



تاثیر پارامترهای طراحی و شرایط مونتاژ بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور با روانکار میکروپلار

مهدی زارع مهرجردی^{۱*}، اصغر دشتی رحمت آبادی^۲، رضا رشیدی میبیدی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

^۳ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور تهران

چکیده

یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور با توجه به ویژگی‌های منحصر بفردی نظیر کارکرد مناسب در سرعت‌های بحرانی، امکان خنک کاری مطلوب‌تر و توانایی بالا در حفظ شرایط تعادل و پایداری، امروزه یکی از پر کاربردترین تجهیزات حوزه روانکاری به شمار می‌آیند. پارامترهای عملکرد این گروه از یاتاقان‌ها برخلاف انواع مدور، در صورت بروز هر گونه تغییر در شرایط نصب و مونتاژ نهایی درون سیستم مکانیکی حتی با حفظ مشخصه‌های ابعادی حاصل از طراحی، متفاوت خواهد شد. لذا دستیابی به شرایط کارکرد بهینه برای یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور با ابعاد معین در صورت اعمال تغییر در شرایط قرارگیری آنها داخل سیستم امری امکان‌پذیر خواهد بود. در پژوهش حاضر با بکارگیری روش حل عددی درونیابی مشتق تعمیم یافته، تاثیر ویژگی‌های ساختاری روانکار میکروپلار همانند طول مشخصه و عدد کولپینگ، پارامترهای طراحی و مونتاژ نظیر پریلود و زوایای نصب و انحراف بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور دو- لب و سه- لب مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. نتایج گویای بهبود مشخصه‌های عملکرد یاتاقان‌های مورد بررسی با تغییر حالت روانکار از نیوتنی به میکروپلار بوده و امکان دستیابی به شرایط کارکرد مطلوب‌تر بر پایه هر یک از مشخصه‌های خاص کارکرد یاتاقان را با انتخاب مناسب ترکیبی از شرایط طراحی و مونتاژ نمایش می‌دهند.

کلمات کلیدی: یاتاقان ژورنال غیر مدور؛ دو- لب؛ سه- لب؛ روانکار میکروپلار؛ زاویه نصب؛ زاویه انحراف؛ روش درونیابی مشتق تعمیم یافته.

۱- مقدمه

محققین این حوزه به خود اختصاص داده‌است. حل این معادله در حالت کلی تابعی از شرایط ویژه مساله مورد ارزیابی خواهد بود. حل تحلیلی معادله رینولدز تنها در صورت

استفاده از معادله رینولدز در بررسی مسائل روانکاری فیلم سیال از دیرباز جایگاه ویژه‌ای را در میان پژوهش‌های

* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۳۵۱-۸۲۱۱۶۷۰؛ فکس: ۰۳۵۱-۸۲۱۰۶۹۹

آدرس پست الکترونیک: Mahdi_zare@stu.yazduni.ac.ir

نمود [۷]. در سال ۱۹۸۹ خونساری و بریوو^{۱۳} [۸] عملکرد یاتاقان‌های ژورنال مدور هیدرودینامیکی با روانکار میکروپلار را مورد بررسی قرار دادند. در سال ۲۰۰۶ وانگ و ژو^{۱۴} [۹] مشخصه‌های عملکرد یاتاقان‌های ژورنال مدور را با در نظر گرفتن تاثیرات حرارت و کاویتاسیون ایجاد شده در فیلم روانکار مورد بازنگری قرار دادند. نیر و سوکاماران^{۱۵} [۱۰] در سال ۲۰۰۷ عملکرد یاتاقان‌های ژورنال بیضوی تحت روانکاری الاستوهیدرودینامیکی با روانکار میکروپلار را بررسی نمودند. در سال ۲۰۱۱ تحلیل یاتاقان‌های ژورنال تحت روانکاری میکروپلار با فیلم فشرده توسط نادوونامانی و سانتوش^{۱۶} [۱۱] انجام گرفت. با توجه به اهمیت سرعت در انجام محاسبات مهندسی، مالیک و برت^{۱۷} [۱۲] در سال ۱۹۹۴ روش درونیابی مشتق تعمیم یافته^{۱۸} را به عنوان ابزاری دقیق، سریع و کارا در تحلیل مسائل روانکاری در یاتاقان‌های ژورنال مدور معرفی نموده و نشان دادند که این روش در حل مسائل این حوزه از توانایی بیشتری نسبت به سایر روش‌های حل عددی بکارگیری شده تاکنون برخوردار است. پس از آن زانگ و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۰۲ نیز تحلیل دسته خاصی از یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی را با استفاده از این روش انجام دادند. بررسی‌های انجام شده توسط این پژوهشگران در بحث روانکاری تراکم‌ناپذیر یاتاقان‌های ژورنال مدور هیدرودینامیکی گویای سادگی پیاده‌سازی، توانایی بالای تحلیل و همگرایی به نتایج دقیق در بازه زمانی اندک در صورت بکارگیری روش درونیابی مشتق در مقایسه با دیگر روش‌های حل عددی رایج در این حوزه بود. رحمت آبادی و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۰ استفاده از روش درونیابی مشتق تعمیم یافته را به حوزه مسائل مربوط به یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی غیر مدور تعمیم دادند. آنان در پژوهش خود عملکرد گروهی از یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی غیر مدور دو- لب و سه- لب^{۱۹} را مورد بررسی قرار داده و تاثیر پارامترهای ویژه ساختاری

استفاده از فرض یاتاقان^۱ طویل و یا بسیار کوتاه (یاتاقان یک بعدی)، امکان‌پذیر می‌باشد. لذا در حالت کلی معادله مذکور با استفاده از روش‌های حل عددی بررسی می‌گردد. این عمل تاکنون با بکارگیری روش‌های حل عددی متنوعی توسط پژوهشگران حوزه روانکاری انجام شده‌است. ریموندی و بوید^۲ [۱] برای نخستین بار در سال ۱۹۵۸ تحلیل یاتاقان‌های هیدرودینامیکی با روانکاری تراکم‌ناپذیر را با استفاده از روش تفاضل محدود^۳ انجام دادند. در ادامه کاتو و هوری^۴ [۲] در سال ۱۹۸۸ تحلیل مساله روانکاری تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر یاتاقان‌های ژورنال مدور هیدرودینامیکی^۵ را با استفاده از روش حل عددی اجزاء محدود^۶ ارائه نمودند. بررسی یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور^۷ اولین بار توسط پینکاس^۸ [۳] در سال ۱۹۵۶ انجام گرفت. او در تحقیق خود به تحلیل پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال بیضوی پرداخت. در ادامه محققین زیادی به پژوهش در حوزه مسائل مربوط به یاتاقان‌های غیرمدور دست زدند. مالیک^۹ [۴] در سال ۱۹۸۳ موفق به تحلیل یاتاقان‌های ژورنال بیضوی با روش اجزاء محدود گردید. تحقیق روی مکانیک سیالاتی با ساختار میکرو اولین بار توسط جفری^{۱۰} [۵] در سال ۱۹۲۲ انجام شد. در اوسط دهه ۶۰ میلادی ارینگن^{۱۱} [۶] مطالعات گسترده‌تری را در زمینه سیالات با ساختار میکرو انجام داد. تعریف ارینگن از سیال میکرو، محیطی لزج با رفتاری وابسته به حرکت محلی ذرات موجود در حجم معیارهای کوچک داخلی‌اش بود. او این نوع از سیالات را با ۲۲ ضریب لزجت معرفی نمود. در ادامه او به بررسی شاخه‌ای از این سیالات که در آنها از تغییر شکل المان‌های زیرساختی سیال صرفنظر و تنها حرکات چرخشی و خطی میکرو ذرات لحاظ می‌شدند، پرداخت و این دسته از سیالات را تحت عنوان سیالات میکروپلار^{۱۲} نامگذاری

¹ Bearing

² Raimondi and Boyd

³ Finite Difference Method (FDM)

⁴ Kato and Hori

⁵ Hydrodynamic Circular Journal Bearing

⁶ Finite Element Method (FEM)

⁷ Noncircular Journal Bearings

⁸ Pinkus

⁹ Malik

¹⁰ Jeffery

¹¹ Eringen

¹² Micropolar Fluids

¹³ Khonsari and Brew

¹⁴ Wang and Zhu

¹⁵ Nair and Sukamran

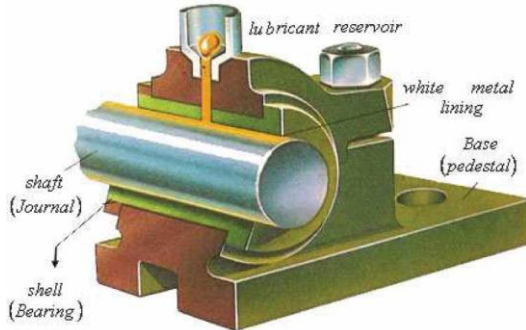
¹⁶ Naduvinamani and Santosh

¹⁷ Malik and Bert

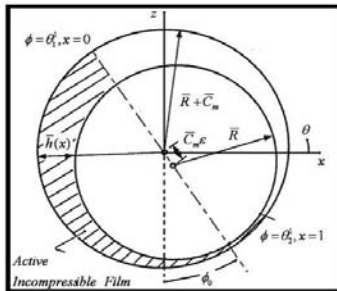
¹⁸ Generalized Differential Quadrature (GDQ) Method

¹⁹ Two Lobe and Three Lobe

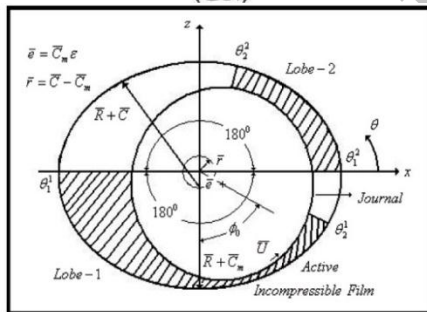
با اعمال شرایط ویژه حاصل می‌شود. در شکل ۲ یاتاقان‌های ژورنال مدور و غیر مدور مورد بررسی نمایش داده شده‌اند.



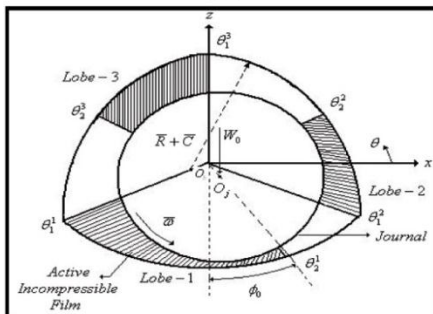
شکل ۱- ساختار یاتاقان ژورنال درون سیستم دوار



(الف)



(ب)



(ج)

سیال میکروپولار نظیر طول مشخصه بی‌بعد^۱ و عدد کوپلینگ^۲ کوپلینگ^۳ را بر پارامترهای عملکرد این دسته از یاتاقان‌ها در شرایط گوناگون طراحی مورد ارزیابی قرار دادند. در یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور برخلاف انواع مدور، هرگونه تغییر در شرایط نصب و مونتاژ بر عملکرد خروجی یاتاقان تاثیرگذار خواهد بود. از این‌رو در پژوهش حاضر برای نخستین بار تاثیر زوایای نصب و انحراف^۴ به عنوان مهمترین عوامل مرتبط با شرایط نصب بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور دو-لب و سه-لب تحت روانکاری هیدرودینامیکی با سیال میکروپولار مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. نتایج امکان دستیابی به عملکرد مطلوب‌تر یاتاقان برای مشخصه‌ای خاص با انتخاب ترکیبی ویژه از شرایط نصب و مونتاژ در کنار مجموعه‌ای معین از ویژگی‌های طراحی ابعادی و ساختاری یاتاقان و روانکار نظیر نسبت خروج از مرکزی^۵، نسبت منطری^۶، پرلود^۷، طول مشخصه بدون بعد و عدد کوپلینگ را تأیید می‌نمایند.

۲- ساختار یاتاقان

در شکل ۱ نمونه‌ای از یک یاتاقان ژورنال مدور به همراه مجرای تغذیه روانکار و سایر بخش‌های سیستم دوار در تماس با آن نشان داده شده‌است. در روانکاری هیدرودینامیکی یاتاقان‌های ژورنال، چرخش محور درون یاتاقان سبب ایجاد توزیع فشار درون فیلم سیال روانکار قرار گرفته در فضای لقی^۷ مابین سطح خارجی محور و سطح داخلی یاتاقان می‌گردد. فشار ایجاد شده داخل فیلم روانکار توانایی لازم برای حمل بار توسط یاتاقان را ایجاد و تعیین کننده سایر پارامترهای عملکردی یاتاقان خواهد بود.

یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور از کنار هم قرار گرفتن چندین لب ایجاد می‌گردند. درون این دسته از یاتاقان‌ها هر یک از لب‌ها همانند یک یاتاقان ژورنال جزئی مجزا عمل می‌کنند. عملکرد کلی این یاتاقان‌ها از ترکیب عملکرد لب‌ها

¹ Non-Dimensional Characteristic Length

² Coupling Number

³ Mount and Tilt Angles

⁴ Eccentricity Ratio

⁵ Aspect Ratio

⁶ Preload

⁷ Clearance Space

همچنین معادله بقاء مومنوم زاویه‌ای که حرکت ذرات معلق درون حجم معیار میکرو را تشریح می‌کند، با صرفنظر از ممان حجمی با معادله ذیل بیان می‌گردد:

$$\bar{\rho} j \frac{d\bar{w}}{dt} = (c_o + c_d - c_a) \nabla(\nabla \cdot \bar{w}) + (c_d + c_a) \nabla \bar{w} + 2\bar{\mu}_r (\nabla \times \bar{v} - 2\bar{w}) \quad (4)$$

که در آن j ثابت اینرسی و c_o, c_d, c_a ضرایب ویسکوزیته زاویه‌ای هستند. بردار سرعت و بردار سرعت میکروروتیشن با توجه به شکل ۱ به صورت زیر می‌باشد:

$$\bar{v} = (\bar{v}_x, \bar{v}_y, 0) \quad \text{و} \quad \bar{w} = (\bar{w}_x, \bar{w}_y, 0) \quad (5)$$

در یاتاقان ژورنال با توجه به کوچک بودن ضخامت فیلم سیال نسبت به شعاع محور می‌توان از انحاء فیلم سیال صرفنظر کرده و جریان را بر روی سطح تخت در نظر گرفت. به این ترتیب معادله بقاء مومنوم خطی در جهات x و y با توجه به پایدار بودن جریان، به صورت زیر ساده می‌شود:

$$(\bar{\mu} + \bar{\mu}_r) \frac{\partial^2 \bar{v}_x}{\partial z^2} + 2\bar{\mu}_r \frac{\partial \bar{w}_y}{\partial z} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$(\bar{\mu} + \bar{\mu}_r) \frac{\partial^2 \bar{v}_y}{\partial z^2} - 2\bar{\mu}_r \frac{\partial \bar{w}_x}{\partial z} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

و مولفه‌های معادله بقاء مومنوم زاویه‌ای نیز به صورت زیر کاهش می‌یابند:

$$(c_a + c_d) \frac{\partial^2 \bar{w}_x}{\partial z^2} - 2\bar{\mu}_r \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial z} - 4\bar{\mu}_r \bar{w}_x = 0 \quad (8)$$

$$(c_a + c_d) \frac{\partial^2 \bar{w}_y}{\partial z^2} - 2\bar{\mu}_r \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial z} - 4\bar{\mu}_r \bar{w}_y = 0 \quad (9)$$

به عنوان شرایط مرزی سرعت، بر روی سطح در حال چرخش ژورنال ($z=0$) درون یاتاقان و پوسته ثابت یاتاقان ($z=h$) داریم:

$$\bar{v}_x|_{y=0} = \bar{U}, \bar{v}_y|_{z=0} = \bar{w}_x|_{z=0} = \bar{w}_y|_{z=0} = 0 \quad (10)$$

$$\bar{v}_x|_{z=h} = \bar{v}_y|_{z=h} = \bar{w}_x|_{z=h} = \bar{w}_y|_{z=h} = 0 \quad (11)$$

انتگرال‌گیری از معادلات ساده شده مومنوم خطی و زاویه‌ای با لحاظ شرایط مرزی فوق، مولفه‌های سرعت خطی و میکروروتیشن را نتیجه می‌دهد. با جایگذاری مولفه‌های سرعت در معادله پیوستگی و انتگرال‌گیری از معادله حاصل در عرض فیلم روانکار، معادله رینولدز اصلاح شده برای سیال میکروپلار با فرض دمای متوسط حاصل می‌شود [۶]. تحلیل این معادله در شرایط گوناگون امکان دستیابی به توزیع فشار

شکل ۲- یاتاقان ژورنال (الف) مدور، (ب) غیر مدور دو- لب و (ج) سه- لب

۳- معادلات حاکم

ضخامت فیلم روانکار قرار گرفته بین سطح داخلی یاتاقان و سطح بیرونی ژورنال در حال چرخش درون یاتاقان از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۱۴]:

$$h_i = \frac{1}{\delta} + \varepsilon \sin \phi_0 \cos \theta + \varepsilon \cos \phi_0 \sin \theta + \left(\frac{1}{\delta} - 1 \right) \cos(\theta - \theta'_i) \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_x$$

در رابطه فوق ε نسبت خروج از مرکزی ژورنال نسبت به یاتاقان، $\delta = \bar{C}_m / \bar{C}$ میزان پریلود یا غیرمدور شدن یاتاقان، ϕ_0 زاویه بین خط مرکزی یاتاقان و ژورنال با محور z ، زاویه اندازه‌گیری شده نسبت به محور x ، θ'_i بیانگر زاویه میان محور x و خط واصل میان مرکز هندسی یاتاقان و مرکز لب i ام و N_x تعداد نقاط نمونه منتخب برای مشبندی یاتاقان در جهت محور x می‌باشد.

برای سیال میکروپلار علاوه بر معادلات بقاء مومنوم خطی و پیوستگی، بکارگیری معادله بقاء مومنوم زاویه‌ای نیز برای دستیابی به صورت نهایی معادله رینولدز لازم است. با توجه به تئوری سیال میکروپلار ارینگن و با صرفنظر از نیروهای حجمی، معادله بقاء مومنوم خطی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۷]:

$$\bar{\rho} \frac{d\bar{v}}{dt} = -\nabla \bar{p} + (\bar{\lambda}_0 + \bar{\mu} + \bar{\mu}_r) \nabla(\nabla \cdot \bar{v}) + (\bar{\mu} + \bar{\mu}_r) \nabla \bar{v} + 2\bar{\mu}_r (\nabla \times \bar{w}) \quad (1)$$

که در آن \bar{v} بردار سرعت، \bar{w} بردار سرعت چرخش جزئی (سرعت زاویه‌ای چرخش ذرات معلق در سیال)، $\bar{\rho}$ چگالی، $\bar{\mu}$ لزجت دینامیکی، $\bar{\lambda}_0$ ضریب دوم لزجت دینامیکی و $\bar{\mu}_r$ لزجت دینامیکی چرخشی ذرات معلق در سیال (لزجت دینامیکی میکروروتیشن) است. معادله پیوستگی برای سیال تراکم ناپذیر را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\nabla \cdot (\bar{v}) = 0 \quad (3)$$

در بخشی از فیلم، مثبت (فیلم همگرا) و در قسمتی دیگر از فیلم روانکار منفی (فیلم واگرا) خواهد بود. فرضیات متفاوتی برای بررسی مساله یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی با روانکار تراکم ناپذیر ارائه شده که در بررسی حاضر از شرط مرزی رینولدز استفاده گردیده‌است. با توجه به اعمال شرط مرزی رینولدز در تحلیل یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی غیر مدور مورد بررسی، پارامتر ϕ در رابطه (۱۲) نقطه انتهایی فیلم فشاری همگرا (مثبت) درون فیلم سیال را برای هر یک از لب‌های یاتاقان نشان می‌دهد و به عبارت دیگر برای هر یک از لب‌های یاتاقان غیرمدور $\phi = \theta_2^i$ خواهد بود. شرایط مرزی موجود برای مساله نیز به صورت زیر تعریف می‌گردند [۲]:

$$p(0, y) = p(x, 0) = p(x, 1) = p(1, y) = 0 \quad (14)$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial x} \right]_{x=1} = 0 \quad (15)$$

شرایط مرزی مورد اشاره در روابط (۱۴) و (۱۵) به ترتیب گویای برابری فشار در ابتدا و انتهای طولی یاتاقان و نقاط شروع و پایان فیلم همگرا با فشار هوای محیط و همچنین میل تدریجی و با شیب ملایم منحنی فشار به صفر در ناحیه پایانی فیلم فشاری مثبت جهت برقراری شرط پیوستگی جریان روانکار هستند.

۴- روش درونیابی مشتق تعمیم یافته

این روش اغلب برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسائل با ابعاد بیش از یک و نیز با دامنه‌های هندسی غیرمنظم استفاده می‌شود. براساس قوانین روش درونیابی مشتق تعمیم یافته، مشتقات جزئی یک تابع در هر نقطه‌ای از یک راستای خاص توسط مجموع وزن‌دار مقادیر تابع در تمامی نقاط نمونه گره‌ای انتخاب شده در آن راستا بدست می‌آیند. بنابراین برای مشتق مرتبه n ام تابع مفروض $\psi = \psi(x, y)$ بر پایه قوانین روش درونیابی مشتق تعمیم یافته می‌توان نوشت:

$$\left. \frac{\partial^n \psi}{\partial x^n} \right|_{x=x_i} = \sum_{j=1}^{N_x} A_{ij}^{(n)} \psi(x_j, y) \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_x \text{ و } j = 1, 2, \dots, N_y$$

در رابطه فوق N_y به تعداد نقاط گرهی نمونه انتخاب شده در راستای محور y اشاره دارد. $A_{ij}^{(n)}$ نیز ماتریس ضرایب وزنی مربوط به مشتق مرتبه n ام تابع $\psi(x, y)$ در راستای

تولیدی درون فیلم روانکار را فراهم می‌کند. با در اختیار داشتن توزیع فشار مذکور در هر حالت امکان استخراج کامل ویژگی‌های عملکردی یاتاقان امکان‌پذیر خواهد بود.

معادله رینولدز حاکم بر روانکاری هیدرودینامیکی یاتاقان‌های ژورنال مورد بررسی تحت شرایط روانکاری میکروپلار بصورت بدون بعد در ذیل آمده‌است [۸]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\psi(N, l_m, h) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \left(\frac{\bar{R}\phi}{L} \right)^2 \frac{\partial}{\partial y} \left[\psi(N, l_m, h) \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6\phi \frac{\partial h}{\partial x} \quad (12)$$

$$\psi(N, l_m, h) = h^3 + \frac{12h}{l_m^2} - \frac{6Nh^2}{l_m} \coth\left(\frac{Nhl_m}{2}\right)$$

در این رابطه N عدد کوپلینگ، l_m طول مشخصه بی‌بعد سیال میکروپلار، h ضخامت فیلم روانکار قرار گرفته در فضای لقی یاتاقان، p توزیع فشار ایجاد شده درون فیلم روانکار، \bar{R} شعاع محور، ϕ زاویه انتهایی ناحیه فیلم فشاری همگرا، \bar{L} طول یاتاقان و y محور مختصات منطبق بر راستای طولی یاتاقان هستند. همچنین نحوه بی‌بعد سازی پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۲) به صورت زیر است:

$$l_m = \frac{\bar{C}_m}{\Lambda}, x = \frac{\theta}{\phi}, h = \frac{\bar{h}}{\bar{C}_m}, y = \frac{\bar{y}}{\bar{L}}, p = \frac{\bar{p}\bar{C}_m^2}{\mu UR} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) پارامترهای $\bar{\Lambda}$ ، $\bar{\mu}$ و \bar{U} به ترتیب متناظر با کمترین میزان لقی شعاعی در حالت انطباق کامل مرکز محور و یاتاقان، حالت سیال میکروپلار و نمایشگر کنش بین سیال میکروپلار و ضخامت فیلم روانکار، لزجت دینامیکی روانکار و سرعت خطی ژورنال درون یاتاقان می‌باشند. عدد کوپلینگ پارامتری بی‌بعد بوده و همبستگی معادلات بقاء مومنتوم خطی و زاویه‌ای را نشان می‌دهد و می‌تواند به صورت نسبت نیروهای لزجت چرخشی به نیروهای لزجت نیوتنی سیال ($N^2 = \bar{\mu}_r / (\bar{\mu} + \bar{\mu}_r)$) در نظر گرفته شود. با توجه به ملاحظات ترمودینامیکی مقدار این پارامتر به صفر و یک محدود می‌شود. طول مشخصه اندازه مولکول‌ها و یا زیرساخت‌های سیال است. در این مورد نیز در صورتیکه مقدار $(\bar{\Lambda})$ به سمت صفر برود، سیال رفتاری نیوتنی خواهد داشت و معادله رینولدز به دست آمده به معادله رینولدز کلاسیک تبدیل می‌شود.

به علت ایجاد پدیده کاویتاسیون در حین چرخش محور درون یاتاقان‌های ژورنال، فشار نسبی روانکار به فشار محیط

نقاط نمونه مجزا روی دامنه مساله مطابق با رابطه زیر بازنویسی نمود.

$$\int_0^1 \int_0^1 \psi(x, y) dx dy = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} c_i^x c_j^y \psi(x_i, y_j) \quad (23)$$

در رابطه فوق c_i^x و c_j^y ضرایب وزنی انتگرال هستند که در صورت بکارگیری چند جمله‌ای لاگرانژ از رابطه (۱۷) به صورت ذیل قابل محاسبه خواهند بود:

$$\sum_{j=1}^{N_y} x_j^{k-1} c_j^x = \frac{1}{k} \quad k=1, 2, \dots, N_x \quad (24)$$

و

$$\sum_{j=1}^{N_y} y_j^{k'-1} c_j^y = \frac{1}{k'} \quad k'=1, 2, \dots, N_y$$

با اعمال رابطه (۱۶) بر معادله (۱۲)، رابطه ذیل جهت استخراج توزیع فشار درون روانکار داخل یاتاقان حاصل می‌گردد:

$$\left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_i \sum_{k=1}^{N_x} A_{ik}^{(1)} p_{kj} + (\psi)_i \sum_{k=1}^{N_x} A_{ik}^{(2)} p_{kj} \right] + \left(\frac{\bar{R} \phi}{L} \right)^2 \left[(\psi)_i \sum_{l=1}^{N_y} B_{il}^{(2)} p_{il} \right] = 6\phi \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_i \quad (25)$$

$$i=1, 2, \dots, N_x \quad j=1, 2, \dots, N_y$$

در رابطه فوق $A_{ij}^{(1)}$ و $A_{ij}^{(2)}$ به ترتیب ماتریس‌های ضرایب وزنی مربوط به مشتقات مراتب اول و دوم تابع توزیع فشار (p) در جهت محور x و $B_{ij}^{(2)}$ ماتریس ضرایب وزنی مربوط به مشتق دوم تابع مذکور را در جهت محور y نشان می‌دهند. همچنین متغیرهای i و j مربوط به مکان نقطه نمونه (x_i, y_j) روی دامنه مساله می‌باشند. استفاده از روش درونیابی مشتق تعمیم یافته امکان جایگزینی معادلات دیفرانسیل همراه با شرایط مرزی و مقادیر اولیه را با یک دستگاه معادلات جبری خطی فراهم می‌آورد. حل دستگاه مذکور برای مساله مورد بررسی توأم با اعمال شرایط مرزی از روابط (۱۴) و (۱۵)، توزیع فشار مجهول در نقاط نمونه انتخاب شده روی دامنه مساله را بدست می‌دهد. با تعیین توزیع فشار تولیدی درون فیلم روانکار امکان دستیابی به پارامترهای عملکرد یاتاقان ژورنال هیدرودینامیکی مدور و غیر مدور دو- لب و سه- لب مورد ارزیابی تحت روانکاری میکروپلار مهیا خواهد شد.

محور x و در نقطه $x = x_i$ می‌باشد. برای تعیین ماتریس ضرایب وزنی می‌بایست از یک تابع تقریب آزمایشی تعریف شده روی دامنه مساله استفاده نمود. برحسب نوع مسائل، از توابع آزمایشی مختلفی چون توابع تقریب چند جمله‌ای و یا هارمونیک استفاده می‌گردد. در بررسی حاضر از توابع تقریب چند جمله‌ای استفاده گردیده‌است. چندجمله‌ای‌های مورد استفاده از توابع درونیابی لاگرانژ به صورت ذیل انتخاب گردیده‌اند:

$$\Phi(X) = \frac{M(X)}{(X - X_k)M^{(1)}(X_k)} \quad k=1, 2, \dots, N_x \quad (17)$$

در رابطه فوق

$$M(X) = \prod_{k=1}^{N_x} (X - X_k) \quad (18)$$

همچنین $M^{(1)}(X)$ نیز مشتق مرتبه اول تابع $M(X)$ می‌باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$M^{(1)}(X) = \prod_{k=1, k \neq i}^{N_x} (X_i - X_k) \quad (19)$$

با جایگذاری رابطه (۱۷) در عبارت (۱۶) خواهیم داشت:

$$A_{ik}^{(1)} = \frac{M^{(1)}(X_i)}{(X_i - X_k)M^{(1)}(X_k)} \quad i \neq k \quad (20)$$

$$k=1, 2, \dots, N_x \quad \text{و} \quad i=1, 2, \dots, N_x$$

$$A_{ii}^{(1)} = - \sum_{k=1, k \neq i}^{N_x} A_{ik}^{(1)} \quad i=1, 2, \dots, N_x \quad (21)$$

از میان انواع انتخاب‌های ممکن برای نقاط نمونه گره‌ای در پژوهش حاضر با توجه به ارزیابی حالات مختلف در جهت رسیدن به پاسخ مطلوب، از صفرهای جابجا شده چندجمله‌ای چبیشف^۱ استفاده شده‌است:

$$x_i = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{(2i-1)\pi}{2N_x} \right) \quad (22)$$

$$x_i = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{(2i-1)\pi}{2N_x} \right) \quad \text{و} \quad 0 < x_i < 1$$

و

$$x_i = 0 \quad \text{for} \quad i=1 \quad x_i = 1 \quad \text{for} \quad i=N_x$$

با اندکی تغییر می‌توان محدوده $[0 \ 1]$ نقاط نمونه فوق را به هر بازه دیگری تعمیم داد. همچنین در صورت بکارگیری قوانین روش درونیابی مشتق کلیه انتگرال‌ها را می‌توان بصورت جمع وزن دار مقادیر مربوط به تابع تقریب در

^۱ Zeros of Shifted Chebyshev Polynomials

$$A = \frac{h}{2\phi} \frac{\partial p}{\partial x} + \left(1/h - \frac{2N}{l_m} \left[\frac{\cosh(Nl_m h) - 1}{\sinh(Nl_m h)} \right] \right) \quad \text{که}$$

متغیر ضریب اصطکاک^۶ در یاتاقان را نیز می‌توان با استفاده از رابطه $f(\bar{R}/\bar{C}) = F/W$ محاسبه نمود.

۶- زوایای نصب و انحراف

برخلاف یاتاقان‌های ژورنال مدور که نحوه مونتاژ آنها درون سیستم نهایی تاثیری بر عملکردشان ندارد، این عامل در یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور از اهمیت بسزایی برخوردار است. بر حسب میزان زوایای نصب و انحراف هر یک از لب‌های یاتاقان از شرایط مبنا، عملکرد خروجی این دسته از یاتاقان‌ها متفاوت خواهد شد. لیکن در بکارگیری یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور می‌توان ترکیب‌های متنوعی از شرایط طراحی و نصب را برای دستیابی به عملکرد مطلوب بکار گرفت. در شکل ۳ زوایای نصب و انحراف در یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور نشان داده شده است.

۷- بررسی نتایج

پس از حل معادلات حاکم بر روانکاری یاتاقان‌های ژورنال مدور و غیر مدور در ازای مشخصه‌های طراحی و نصب معین نظیر ابعاد، پریلود، میزان خروج از مرکزی محور، ویژگی‌های روانکار میکروپلار، زاویه نصب و زاویه انحراف و استخراج توزیع فشار تولیدی درون روانکار موجود در فضای لقی یاتاقان بر اساس آنها، امکان دستیابی به پارامترهای عملکرد یاتاقان در شرایط کارکرد فراهم می‌شود.

پیش از ارائه نتایج، به جهت بررسی صحت عملکرد کدنویسی انجام شده بر پایه روش حل عددی درونیابی مشتق تعمیم یافته، خروجی برنامه برای مساله یاتاقان ژورنال مدور و غیرمدور تحت شرایط روانکاری با سیال نیوتنی و میکروپلار با نتایج مشابه از روش‌های حل عددی تفاضل محدود و اجزاء محدود موجود در مراجع مقایسه گردیده‌اند. جدول ۱ و شکل ۴ بترتیب نتایج حاصل از بررسی پارامتر قابلیت حمل بار در

۵- پارامترهای عملکرد یاتاقان

برای انجام محاسبات مربوط به یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور می‌بایست در ابتدا هر یک از لب‌ها را بصورت مجزا مورد بررسی قرار داده و در نهایت با استفاده از جمع برداری و یا اسکالر بر حسب نوع پارامتر مورد نظر، برآیند مجموع آن کمیت روی کل یاتاقان محاسبه گردد. از این‌رو می‌توان از ترکیب فشار روی لب‌های یاتاقان جهت یافتن فشار منتهجه و یا جمع جبری مولفه‌های بار در راستای محورهای مختصات جهت یافتن بار منتهجه استفاده نمود. همچنین نیروی اصطکاک و دبی نشتی کلی یاتاقان نیز از جمع جبری مقادیر آنها بر روی هر یک از لب‌ها قابل دستیابی می‌باشند. پارامترهای عملکرد یاتاقان ژورنال بصورت بی بعد در ادامه ارائه گردیده‌اند [۱۴]:

الف- بار قابل حمل توسط یاتاقان^۱

$$W_x = \phi \int_0^1 \int_0^1 p \cos \theta dx dy \quad (26)$$

$$W_y = -\phi \int_0^1 \int_0^1 p \sin \theta dx dy \quad (27)$$

بار کلی قابل حمل توسط یاتاقان نیز از رابطه $W = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$ قابل محاسبه بوده و با داشتن بار قابل حمل توسط یاتاقان می‌توان عدد مشخصه یاتاقان (عدد سامرفیلد^۲) را از رابطه $S = (1/\pi W)$ محاسبه نمود.

ب- زاویه وضعی در یاتاقان^۳

$$\theta_0 = \tan^{-1}(W_y/W_x) \quad (28)$$

ج- دبی نشتی^۴ روانکار از یاتاقان

$$Q_s = \frac{6\bar{L}}{C_m \bar{U} R^2} \bar{q}_s = \int_0^1 (-\phi \nu(N, l_m, h) \frac{\partial p}{\partial y}) dx \quad (29)$$

د- نیروی اصطکاک^۵ تولید شده در یاتاقان

$$F = \frac{\bar{f}_f \bar{C}}{\bar{\mu} \bar{U} R} = \int_0^1 \int_0^1 A \phi dx dy + \int_0^1 \int_0^{2\pi} A \frac{h(\theta)}{h(\phi)} d\theta dy \quad (30)$$

¹ Load Carrying Capacity

² Sommerfeld Number

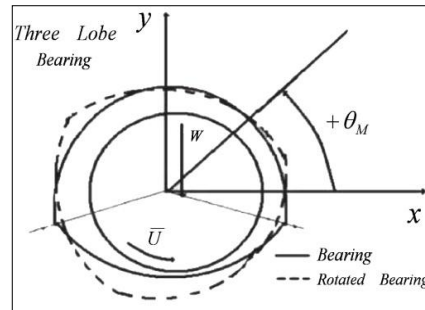
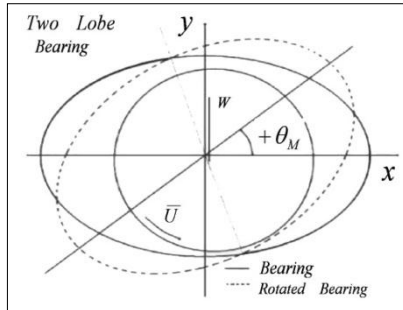
³ Attitude Angle

⁴ Side Leakage Flow

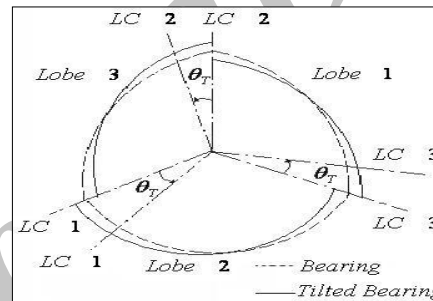
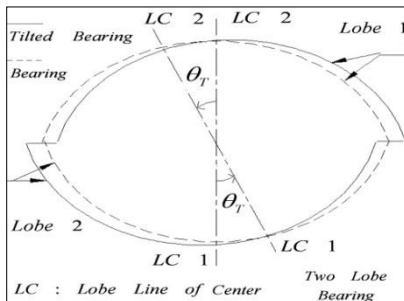
⁵ Friction Force

⁶ Coefficient of Friction

یاتاقان ژورنال مدور و یاتاقان ژورنال تحت شرایط روانکاری با سیال نیوتنی و میکروپلار را نشان می‌دهد.



(الف)

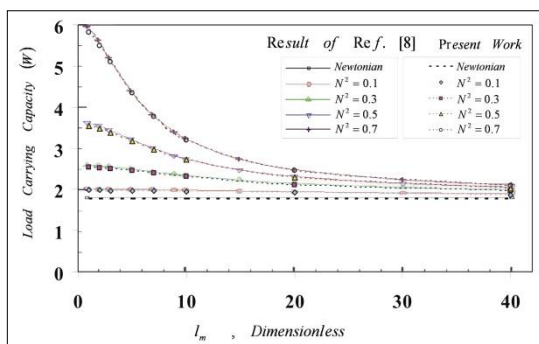


(ب)

شکل ۳- زوایای نصب (الف) و انحراف (ب) در یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور دو- لب و سه- لب

▪ حل اجزاء محدود از مرجع [۱۵]

شکل‌های ۵ و ۶ تاثیر ترکیبات مختلف پارامترهای مشخصه سیال میکروپلار (N^2, l_m) و پارامترهای طراحی یاتاقان نظیر پریلود (δ) بر توزیع فشار محیطی (p) ایجاد شده درون فیلم روانکار نیوتنی و میکروپلار در یاتاقان‌های ژورنال مدور و غیر مدور دو- لب و سه- لب تحت شرایط بارگذاری یکنواخت همسان و حالت پایدار را نشان می‌دهند.



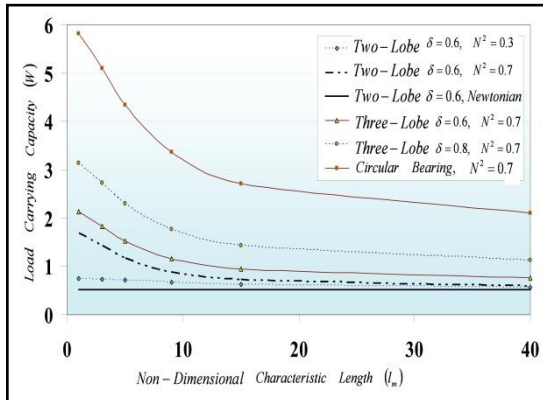
نتایج جدول ۱ و شکل ۴ موید صحت عملکرد برنامه برای یاتاقان‌های ژورنال مدور و غیرمدور در تحت هر دو حالت روانکاری با سیال نیوتنی و میکروپلار بوده و تطابق مناسب نتایج روش درونیابی مشتق تعمیم یافته را با سایر روش‌های حل عددی مورد استفاده در این حوزه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- نتایج حاصله برای زاویه وضعی و بار قابل حمل روش‌های حل اجزاء محدود و درونیابی مشتق تعمیم یافته

یاتاقان ژورنال غیرمدور سه لب

$$N_y = 7, N_x = 12, \delta = 0.5, \lambda = \bar{L}/2\bar{R} = 0.5$$

W		θ_0		\mathcal{E}
GDQ	FEM	GDQ	FEM	
۵۴/۴۱	۵۴/۱۱	۰/۰۳۶	۰/۰۳۹	۰/۳۸۴
۵۲/۸۵	۵۲/۸۵	۰/۰۶۹	۰/۰۷۲	۰/۵۵۶
۵۰/۹۴	۵۰/۹۱	۰/۱۲۲	۰/۱۲۱	۰/۶۹۴
۴۹/۷۲	۴۹/۷۵	۰/۱۵۰	۰/۱۵۶	۰/۷۵۴
۴۵/۱۸	۴۵/۲۸	۰/۳۴۸	۰/۳۲۵	۱/۸۸۲



شکل ۷- تغییرات بار قابل حمل یاتاقان بر حسب طول

مشخصه بی‌بعد سیال روانکار، $\lambda = 1.0, \varepsilon = 0.5$

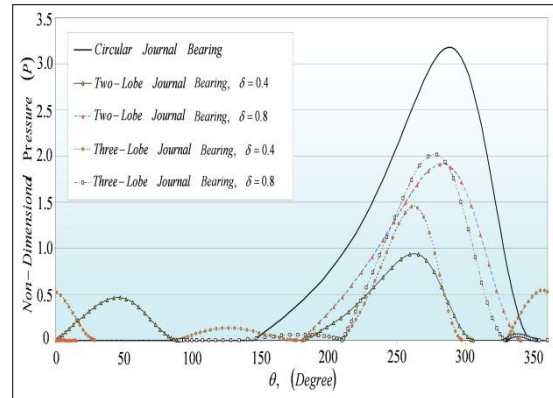
شکل ۸ تغییرات متغیر ضریب اصطکاک را بر حسب نسبت خروج از مرکزی یاتاقان، میزان پریلود و پارامترهای مشخصه سیال میکروپلار نشان می‌دهد. برای هر نسبت خروج از مرکزی معین، متغیر ضریب اصطکاک درون یاتاقان روندی کاهشی را با افزایش خواص میکروپلاریته سیال روانکار یعنی افزایش N^2 و یا کاهش l_m نشان می‌دهد. همچنین شکل ۸ گویای تاثیر میزان غیرمدوری یاتاقان (δ) بر متغیر ضریب اصطکاک می‌باشد. واضح است که با افزایش میزان غیرمدوری یاتاقان ($\delta \rightarrow 0$)، مقدار متغیر ضریب اصطکاک افزایش خواهد یافت.

نتایج شکل ۸ همچنین گویای اختصاص کمترین مقدار متغیر ضریب اصطکاک به یاتاقان ژورنال مدور از بین تمام حالات عملکرد برای یاتاقان‌های مورد بررسی می‌باشد.

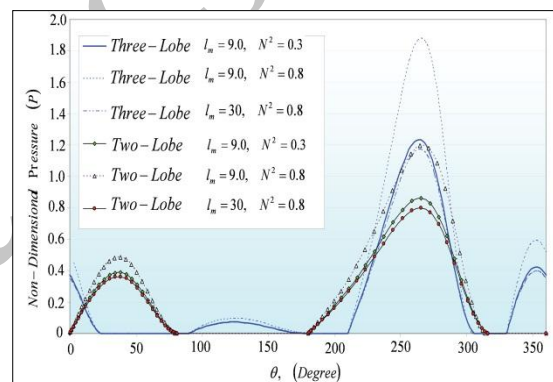
شکل ۹ تغییرات زاویه وضعی درون یاتاقان بر حسب عدد کولپینگ را در تعدادی از مقادیر معین پریلود و طول مشخصه سیال میکروپلار نشان می‌دهد. نتایج بیانگر نزدیک شدن میزان زاویه وضعی به مقادیر مربوط به سیال نیوتنی در ازای تمایل $l_m \rightarrow 0$ ، $l_m \rightarrow \infty$ و یا $N^2 \rightarrow 0$ می‌باشد.

کاهش مقدار زاویه وضعی با افزایش میزان N^2 در هر مقداری از l_m بوضوح از شکل ۹ قابل برداشت می‌باشد. با افزایش میزان غیرمدوری یاتاقان، زاویه وضعی برای یاتاقان افزایش خواهد یافت.

شکل ۴- تغییرات بار قابل حمل بر حسب طول مشخصه

سیال میکروپلار، یاتاقان ژورنال مدور، $\varepsilon = 0.5, \lambda = 1.0$ 

شکل ۵- توزیع فشار محیطی درون یاتاقان ژورنال مدور و

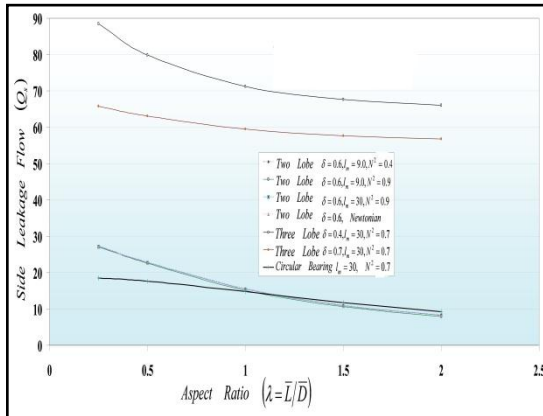
غیرمدور، روانکار نیوتنی، $\lambda = 1.0, \varepsilon = 0.50$ 

شکل ۶- توزیع فشار محیطی درون یاتاقان ژورنال مدور و

غیرمدور، روانکار میکروپلار

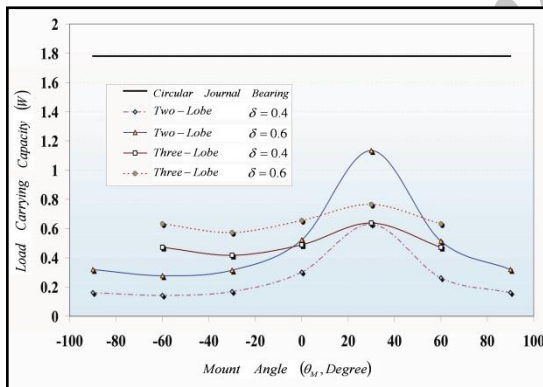
 $\delta = 0.5, \lambda = 1.0, \varepsilon = 0.50$

نتایج گویای افزایش قابلیت حمل بار یاتاقان با افزایش میزان پریلود و عدد کولپینگ از مقدار ۰ تا ۱ می‌باشند. همچنین با کاهش مقدار طول مشخصه بی‌بعد از ∞ به صفر، بار قابل حمل یاتاقان افزایش خواهد یافت. برای مقادیر مشابه $N^2, \varepsilon, \lambda$ و l_m ، یاتاقان‌های سه- لب توانایی بیشتری برای حمل بار نسبت به انواع دو- لب خواهند داشت. شکل ۷ کاهش میزان قابلیت حمل بار یاتاقان به ازای تبدیل یاتاقان از نوع مدور به غیر مدور به ازای سایر شرایط همسان را نشان می‌دهد.



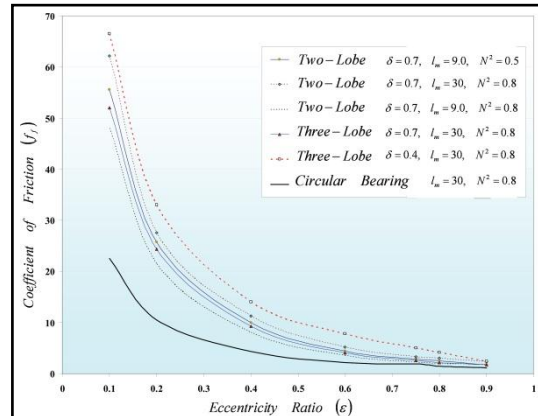
شکل ۱۰- تغییرات دبی نشتی سیال روانکار (Q_s) بر حسب نسبت منظری یاتاقان (λ), $\varepsilon = 0.5$

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تاثیر زاویه نصب بر قابلیت حمل بار در یاتاقان‌های ژورنال مدور و غیر مدور تحت روانکاری با سیال نیوتنی و میکروپلار نمایش داده شده‌اند. نتایج گویای تاثیر عمیق‌تر تغییرات زاویه نصب بر قابلیت حمل بار یاتاقان‌های ژورنال دو- لب در مقایسه با انواع سه- لب می‌باشد.

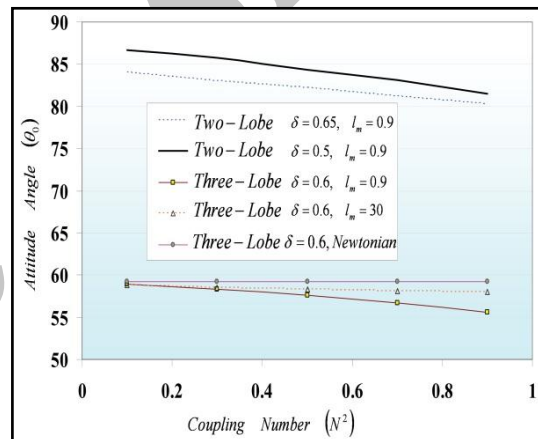


شکل ۱۱- تغییرات قابلیت حمل بار (W) بر حسب میزان زاویه نصب (θ_M), روانکار نیوتنی, $\varepsilon = 0.50$, $\lambda = 1.0$

شکل ۱۳ تاثیر میزان زاویه نصب بر متغیر ضریب اصطکاک درون انواع یاتاقان‌های ژورنال مورد بررسی را نشان می‌دهد.



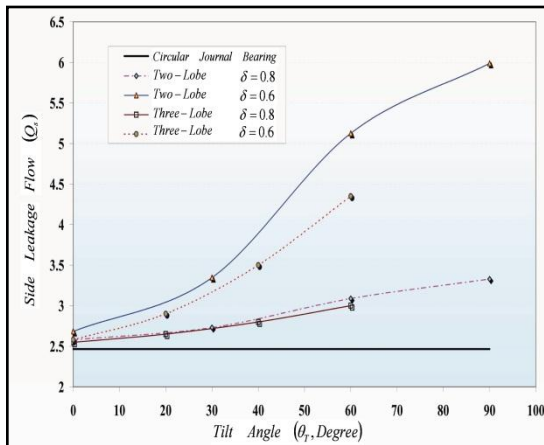
شکل ۸- تغییرات متغیر ضریب اصطکاک بر حسب نسبت خروج از مرکزی، یاتاقان ژورنال مدور و غیرمدور، $\lambda = 1.0$



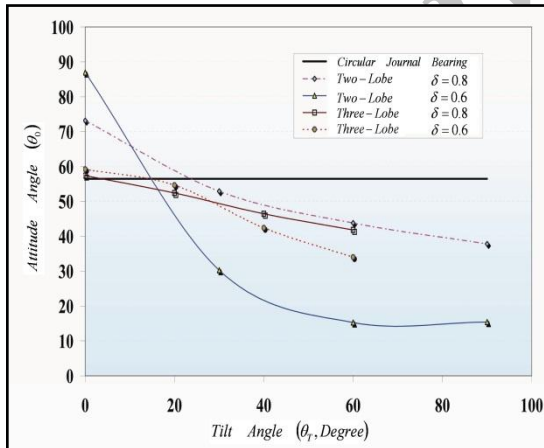
شکل ۹- تغییرات زاویه وضعی درون یاتاقان (θ_0) بر حسب عدد کوپلینگ (N^2) سیال روانکار، $\varepsilon = 0.5$, $\lambda = 1.0$

شکل ۱۰ تاثیر پارامترهای طراحی و خواص سیال میکروپلار بر میزان دبی نشتی روانکار از یاتاقان‌های ژورنال مدور و غیر مدور را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که میزان نشتی روانکار از یاتاقان با افزایش عدد کوپلینگ و میزان غیرمدوری یاتاقان از ۰ به ۱ کاهش می‌یابد. همچنین نتایج افزایش میزان نشتی سیال از یاتاقان با کاهش مقدار نسبت منظری (λ) در یاتاقان‌های ژورنال مدور و غیر مدور را نشان می‌دهند.

و یا افزایش میزان نشتی روانکار از یاتاقان با توجه به شرایط متفاوت کاری نظیر سرعت‌های بحرانی و نیاز به جلوگیری از افزایش حرارت در ناحیه تماس محور و یاتاقان می‌باشد. اثر زاویه انحراف بر زاویه قرارگیری مرکز محور نسبت به مرکز یاتاقان با توجه به در نظر گرفتن جهت عمودی برای بارگذاری منتهج درون یاتاقان در شکل ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته‌است.

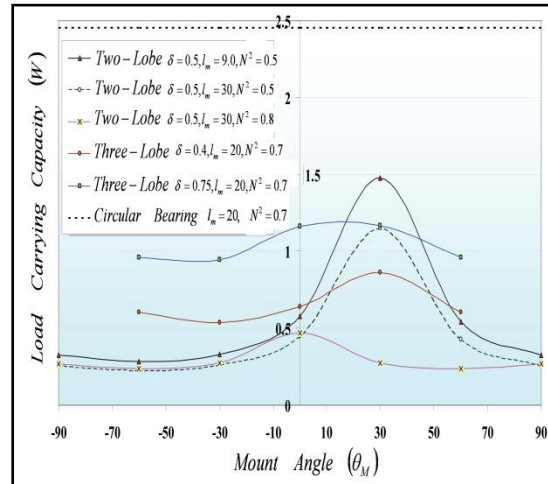


شکل ۱۴- تاثیر زاویه انحراف (θ_T) بر میزان نشتی روانکار از یاتاقان (Q_s)، روانکار نیوتنی، $\lambda = 1.0$ ، $\varepsilon = 0.50$

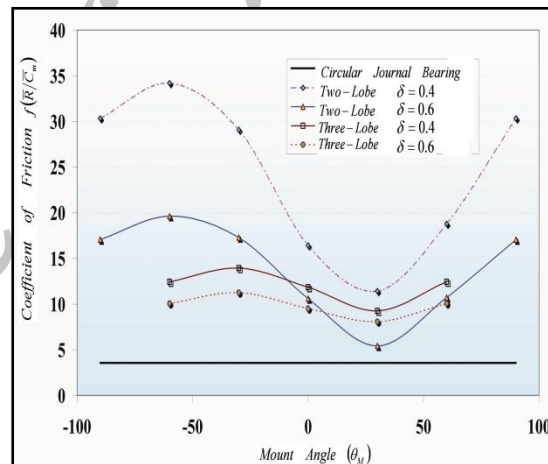


شکل ۱۵- تاثیر زاویه انحراف (θ_T) بر زاویه وضعی درون یاتاقان (θ_0)، روانکار نیوتنی، $\lambda = 1.0$ ، $\varepsilon = 0.50$

با توجه به اهمیت میزان زاویه وضعی برای حفظ شرایط تعادل و پایداری در یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور، شکل ۱۵



شکل ۱۲- تغییرات قابلیت حمل بار (W) بر حسب میزان زاویه نصب (θ_M)، روانکار میکروویلار، $\lambda = 1.0$ ، $\varepsilon = 0.50$



شکل ۱۳- تاثیر زاویه نصب (θ_M) بر متغیر ضریب اصطکاک درون یاتاقان، روانکار نیوتنی، $\lambda = 1.0$ ، $\varepsilon = 0.50$

نتایج شکل ۱۳ گویای امکان دسترسی به شرایط مناسب اصطکاکی در یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور با ایجاد تغییر در زاویه نصب آنها بر روی مکانیزم بکارگیرنده این دسته از یاتاقان‌ها می‌باشد. در این حالت با انتخاب شرایط مناسب جهت کاهش اصطکاک داخلی یاتاقان می‌توان عملکرد آن را بهبود بخشید.

شکل ۱۴ تاثیرات زاویه انحراف را بر میزان نشتی روانکار از یاتاقان در شرایط کارکرد نمایش می‌دهد. نتایج شکل مذکور گویای امکان دسترسی به شرایط مطلوب برای کاهش

سیال روانکار با تشدید خصوصیات میکروپلاریته آن مربوط می‌شود.

در شکل ۷ تاثیر پارامترهای میزان غیرمدوری یاتاقان (δ) و میکروپلاریته سیال روانکار (N^2) بر قابلیت حمل بار یاتاقان مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

۸- نتیجه گیری

در بررسی حاضر یاتاقان‌های ژورنال هیدرودینامیکی مدور و غیرمدور دو- لب و سه- لب با روش حل عددی درونیایی مشتق تعمیم یافته مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج مربوط به تاثیر پارامترهای مربوط به طراحی، مونتاژ و نوع سیال روانکار یاتاقان بر عملکرد یاتاقان‌های مذکور استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از بررسی‌های انجام گرفته در حالت کلی نتایج ذیل قابل استنباط می‌باشند.

- در صورت استفاده از روش درونیایی مشتق تعمیم یافته، حل مسائل روانکاری با دقت بالایی در قیاس با سایر روش‌های حل عددی رایج در این حوزه نظیر تفاضل محدود و اجزا محدود با صرف زمان کمتر جهت انجام محاسبات و کارایی بالا قابل دستیابی است.

- تغییر پارامترهای مشخصه روانکار میکروپلار (N^2, I_m) امکان بهبود عملکرد یاتاقان‌های مورد بررسی را فراهم می‌کنند. در مقادیر بالای N^2 و مقادیر اندک I_m ، تاثیر خواص میکروپلاریته سیال روانکار بر پارامترهای عملکرد یاتاقان ژورنال مشخص‌تر خواهد بود.

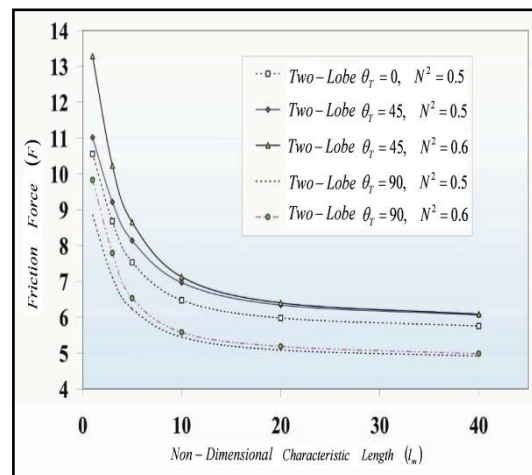
- میزان تاثیرپذیری پارامترهای عملکرد یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور از ویژگی‌های مشخصه سیال میکروپلار به ازای مقادیر مختلف میزان غیرمدوری یاتاقان (δ)، یکسان نخواهد بود.

- با تغییر در شرایط نصب و مونتاژ یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور امکان ارائه عملکرد متنوع در شرایط کارکرد، به ازای مجموعه‌ای از پارامترهای طراحی ثابت برای این دسته از یاتاقان‌ها فراهم می‌گردد در حالیکه این انعطاف‌پذیری عملکرد در گستره یاتاقان‌های ژورنال مدور به چشم نمی‌خورد.

- برای ویژگی‌های طراحی و شرایط عملکرد یکسان تغییرات زاویه نصب تاثیر کمتری در عملکرد یاتاقان‌های سه- لب نسبت به انواع دو- لب دارد. همچنین نتایج بیانگر

بیانگر امکان بهبود شرایط مذکور با تغییر در زاویه انحراف برای هر یاتاقان ژورنال غیر مدور حتی با حفظ شرایط مشخص طراحی می‌باشد.

تغییرات نیروی اصطکاک تولیدی بر روی سطح یاتاقان به ازای زوایای انحراف مختلف لب‌های یاتاقان ژورنال غیرمدور در شکل ۱۶ ارائه شده‌است.



شکل ۱۶- تاثیر زاویه انحراف (θ_f) بر نیروی اصطکاک بی‌بعد درون یاتاقان (F)، روانکار میکروپلار
 $\delta = 0.6, \lambda = 1.0, \varepsilon = 0.50$

نتایج شکل ۱۶ گویای روند مشخص کاهش نیروی اصطکاک بی‌بعد درون یاتاقان، با افزایش طول مشخصه سیال میکروپلار می‌باشد. این در حالیست که به ازای یک طول مشخصه معین با تغییر زاویه انحراف شرایطی خروجی برای نیروی اصطکاک حالتی نوسانی خواهد داشت.

از نتایج شکل ۵ مشخص است که افزایش پریلود اثرات مثبتی بر عملکرد یاتاقان دارد، زیرا با افزایش میزان آن ($\delta \rightarrow 1$) توزیع فشار تولیدی درون فیلم روانکار یاتاقان تقویت خواهد شد. شکل ۶ گویای افزایش مقدار فشار با افزایش عدد کوپلینگ و با کاهش طول مشخصه بی‌بعد سیال میکروپلار می‌باشد. کمترین مقدار فشار در این حالت هنگامی که مشخصات روانکار به سیال نیوتنی ($N^2 \rightarrow 0$) و $I_m \rightarrow \infty$ نزدیک شود روی خواهد داد. علت افزایش فشار در مقادیر اندک I_m و یا مقادیر بالای N^2 به افزایش لزجت

مراجع

- [1] Raimondi AA, Boyd J (1958) A solution for the finite journal bearing and its application to analysis and design. ASLE Trans 1: 159–209.
- [2] Kato T, Hori Y (1988) A fast method for calculating dynamic coefficients of a finite width journal bearing with quasi Reynolds boundary condition. ASME Journal of Trib 110: 387–393.
- [3] Pinkus O (1956) Analysis of elliptical bearings. Trans ASME 16: 965–976.
- [4] Malik M (1983) A comparative study of some two-lobed journal bearing configurations. ASLE Transa, 26: 118–125.
- [5] Jeffery GB (1922) The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid. Proc.R. Soc. London. Ser .A 102: 161–179.
- [6] Eringen A (1964) Simple micro fluids. Int Journal of Engineering Science 2: 205–217.
- [7] Eringen A (1966) Theory of micropolar fluids. Journal of Mathematis and Mechanics 16: 1–18.
- [8] Khonsari MM, Brewe DE (1989) On the performance of finite journal bearing lubricated with micropolar fluids. Trib Trans 32: 155–150.
- [9] Wang X, Zhu K (2006) Numerical analysis of journal bearing lubricated with micropolar fluid including thermal and cavitating effects. Trib Int 39: 227–237.
- [10] Prabhakran Nair K, Sukamaram VP (2007) Static and dynamic analysis of elasto-hydrodynamic elliptical journal bearing with micropolar lubricant. Trib Int 40: 297–305.
- [11] Naduvinamani NB, Santosh S (2011) Micropolar fluid squeeze film lubrication of finite porous journal bearing. Trib Int 44 (4): 409–416.
- [12] Malik M, Bert CW (1994) Differential quadrature solutions for steady-state incompressible and compressible lubrication problems. Journal of Trib 116: 296–302.
- [13] Zhang Q, Guo G, Winoto SH (2002) Analysis of hydrodynamic journal bearing with GDQ method. Magnetic. Rec. Conf. Singapore.
- [14] Rahmatabadi AD, Zare Mehrjardi M, Fazel MR (2010) Performance analysis of micropolar lubricated journal bearings using GDQ method. Trib Int 43: 2000–2009.
- [15] Rahmatabadi AD, Nekoeimehr M, Rashidi R (2010) Micropolar lubricant effects on the performance of noncircular lobed bearings. Trib Int 43: 404–413.

امکان دستیابی به شرایط مطلوب‌تر عملکردی نظیر ظرفیت حمل بار بالاتر و متغیر ضریب اصطکاک کوچکتر با یک چرخش ۳۰ درجه‌ای در یاتاقان‌های غیرمدور مورد بررسی می‌باشد.

تحت شرایط کارکرد یکسان تاثیر زاویه انحراف بر عملکرد یاتاقان‌های ژورنال دو-لب به مراتب بیش از انواع سه-لب می‌باشد. این تاثیرات به صورت کاهش زاویه مشخصه و افزایش میزان نشتی در عملکرد خروجی یاتاقان‌های ژورنال غیر مدور ظهور می‌یابد.

۹- فهرست علائم

در جدول زیر کمیت‌های بی بعد بدون علامت بار مشخص گردیده‌اند و علامت بار صرفاً نمایشگر بعد دار بودن کمیت مربوطه می‌باشد.

\bar{C} (m)	لقی شعاعی متغیر درون یاتاقان ژورنال غیر مدور
\bar{C}_m (m)	کمترین میزان لقی شعاعی برای حالتی که مرکز محور و یاتاقان بر هم منطبق هستند
\bar{h} (m)	ضخامت فیلم روانکار
\bar{P} (N/m ²)	فشار فیلم سیال
W	قابلیت حمل بار
x, y, z	محورهای مختصات کارتزین منطبق بر مرکز یاتاقان
O_j	مرکز محور
\bar{L} (m)	طول یاتاقان
O_b	مرکز یاتاقان

علائم یونانی

ε	خروج از مرکزی یاتاقان
λ ($\bar{L}/2\bar{R}$)	نسبت منظری درون یاتاقان
δ (\bar{C}_m/\bar{C})	پرلود درون یاتاقان
ϕ_0	زاویه بین خط‌المركزین یاتاقان ژورنال با محور Z
θ	مختصات زاویه‌ای اندازه گیری شده از محور X
θ_0	زاویه وضعی درون یاتاقان
θ_1^1, θ_1^2	زاویه مابین نقطه شروع و پایان لب A نسبت به محور X