسه با روان کارهای نیوتنی مانند روغن ها در مکانیزم پیرو و بادامک پرداخته شده است. این اثر به وسیله مدل سازی عددی معادلات حاکم بر روان کاری الاستوهیدرودینامیک گذرا با استفاده از روش چند شبکه ای انجام شده است. روش چند شبکه ای روشی مدرن بر پایه روش تکراری گاوس سایدل و ژاکوبی است که با ریز و درشت کردن مرحله ای شبکه حل به حذف نوسانات خطا و رسیدن به همگرایی می انجامد. این روش به خوبی برای مسئله دشوار روان کاری مطرح شده اعمال گردید و نتایج تحلیل با نتایج بدست آمده از روش نیوتن رافسون صحت سنجی شد. از حل مسئله روان کاری مکانیزم پیرو و بادامک با بادامک سیکولوئیدی نتایج زیر بدست آمده است:

در بار و سرعت مشخص ضخامت لایه روان کار گریس کمتر از زمانی است که روغن مشابه استفاده شود. علت آن کمتر بودن سرعت سیال گریس در مقایسه با روغن در حین روان کاری است. این پدیده مربوط به ماهیت غیر نیوتنی آن است. ضخامت لایه روان کار گریس در مقایسه با روان کار روغن بسیار کمتر تغییر می کند و در طول تماس تقریباً یکنواخت است. اندازه کم ضخامت امکان تماس فلز با فلز و بروز سایش در سیستم را افزایش می دهد.

در مورد روان کار روغن ضخامت کمینه در یک دور گردش بادامک در ناحیه ای قبل از رسیدن تماس پیرو به قله بادامک بروز می کند. بعد از عبور قله نیز دوباره ضخامت کم می شود که اندکی بیش از اندازه قبل است. علت این امر را می توان در عکس شدن جهت سرعت ورود روغن و کاهش سرعت ورود دانست. اما در روان کار گریس ضخامت کمینه در دو طرف قله بادامک اتفاق می افتد و تفاوت این دو چندان محسوس نیست.

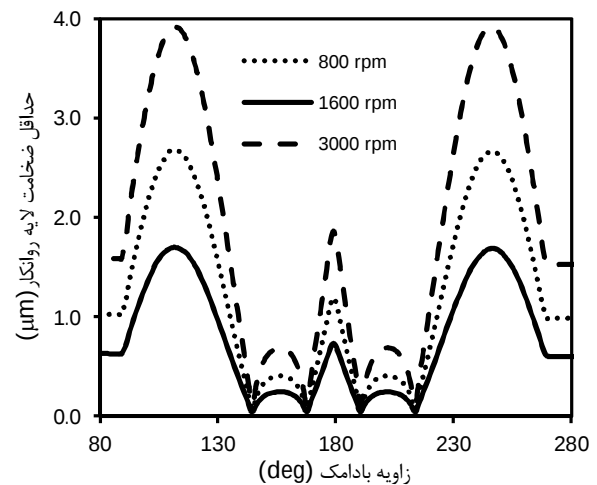
نقش سرعت چرخش بادامک در ضخامت لایه روان کار روغن و گریس بررسی شد که نتایج بیانگر تأثیر مستقیم آن روی روان کار روغن بود به طوری که با افزایش سرعت، ضخامت لایه روان کار افزایش یافت. با افزایش سرعت چرخش از 800rpm تا 3000rpm حداقل ضخامت روان کار روغن تا 65% افزایش می یابد. در مورد روان کار گریس حداقل ضخامت لایه روان کار مستقل از سرعت بود و افزایش ناچیزی با سرعت از خود نشان داد. با افزایش سرعت چرخش از 800rpm تا 3000rpm حداقل ضخامت روان کار گریس تنها 4% افزایش یافته است.

رفتار گریس که وابسته به نوع گریس است، روی ضخامت لایه روان کار اثر دارد. با توجه به مدل انتخابی برای مدل سازی سه ضریب رئولوژی مختلف بررسی شد که نتایج نشان از افزایش حداقل ضخامت لایه روان کار گریس با افزایش ضریب مزبور داشت به طوری که با تغییر ضریب از $0/75$ به $0/9$ ضخامت لایه روان کار بیش از 4 برابر افزایش از خود نشان داد.

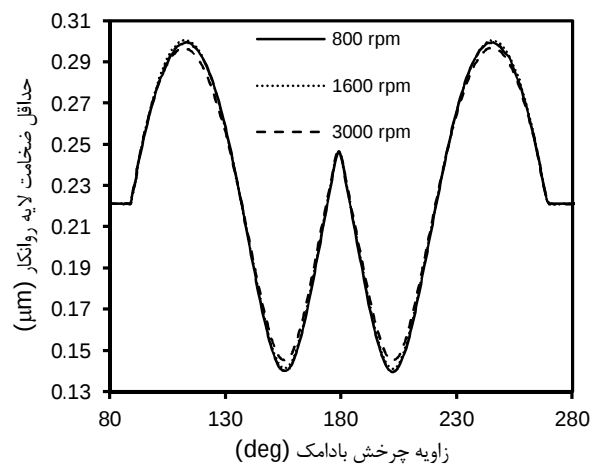
8- فهرست علائم

a	نیم عرض بیضی تماس هر تریز (m)
a_F	شتاب پیرو (m/s^2)

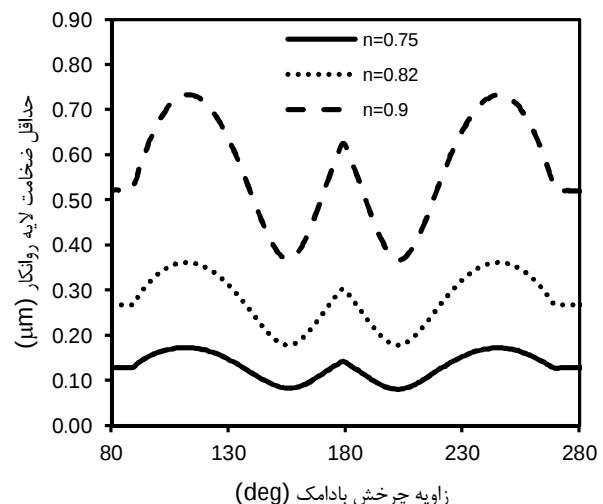
خود را نشان می دهد. برای ملاحظه اثر رفتار گریس بر روی مشخصات روان کاری شکل 15 را ببینید. در این شکل مقایسه بین ضخامت لایه روان کار برای گریس هایی با ضریب رئولوژی متفاوت نشان داده شده است.



شکل 13 مقایسه تغییرات حداقل ضخامت لایه روان کار روغن در سرعت های مختلف چرخش بادامک



شکل 14 مقایسه تغییرات حداقل ضخامت لایه روان کار روغن نیوتنی در سرعت های مختلف چرخش بادامک



شکل 15 مقایسه تغییرات حداقل ضخامت لایه روان کار گریس در سرعت های مختلف چرخش بادامک

- [3] B.A. Gecim, "Lubrication and fatigue analysis of a cam and roller follower", Paper IV(i), *Proceedings of the 15th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, The University of Leeds, UK, 6-9th September, 1988.
- [4] D. Dowson, C.M. Taylor and G. Zhu, "A transient elastohydrodynamic lubrication analysis of a cam and follower", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 25, pp. A313-A320, 1992.
- [5] M. Kushwaha and H. Rahnejat, "Transient elastohydrodynamic lubrication of finite line conjunction of cam to follower concentrated contact", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, (35), pp. 2872-2890, 2002.
- [6] S. Jang, "Transient elastohydrodynamic lubrication film thickness in sliding and rolling line contacts", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, pp. 946-956, 2008.
- [7] T. Nakahara, M. Yamaji and K. Kyogoku, "Effect of surface roughness on friction loss between cam and follower", *Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Volume 34, pp. 301-308, 1998.
- [8] C.H. Venner, M.T. van Zoelen and P.M. Lugt, "Thin layer flow and film decay modeling for grease lubricated rolling bearings", *Tribology International*, Volume 47, pp. 175-187, 2012.
- [9] T. Otsu, Y. Nagata, J. Sugimura and R. Glovnea, "Cavitation Phenomena in Pure-Sliding Grease EHL Films", *STLE/ASME 2010 International Joint Tribology Conference San Francisco, California, USA*, October 17-20, 2010.
- [10] Piet M. Lugt, "A Review on Grease Lubrication in Rolling Bearings", *Tribology Transactions*, 52:4, pp.470-480, 2009.
- [11] G.E. Morales-Espejel, P.M. Lugt, H.R. Pasaribu, and H. Cen, "Film thickness in grease lubricated slow rotating rolling bearings", *Tribology International*, Volume 74, pp. 7-19, 2014.
- [12] J.J. Kauzlarich and J.A. Greenwood, "Inlet shear heating in elastohydrodynamic lubrication", *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, 95, pp. 417-426, 1973.
- [13] W. Jonkisz and H. Krzeminski-Freda, "The properties of elastohydrodynamic grease films", *Wear*, 77, pp. 277-285, 1979.
- [14] J. Cheng, "Elastohydrodynamic grease lubrication theory and numerical solution inline contacts", *Tribology Transaction*, 37(4), pp.711-718, 1994.
- [15] J. Sugimura and M. Akiyama, "Study of non-steady state grease lubrication with fluorescence microscope", *Elsevier Tribology Series*, Volume 39, pp. 285-294, 2001.
- [16] X. Lu and M.M. Khonsari, "An Experimental Study of Grease-Lubricated Journal Bearings Undergoing Oscillatory Motion", *Journal of Tribology*, 129(3), pp. 640-646, 2007.
- [17] X Lu and M. M. Khonsari, "An Experimental Investigation of Grease-Lubricated Journal Bearings", *Journal of Tribology*, 129(1), pp. 84-90, 2006.
- [18] T. Cousseau, M. Björling, B. Graça, A. Campos, J. Seabra and R. Larsson, "Film thickness in a ball-on-disc contact lubricated with greases, bleed oils and base oils", *Tribology International*, Volume 53, pp. 53-60, 2012.
- [19] D. Vela, E. Ciulli, B. Piccigallo and F. Fazzolari, "Investigation on cam-follower lubricated contacts", *Journal of Engineering Tribology*, pp. 225: 379, 2011.
- [20] J. A. Matthews, F. Sadeghi and R. J. Cipra, "Radius of Curvature and Entraining Velocity of Cam Follower Mechanisms", *STLE Tribology Transactions*, 39(4), pp. 899-907, 1996.
- [21] B.J. Hamrock, S.R. Schmid and B.O. Jacobson, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", 2nd Edition, Marcel Dekker Inc., 2004.
- [22] G.W. Stachowiak and A. W Batchelor, "Engineering Tribology", Butterworth-Heinemann, 4th Edition, 2013.
- [23] W.H. Herschel and R. Bulkley, "Measurement of consistency as applied to rubber benzene solutions", *Proc. Am. Soc. Testing Mater*, 26(2), pp.291-300, 1926.
- [24] A. Greenbaum, "Iterative Methods for Solving Linear Systems", *Society of Industrial and applied mathematics*, 1997.
- [25] P. Huang, "Numerical Calculation of Lubrication Methods and Programs", *John Wiley & Sons*, 2013.
- [26] C.H. Venner and A.A. Lubrecht, "Multi Level Methods in Lubrication", *Elsevier Science, Tribology Series*: 37, 2000.
- [27] L.G. Houptert and B.J. Hamrock, "Fast Approach for Calculating Film Thicknesses and Pressures in Elastohydrodynamically Lubricated Contacts at High Loads", *Journal of Tribology*, Vol. 108, pp.411-419, JULY 1986.

c	ضریب رها سازی
d	عرض بادامک (m)
E'	مدول الاستیسیته معادل (Pa)
F	نیروی تماس بر واحد سطح (N)
F _{ck}	نیروی تماس (N)
F _V	نیروی اینرسی پیرو (N)
h	ضخامت لایه روان کار (m)
h ₀	ضخامت لایه روان کار در مرکز مختصات (m)
J _θ	شتاب هندسی (m/rad ²)
k _{sp}	ثابت فنر (N/m)
L	خیز پیرو (m)
m _{eq}	جرم معادل مجموعه مکانیزم (kg)
m _{sp}	جرم فنر (kg)
m _T	جرم متعلقات پیرو (kg)
m _V	جرم پیرو (kg)
n	ضریب معادله هرشل بالکلی
p	فشار (Pa)
P _h	حداکثر فشار هرتز (Pa)
R	شعاع انحنای معادل (m)
R ₀	شعاع دایره مبنای بادامک (m)
s	جابجایی پیرو (m)
t	زمان (s)
u	سرعت (m/s)
U	سرعت ورود روانکار (m/s)
W	بار بدون بعد
w	تغییر شکل سطح (m)
x	متغیر فاصله در جهت طولی (m)
ΔX	فاصله دو مرکز مش در جهت طولی (m)
y	متغیر فاصله در جهت عرضی (m)

علائم یونانی

$\dot{\gamma}$	کرنش برشی
δ	مقدار اصلاح فشار
η	گرانروی (Pa.s)
η_0	گرانروی در فشار جو (Pa.s)
ρ	چگالی (kg/m ³)
ρ_0	چگالی در فشار جو (kg/m ³)
τ	تنش برشی (Pa)
τ_s	آستانه تنش برشی (Pa)
ω	سرعت چرخش بادامک (rad/s)

زیر نویس‌ها

i	شماره شبکه مورد بررسی
---	-----------------------

9- مراجع

- [1] R. Gohar, "Elastohydrodynamics", World Scientific Publishing Company, 2nd Edition, 2001.
- [2] D. Dowson, C.M. Taylor and G. Zhu, "Mixed lubrication of a cam and flat faced follower", Paper XX(i), *Proceedings of the 13th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, The University of Leeds, UK, 8-12th September, 1986.