مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16، ص‌ص 45-56

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر میزان پیش بار بر رفتار دینامیکی غیرخطی یاتاقان ژورنال آئرودینامیکی غیرمدور

محمد مهدی جلیلی[1*]، مهدی زارع مهرجردی[2]، رضا رشیدی میبدی[3]

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران
* یزد، صندوق پستی741- 89195، jalili@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 مرداد 1393
پذیرش: 04 مهر 1393
ارائه در سایت: 06 آبان 1393

کلید واژگان:
یاتاقان ژورنال غیرمدور
روانکار گازی
رفتار دینامیک غیرخطی
نگاشت پوانکاره
نمودار دوشاخه‌گی

چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر میزان پیش بار بر رفتار دینامیکی غیرخطی یاتاقان ژورنال آیرودینامیکی غیرمدور دو لب با استفاده از روش حل عددی اجزاء محدود بررسی شده‌است. با فرض صلب بودن روتور، معادله رینولدز حاکم بر روانکاری یاتاقان گازی در حالت استاتیکی و دینامیکی استخراج شده و نتایج مربوط به عملکرد یاتاقان در مقادیر مختلف پریلود مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین جهت اعمال همزمان اثرات زمانی در معادلات دینامیکی حرکت روتور روش رانگ – کوتا مرتبه چهار بکارگرفته شده‌است. در نهایت به منظور سنجش کیفیت حرکت روتور در فضای لقی یاتاقان، با توجه به نتایج استخراج شده در بازه‌های زمانی مطلوب، نمودارهای پاسخ فرکانسی، طیف توانی، مسیر دینامیکی، نگاشت پوانکاره و نمودار دو شاخه‌گی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل، بروز رفتارهای پریودیک، شبه نوسانی و بی‌نظم منجر به برخورد سطوح روتور و یاتاقان را به ازای مقادیر مختلف پیش بار آشکار می‌سازند. تحلیل نمودارها گویای آنست که در صورت انتخاب مجموعه‌ای از شرایط مناسب بارگذاری، طراحی و مونتاژ برای سیستم‌های دوار شامل یاتاقان آئرودینامیکی می‌توان رفتار دینامیکی مرکز محور را به نحوی کنترل نمود که از هرگونه حرکت اغتشاشی نامناسب و یا منجر به برخورد و سایش سطوح جلوگیری نمود.

Effects of Preload on Nonlinear Dynamic Behavior of Noncircular Aerodynamic Journal Bearing

Mohammad Mahdi Jalili[1*], Mahdi Zare Mehrjardi[2], Reza Rashidi Meybodi[3]

1- Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.
2- Mechanical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran.
3- Mechanical Engineering Department, Payame Noor University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran, jalili@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 August 2014
Accepted 26 September 2014
Available Online 28 October 2014

Keywords:
Noncircular journal bearing
Gas lubricant
Nonlinear dynamic behavior
Poincare map
Bifurcation diagram

ABSTRACT

In this article, using finite element method the effects of the preload on the nonlinear dynamic behavior of the noncircular two lobe aerodynamic journal bearing have been investigated. Assuming that the rotor is solid, the governing Reynolds equations for both the gas lubricant and rotor equation of motion in static and dynamic conditions have been derived and performance of the noncircular aerodynamic journal bearing in different conditions has been evaluated. Rung Kutta method has been used to solve the time dependent equations of motions of noncircular aerodynamic journal bearing and its gas lubricant. Using the numerical results, to investigate the motion of the center of the rotor in dynamic conditions, the graphs of frequency response, power spectrum, dynamic trajectory, Poincare map and bifurcation diagram have been plotted. The results show periodic, quasi periodic and chaotic rotor behavior for different bearing preload. It is concluded that appropriate selection of rotor parameters like its preload and suitable design and fabrication of rotor and its bearing can prevent any undesirable perturbed motions of the shaft and both the collision and wear of the rotor and bearing.

1- مقدمه

در دهه‌های اخیر یاتاقان‌های ژورنال آئرودینامیکی توجه بسیاری از پژوهشگران حوزه روانکاری را به خود جلب نموده و ارزیابی تئوری و عملی شرایط کارکرد اینگونه از یاتاقان‌ها موضوع تحقیقات زیادی را به خود اختصاص داده‌است. بطور کلی رشد سریع میزان استفاده از تکنولوژی یاتاقان‌های گازی مرهون کاربردهای مهندسی وسیع آنها در عرصه‌هایی نظیر ماشین‌های ابزار دقیق، هواپیماهای جت، راکتورهای هسته‌ای، ماشین آلات صنایع نساجی، مته‌های دندانپزشکی و موارد متعدد دیگری می‌باشد.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. M. Jalili, M. Zare Mehrjardi, R. Rashidi Meybodi, Effects of Preload on Nonlinear Dynamic Behavior of Noncircular Aerodynamic Journal Bearing, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 16, pp. 45-56, 2015 (In Persian)

یاتاقان‌های ژورنال آئرودینامیکی از مزایایی نظیر اصطکاک بسیار اندک، عدم آلودگی و دسترسی آسان به روانکار برخوردار می‌باشند هر چند که مشخصه‌های پایداری دینامیکی آنها به علت ویسکوزیته پایین روانکار ضعیف در اغلب موارد ضعیف خواهد بود. از اینرو بررسی رفتار دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال گازی و تلاش در راستای طراحی اولیه مناسب سیستم جهت پیشگیری از مواجهه با وضعیت عملکردی نامطلوب و غیر قابل کنترل مجموعه روتور و یاتاقان امری ضروری به نظر می‌رسد.

در سال 1961 کاستلی و الراد کمک قابل توجهی به فهم بهتر از پدیده دینامیک سیال مختلط در حوزه روانکاری گازی نموده و اعتبار فرضیات مورد استفاده توسط محققین پیشین را اثبات کردند[1]. این پژوهشگران مشتقات زمانی فشار در معادله رینولدز را حذف نموده و مسیر چرخش مرکز روتور در فضای یاتاقان را با استفاده از انتگرال گیری عددی از معادلات حرکت سیستم در وضعیت عملکردی خاص با لحاظ شرایط مرزی اولیه تحلیل نمودند. در سال 1978 هولمز و همکارانش یک رفتار نامنظم را درون یاتاقان‌های ژورنال کوتاه مورد بررسی قرار دادند[2]. آنان اثرات ملایم میزان نابالانسی و نسبت خروج از مرکزی بالا که منجر به بروز پاسخ‌های حرکتی نامتناوب مرکز روتور در سرعت‌های فراتر از حد آستانه ناپایداری بود، را تحلیل نمودند.

چاندرا و همکارانش مطالعه رفتار استاتیکی و دینامیکی چهار نمونه از یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور گازی را انجام دادند[3]. آنها در پژوهش خود معادله رینولدز خطی شده با روش حل عددی اجزا محدود را تحلیل و نتایج مربوط به پایداری یاتاقان‌های مورد نظر را با هم مقایسه نمودند. آنالیز دینامیکی غیرخطی حرکت مرکز روتور صلب و انعطاف‌پذیر دوار در فضای یاتاقان ژورنال گازی خود میزان توسط وانگ و همکارانش انجام شد[4]. آنان در پژوهش‌های خود با فرض جرم روتور و سرعت چرخش به عنوان پارامترهای موثر بر وضعیت خروجی سیستم، به تحلیل حرکات هارمونیک و شبه هارمونیک مرکز روتور پرداختند.

در سال 2005، شن و چنگ حرکت انشعابی مرکز روتور صلب در فضای یاتاقان‌های ژورنال آئرودینامیکی کوتاه را بررسی نمودند[5]. این محققین چگونگی ایجاد حرکات هارمونیک و هارمونیک جزئی توأم با رفتار دینامیکی مختلط مرکز روتور را تشریح نمودند. در سال 2007، رفتار روتورهای صلب و انعطاف‌پذیر درون یاتاقان‌های ژورنال گازی دنده جناقی توسط وانگ و همکارانش مورد ارزیابی قرار گرفت [6]. نتایج بررسی آنها به استخراج یک رفتار دینامیک مختلط شامل قسمت‌های هارمونیک و شبه هارمونیک برای سیستم دوار منجر گردید.

بررسی ویژگی‌های استاتیکی و دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال گازی غیرمدور با توجه به میزان زاویه نصب و پیش‌بار در حالات مختلف توسط رحمت آبادی و رشیدی انجام گرفت [۷،8]. نتایج پژوهش نشان داد که یاتاقان‌های گازی غیرمدور رفتار دینامیکی پایدارتری نسبت به انواع مدور مشابه داشته و امکان افزایش محدوده پایداری عملکرد این یاتاقان‌ها تنها با اعمال تغییرات جزئی در مقدار زاویه نصب یاتاقان امکان پذیر خواهد بود.

وانگ و همکارانش در سال 2011 رفتار دینامیکی غیرخطی روتور انعطاف پذیر درون یاتاقان گازی شیار محوری خود میزان را مورد بررسی قرار دادند [9]. نتایج پژوهش آنان از تاثیر ویژه نیروهای دینامیکی غیرخطی فیلم روانکار بر پایداری سیستم دوار مورد بررسی حکایت داشته و بروز حرکات نوسانی، شبه نوسانی و آشوبی مرکز روتور این پدیده را تایید می‌نمودند. یک روش تحلیلی جدید از ترکیب روش‌های انتقال مشتق و تفاضل محدود جهت بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی یاتاقان گازی توسط وانگ در سال 2012 ارائه گردید [10]. بررسی رفتار یاتاقان گازی بر پایه این روش، رخداد حرکات پریودیک، پریودیک جزئی، شبه نوسانی و آشوبی روتور به ازای مقادیر مختلف عدد یاتاقان و جرم محور را نشان می‌داد. رشیدی و همکارانش در سال 2012 بررسی عددی یک سیستم دوار شامل روتور صلب دارای نابالانسی جرمی و یاتاقان گازی چهار لب را انجام دادند [11]. نتایج بیانگر وجود رفتارهای پریودیک، چند پریودیک و شبه نوسانی متأثر از نابالانسی جرمی روتور به ازای دو مقدار متفاوت نسبت منظری یاتاقان بودند. در ادامه پژوهش‌های پیشین وانگ و همکارانش در سال 2014 تحلیل آشوبی یک سیستم دوار غیرخطی شامل روتور و یاتاقان گازی شیار محوری را بررسی نمودند [12]. در این پژوهش رفتار ژیروسکوپی روتور درون یاتاقان گازی با سه شیار محوری مورد بررسی قرار گرفته بود. نتایج حاصل بر پایه نگاشت پوانکاره و دیاگرام دوشاخه‌گی، امکان مشاهده رفتارهای پریودیک، شبه نوسانی و آشوبی منجر به برخورد روتور و یاتاقان در سیستم مورد ارزیابی را تایید می‌کرد.

اگرچه کارهای پیشین بینش خوبی در رابطه با رفتار سیستم‌های دوار متشکل از یاتاقان و روتور ارائه می‌دهند، ولی بررسی رفتار دوشاخه‌گی و حرکت دینامیکی غیرخطی مربوط به یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور آئرودینامیکی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته‌است. از این رو در پژوهش حاضر به بررسی تاثیرات میزان غیرمدوری بر رفتار دینامیک غیرخطی روتور صلب نگهداشته شده در دو تکیه گاه شامل یاتاقان گازی غیرمدور دو لب پرداخته شده‌است.

پیش‌بار در یاتاقان ژورنال غیرمدور بیانگر میزان غیرمدور یا بیضوی شدن یاتاقان در مقایسه با یاتاقان ژورنال مدور مسطح است. برای پیش بار صفر، روتور و لب‌های یاتاقان در محل خط‌المرکزین آنها بر هم مماس می‌شوند در حالی که در پیش بار واحد، یک یاتاقان لب‌دار به یک یاتاقان ژورنال مدور مبدل خواهد شد.

با توجه به غیرخطی بودن رابطه فشار درون فیلم گازی، حل معادلات حاکم به روش تحلیلی دشوار خواهد بود. لذا در پژوهش حاضر جهت استخراج توزیع فشار توسط معادله رینولدز از روش حل عددی اجزاء محدود استفاده گردیده‌است. همچنین برای لحاظ همزمان اثرات زمانی در حل معادلات حرکت روتور و معادله رینولدز حاکم بر توزیع فشار درون فیلم روانکار از روش رانگ- کوتا مرتبه چهار استفاده شده‌است.

2- تئوری

شکل 1 یاتاقان‌های ژورنال گازی مدور و غیرمدور مورد بررسی را نشان می‌دهد. مطابق شکل چرخش محور بصورت خارج از مرکز نسبت به یاتاقان و با سرعت ثابت سبب تولید فشار درون فیلم روانکار قرار گرفته در فضای لقی یاتاقان خواهد شد. توانایی یاتاقان در حمل بار وارده به محور چرخان به دلیل توزیع نامتقارن فشار درون فیلم روانکار می‌باشد. هر گونه اغتشاش در وضعیت حرکتی روتور ناشی از عوامل گوناگونی چون تغییر مکان و سرعت ناگهانی و یا اعمال بارهای خارجی و ضربات نامطلوب سبب خروج محور از وضعیت پایدار و قرارگیری سیستم در وضعیت دینامیکی می‌گردد.

یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور همانند شکل 1، از کنار هم قرار گرفتن چندین لب ایجاد می‌گردند. بکارگیری یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور در سال‌های اخیر به دلیل ویژگی‌های خاصی نظیر بروز رفتارهای دینامیکی مطلوب در مقابل اغتشاشات سیستم، تنوع گسترده و امکان استفاده در

سیستم‌های با محدودیت فضایی رشد روز افزونی به خود گرفته‌است. انواع گازی یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور به علت عملکرد مناسب‌تر بویژه توان بالاتر در مستهلک نمودن اغتشاشات احتمالی حرکت روتور، امروزه به عنوان جایگزینی مناسب برای انواع مدور خود در بسیاری از ماشین‌های ابزار دقیق، موتور هواپیما، کمپرسورها، توربوماشین‌ها و تجهیزات نوین هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. درون این دسته از یاتاقان‌ها هر یک از لب‌ها همانند یک یاتاقان ژورنال جزئی مجزا عمل خواهد کرد. برآیند کلی عملکرد یاتاقان از حاصل‌جمع برداری یا عددی خروجی لب‌ها بسته به نوع پارامتر مورد بررسی بدست می‌آید. برای تحلیل مسأله وضعیت دینامیکی حرکت سیستم فرضیاتی نظیر ثابت بودن ویسکوزیته روانکار، تبعیت روانکار از قوانین گاز کامل، عدم وجود انحراف در محور و صلب بودن یاتاقان مد نظر قرار گرفته‌اند.

2-1- معادلات حاکم بر روانکار

معادله رینولدز حاکم بر روانکاری هیدرودینامیکی در هر یک از لب‌های یاتاقان ژورنال غیرمدور با روانکار تراکم‌پذیر عبارتست از(رابطه(1)):

$$\frac{\partial}{\partial \bar{X}}\left[\bar{h}^3\bar{p}^*\frac{\partial \bar{p}^*}{\partial \bar{X}}\right]+\frac{\partial}{\partial \bar{Z}}\left[\bar{h}^3\bar{p}^*\frac{\partial \bar{p}^*}{\partial \bar{Z}}\right]=6\bar{\mu}\left[\bar{U}\frac{\partial}{\partial \bar{X}}+2\frac{\partial}{\partial \bar{t}}\right]\left(\bar{p}^*\bar{h}\right) \qquad (1)$$

در رابطه فوق $\bar{p}^*$ فشار مطلق درون فیلم روانکار، $\bar{\mu}$ ویسکوزیته گاز، $\bar{U}$ سرعت محیطی چرخش شافت درون یاتاقان، $\bar{t}$ زمان و $\bar{h}$ نیز ضخامت فیلم روانکار در هر نقطه پیرامونی یاتاقان می‌باشد که برای یاتاقان ژورنال مدور و غیرمدور از رابطه (2) بدست می‌آید[3]:

$$\bar{h}=\bar{C}-\left(\bar{X}_j\right)\cos\theta-\left(\bar{Y}_j\right)\sin\theta++(\bar{C}-\bar{C}_m)\cos(\theta-\theta_0^{\,k}) \qquad (2)$$

در رابطه (2)، $\left(\bar{X}_j,\bar{Y}_j\right)$ بیانگر محل مرکز محور در حالت دینامیکی، θ_0^k زاویه خط المرکزین لب‌ها، $\bar{C}$ لقی شعاعی مرسوم و $\bar{C}_m$ لقی شعاعی مینیمم در صورت هم مرکزی روتور و یاتاقان می‌باشد.

برای افزایش سهولت روند حل معادله رینولدز می‌توان فشار مطلق در رابطه (1) را بصورت رابطه(3) بازنویسی نمود.

$$\bar{p}^*=\bar{p}_a+\bar{p} \qquad (3)$$

که در آن، $\bar{p}_a$ و $\bar{p}$ در رابطه به ترتیب بیانگر فشار محیط و فشار جزئی فیلم روانکار می‌باشند.

برای دستیابی به فرم بی‌بعد معادلات (1) و (2) از پارامترهای بدون بعد مطابق روابط (4) استفاده گردیده‌است.

$$\begin{aligned}&\bar{h}=\bar{C}_m h, \quad \bar{C}_m=\bar{C}\delta, \quad \bar{X}=\bar{R}\theta, \quad \bar{U}=\bar{R}\bar{\omega}_0 U,\\ &\bar{Z}=\bar{R}\xi, \quad \left(\bar{X}_j,\bar{Y}_j\right)=\bar{C}_m\left(X_j,Y_j\right), \quad \bar{p}=\bar{p}_a p, \quad \bar{t}=\frac{\tau}{\bar{\omega}_0}\end{aligned} \qquad (4)$$

پارامترهای $\bar{\omega}_0$ و $\bar{R}$ در رابطه (4) به ترتیب به شعاع و سرعت چرخش روتور در حالت پایدار اشاره دارند. با جایگذاری عبارات فوق در رابطه (2) فرم بی‌بعد رابطه ضخامت فیلم روانکار بصورت رابطه(5) حاصل می‌گردد:

$$h=\frac{1}{\delta}-\left(X_j\right)\cos\theta-\left(Y_j\right)\sin\theta+\left(\frac{1}{\delta}-1\right)\cos(\theta-\theta_0^{\,k}) \qquad (5)$$

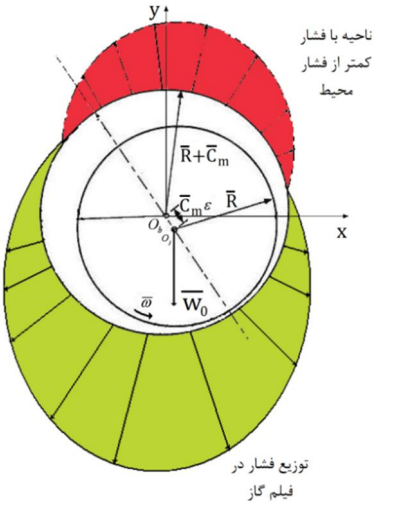
در صورتیکه پارامترهای بی‌بعد رابطه (4) در بازنویسی معادله (1) بکار گرفته شوند، فرم نهایی معادله رینولدز حاکم بر توزیع فشار در فیلم روانکار گازی مطابق رابطه (6) حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left[h^3(p+1)\frac{\partial p}{\partial\theta}\right]+\frac{\partial}{\partial\xi}\left[h^3(p+1)\frac{\partial p}{\partial\xi}\right]=\Lambda\left[U\frac{\partial}{\partial\theta}+2\frac{\partial}{\partial\tau}\right]\left[(p+1)h\right] \qquad (6)$$

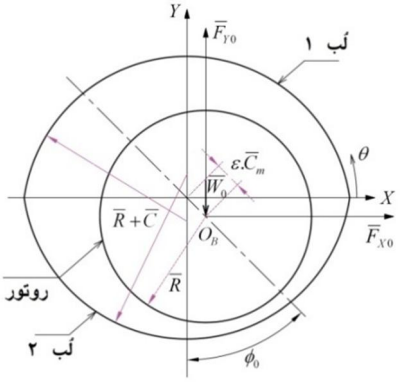
θ و ξ به ترتیب معرف راستای محیطی و طولی یاتاقان بوده و عدد یاتاقان (Λ) طبق رابطه (7) عبارتست از:

$$\Lambda=\frac{6\bar{\mu}\bar{\omega}_0\bar{R}^2}{\bar{p}_a\bar{C}_m^2} \qquad (7)$$

معادله رینولدز اصلاحی رابطه (6) یک معادله دیفرانسیل جزئی غیرخطی است. لذا



(الف)



(ب)

شکل 1 یاتاقان ژورنال گازی (الف) مدور (ب) غیرمدور دو لب

می‌توان برای حل این معادله از روش حل عددی اجزاء محدود استفاده نمود. برای نیل به این هدف، از متغیر ترکیبی $\Psi=\Psi(\tau)=Ph$ به عنوان متغیر اصلی در تمامی مسیر حل مسأله استفاده شده‌است. علت این امر تغییرات یکنواخت‌تر این تابع نسبت به تابع توزیع فشار می‌باشد. زیرا در هر ناحیه از روانکار همزمان با کاهش ضخامت فیلم، تقویت توزیع فشار امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. با بازنویسی رابطه (6) بر حسب تابع جدید (Ψ) به رابطه(8) می‌رسیم:

$$\frac{\partial}{\partial\theta}\left[(h-\Psi)\left\{(\Psi+h)\frac{\partial\Psi}{\partial\theta}\right\}\right]+\frac{\partial}{\partial\xi}\left[h(\Psi+h)\frac{\partial\Psi}{\partial\xi}\right]=\Lambda\left[U\frac{\partial}{\partial\theta}+2\frac{\partial}{\partial\tau}\right]\left[(\Psi+h)h\right] \qquad (8)$$

برای بازنویسی رابطه (8) بر اساس فرمولاسیون روش حل عددی اجزاء محدود، باقیمانده وزنی گالرکین برای هر المان روی دامنه مسأله بر پایه متغیر Ψ بفرم رابطه(9) بیان می‌شود.

$$\begin{aligned}&\iint_{A^e}\left\{\frac{\partial\Psi^e}{\partial\tau}-\frac{1}{2\Lambda}\frac{\partial}{\partial\theta}\left[h\left(\Psi^e+h\right)\frac{\partial\Psi^e}{\partial\theta}-\left(\Psi^e+h\right)\Psi^e\frac{\partial h}{\partial\theta}\right]\right.\\ &\left.-\frac{1}{2\Lambda}\frac{\partial}{\partial\xi}\left[h\left(\Psi^e+h\right)\frac{\partial\Psi^e}{\partial\xi}\right]+\frac{1}{2}U\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\Psi^e+h\right)+\frac{\partial h}{\partial\tau}\right\}N_i^e d\theta d\xi=0\end{aligned} \qquad (9)$$

در رابطه (9)، N_i^e تابع تقریب و A^e سطح المان مورد بررسی می‌باشند. با توجه به دامنه مش‌بندی شده برای متغیر Ψ و بررسی آن روی المان e، تابع Ψ را می‌توان به‌فرم رابطه(10) تقریب زد.

$$\Psi^e=\sum_{j=1}^{n_e}N_j\Psi_j(\tau) \qquad (10)$$

که در آن، e یک المان خاص، n_e تعداد گره‌های المان، N_j^e توابع شکل و Ψ_j مقادیر گرهی تابع Ψ در زمان τ می‌باشند. با توجه به بررسی‌های انجام

گرفته، مطابق شکل 2 استفاده از المان‌های مستطیلی خطی ایزوپارامتریک و به تبع آن‌ها توابع شکل بفرم رابطه(11) می‌تواند نتایج مطلوب‌تری را ارائه دهد.

$$N_i(\eta,\zeta)=\frac{1}{4}(1+\zeta\zeta_i)(1+\eta\eta_i) \tag{11}$$

با جایگذاری رابطه (10) در معادله (9) و ساده‌سازی انتگرال‌ها، معادلات اجزاء محدود برای یک المان از دامنه جریان گسسته‌سازی شده را می‌توان مطابق روابط (12)و(13) بیان نمود.

$$[F]^e\{\Psi\}^e=\{V\}^e+\{Q\}^e \tag{12}$$

به نحوی که مولفه‌های ماتریس‌های المان عبارتند از :

$$F_{ij}^e=\iint_{A^e}N_i^eN_j^e\,d\theta d\xi$$
$$V_{ij}^e=-\frac{1}{2\Lambda}\iint_{A^e}\left(\Psi^e+h\right)\left[h\left\{\frac{\partial\Psi^e}{\partial\theta}\frac{\partial N_i^e}{\partial\theta}-\frac{\partial\Psi^e}{\partial\xi}\frac{\partial N_i^e}{\partial\xi}\right\}-\left\{\Psi^e\frac{\partial h}{\partial\theta}+\Lambda U\right\}\frac{\partial N_i^e}{\partial\theta}\right]d\theta d\xi-\iint_{A^e}\frac{\partial h}{\partial\tau}N_i^e\,d\theta d\xi$$
$$Q_i^e=\int_{S^e}\left(\Psi^e+h\right)\left\{h\frac{\partial\Psi^e}{\partial\theta}-\Psi^e\frac{\partial h}{\partial\theta}-\Lambda U\right\}N_i^e\,d\xi+\int_{S^e}\left(\Psi^e+h\right)h\frac{\partial\Psi^e}{\partial\xi}N_i^e\,d\theta \tag{13}$$

s^e در معادلات فوق بیانگر مرزهای هر المان می‌باشد.

بازنویسی رابطه (10) برای تمامی المان‌های موجود روی دامنه تابع Ψ معادله کلی (14) را بدست می‌دهد.

$$[F]_{n_f\times n_f}\{\Psi\}_{n_f\times1}=\{V\}_{n_f\times1}+\{Q\}_{n_f\times1} \tag{14}$$

در رابطه (14) n_f برابر تعداد تمامی گره‌ها می‌باشد. شرایط مرزی مربوط به متغیرها جهت حل معادله (12) عبارتند از(رابطه(15)) :

$$\Psi\left(\theta_1^k,\xi,\tau\right)=\Psi\left(\theta_2^k,\xi,\tau\right)=0$$
$$\dot\Psi\left(\theta_1^k,\xi,\tau\right)=\dot\Psi\left(\theta_2^k,\xi,\tau\right)=0$$
$$\Psi\left(\theta,\pm\lambda,\tau\right)=0$$
$$\dot\Psi\left(\theta,\pm\lambda,\tau\right)=0 \tag{15}$$

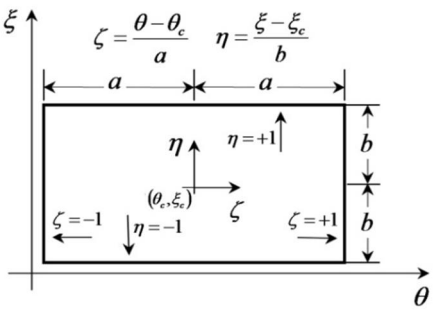
در هر لحظه هنگامی که وضعیت سینماتیکی مرکز روتور مشخص باشد، رابطه (14) شامل دو متغیر، Ψ_i و Q_i است به نحوی که در گره‌های داخلی از ناحیه مش‌بندی شده، شار Q_i برابر صفر و Ψ_iها مجهول بوده و در مرزها شرایط بالعکس خواهد بود. به عبارت دیگر برای گره‌هایی از دامنه که در موقعیت $\xi=\pm\lambda$ قرار دارند، و همچنین برای لبه هر یک از لب‌ها $\left(\theta_1^k,\theta_2^k\right)$، Ψ_i مقدار مشخصی دارد در حالیکه مقادیر شار Q_i نامعلوم هستند. بنابراین معادله (14) دارای تعداد مجهولاتی برابر با تعداد معادلات خواهد بود و می‌توان آن‌ها را با توجه به شرایط مرزی تحلیل نمود. حل این معادله نتایج رابطه(16) را بدست خواهد داد.

$$\{\Psi\}_{n_f\times1}=\{g\}_{n_f\times1} \tag{16}$$

و به ازای $i=1,2,\dots,n_f$ تابع g_i بصورت $g_i=g_i(P,\tau)$ می‌باشد.

2-2- معادلات دینامیکی حرکت روتور

چگونگی وضعیت دینامیکی جابجایی روتور در فضای لقی یاتاقان ژورنال



شکل 2 مختصات طبیعی (η,ξ) المان مستطیلی

غیرمدور دو لب در شکل 3 آمده‌است. با توجه به شکل، معادلات حرکت مرکز روتور در راستای محورهای X و Y را می‌توان به فرم رابطه (17) بیان نمود.

$$\bar m_r\frac{d^2\bar X}{d\bar t^2}=\left(\bar F_X-\bar F_{X0}\right)+\bar m_r\bar\rho\bar\omega^2\cos(\bar\omega\bar t)$$
$$\bar m_r\frac{d^2\bar Y}{d\bar t^2}=\left(\bar F_Y-\bar F_{Y0}\right)+\bar m_r\bar\rho\bar\omega^2\sin(\bar\omega\bar t) \tag{17}$$

در روابط (17) $\bar m_r$ جرم روتور، $\bar\rho$ خروج از مرکزی جرمی روتور ناشی از نابالانسی و $\bar\omega$ سرعت زاویه‌ای چرخش روتور می‌باشد. $(\bar X,\bar Y)$ مولفه‌های حرکت اغتشاشی مرکز محور در راستای محورهای مختصات بوده و بصورت رابطه(18) تعریف می‌گردند:

$$\bar X=\bar X_j-\bar X_{j0}$$
$$\bar Y=\bar Y_j-\bar Y_{j0} \tag{18}$$

همچنین $\left(\bar F_X,\bar F_Y\right)$ و $\left(\bar F_{X0},\bar F_{Y0}\right)$ به ترتیب مولفه‌های نیروهای دینامیکی و استاتیکی وارد بر محور ناشی از توزیع فشار ایجاد شده درون فیلم روانکار می‌باشند. مولفه‌های نیروی فیلم روانکار وارد بر روتور را می‌توان به صورت رابطه(19) بیان نمود:

$$\begin{Bmatrix}\bar F_X-\bar F_{X0}\\ \bar F_Y-\bar F_{Y0}\end{Bmatrix}=-\bar p_a\bar R^2\iint_A\left(p-p_0\right)\begin{Bmatrix}\cos\theta\\ \sin\theta\end{Bmatrix}d\theta d\xi \tag{19}$$

در رابطه (19) A سطح مقطع تحت فشار روتور، $p_0=p_0\left(X_{j0},Y_{j0}\right)$ و $p=p\left(X_j,Y_j,V_x,V_y,\tau\right)$ فشار فیلم روانکار به ترتیب در حالت‌های استاتیکی و دینامیکی هستند.

برای بازنویسی معادلات دینامیکی حرکت روتور از پارامترهای بی‌بعد معرفی شده در روابط (20) و (21) استفاده شده‌است.

$$X=\frac{\bar X}{\bar C_m},\quad Y=\frac{\bar Y}{\bar C_m} \tag{20}$$

$$m_r=\frac{\bar m_r\bar C_m\bar\omega^2}{\bar p_a\bar R^2},\ F_{X0}=\frac{\bar F_{X0}}{\bar p_a\bar R^2},\ F_{Y0}=\frac{\bar F_{Y0}}{\bar p_a\bar R^2}$$
$$\rho=\frac{\bar m_r\bar\rho\bar\omega^2}{\bar p_a\bar R^2},\ F_X=\frac{\bar F_X}{\bar p_a\bar R^2},\ F_Y=\frac{\bar F_Y}{\bar p_a\bar R^2} \tag{21}$$

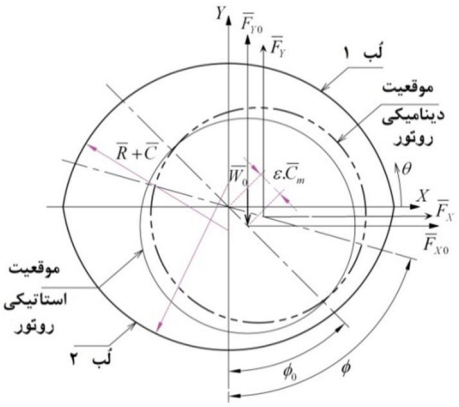
با جایگذاری پارامترهای فوق در روابط (17) رابطه(22) را خواهیم داشت:

$$A_x=\frac{d^2X}{d\tau^2}=\frac{F_X-F_{X0}}{m_r}+\frac{\rho}{m_r}\cos\tau$$
$$A_y=\frac{d^2Y}{d\tau^2}=\frac{F_Y-F_{Y0}}{m_r}+\frac{\rho}{m_r}\sin\tau \tag{22}$$

با معرفی متغیرهای فضای حالت بصورت رابطه(23)

$$S_1=X,\quad S_2=Y,\quad S_3=V_X,\quad S_4=V_Y \tag{23}$$

می‌توان معادلات حرکت را همانند روابط (24) به حوزه فضای حالت منتقل نمود.



شکل 3 بارگذاری محور در شرایط دینامیکی یاتاقان ژورنال غیرمدور دو لب

$$\frac{dS_1}{d\tau}=S_3,\quad \frac{dS_3}{d\tau}=\frac{F_X-F_{X0}}{m_r}+\frac{\rho}{m_r}\cos\tau$$
$$\frac{dS_2}{d\tau}=S_4,\quad \frac{dS_4}{d\tau}=\frac{F_Y-F_{Y0}}{m_r}+\frac{\rho}{m_r}\sin\tau \qquad (24)$$

معادلات (16) و (24) توصیف‌گر یک سیستم دینامیکی غیرخطی هستند که شکل کلی معادلات آن را می‌توان به صورت رابطه(25) بیان کرد:

$$\frac{dS_i}{d\tau}=f_i(p,S_1,S_2,S_3,S_4,\tau),\quad i=1,2,3,4$$
$$\frac{d\Psi_i}{d\tau}=g_i(p,S_1,S_2,S_3,S_4,\tau),\quad i=1,2,\ldots,n_f \qquad (25)$$

مسیر حل با تعیین نقطه تعادل استاتیکی آغاز و پارامترهای ورودی مورد نیاز حل دینامیکی از خروجی تحلیل استاتیک فراهم می‌شوند. بنابراین در ابتدا معادله رینولدز حاکم در حالت استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای (X_{j0},Y_{j0}) و Ψ_0 جهت استفاده در تحلیل دینامیکی استخراج می‌گردند. طی مراحل حل استاتیکی یاتاقان سرعت اولیه روتور برابر صفر فرض می‌گردد. در ادامه برای لحاظ اثرات زمانی در انتگرال‌گیری عددی معادلات (25) از روش رانگ - کوتا مرتبه چهار استفاده شده‌است. با این روش شتاب، سرعت و جابجایی جدید مرکز روتور در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل معادلات دینامیکی در هر گام زمانی به عنوان داده‌ی ورودی و شرایط اولیه گام زمانی بعدی بکارگرفته می‌شود. همچنین مکان جدید قرارگیری مرکز روتور در هر گام برای تعیین ضخامت فیلم روانکار و توزیع فشار جدید مورد استفاده قرار گرفته و محاسبه بزرگی نیروهای دینامیکی در هر مرحله با کمک رابطه (19) امکان‌پذیر خواهد شد.

3- بررسی عددی

به علت شدت میزان غیرخطی بودن نیروهای فیلم روانکار، رفتار سیستم در بررسی حاضر با استفاده از روش حل عددی انتگرالی اجزاء محدود مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. با بررسی‌های مکرر انجام گرفته مشخص می‌شود که استفاده از بازه زمان $\Delta t=\pi/300$ در حل معادلات فضای حالت با بکارگیری روش رانگ-کوتا، امکان دستیابی به نتایج دقیق از حل زمانی مساله را با سرعت همگرایی بالاتری میسر خواهد ساخت.

برای حل معادله (12) از روش تکرار گوس سایدل استفاده شده‌است. با حل معادله مذکور امکان تعیین بردار ستونی $\{\psi\}$ با انتگرال‌گیری زمانی فراهم می‌شود. معیار همگرایی با توجه به مقدار گرهی پارامتر Ψ_i روی نقاط نمونه مفروض روی دامنه مساله بصورت رابطه(26) تعریف می‌شود:

$$\left|\dot{\Psi}_{i,j+1}-\dot{\Psi}_{i,j}\right|\le\dot{\psi}_{tot}\quad,\quad i=1,2,\ldots,n_f \qquad (26)$$

در رابطه فوق j نمایشگر تعداد دفعات تکرار می‌باشد. شرط فوق عدم امکان تغییرات بزرگتر از مقدار $\dot{\Psi}_{tot}$ برای کلیه مقادیر $\dot{\Psi}$ مربوط به گره‌های مختلف روی دامنه مساله حاصل از دو تکرار متوالی روش گوس سایدل را بیان می‌کند. در بررسی حاضر مقدار $\dot{\Psi}_{tot}$ ب 10^{-6} فرض شده‌است.

تعداد600000 داده اولیه مربوط به سری‌های زمانی حاصل از حل عددی مسأله جهت حصول به شرایط پایدار دینامیکی صرف‌نظر شده‌اند. نتایج حاصل نمایشگر مسیر حرکت اوربیتالی مرکز روتور خواهند بود. این داده‌ها در ادمه جهت ترسیم نمودارهای طیف توانی، نگاشت پوانکاره و دیاگرام دوشاخه‌گی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

از تبدیل فوریه برای تعیین طیف توانی مرکز روتور در جهت محورهای مختصات استفاده شده‌است. برای ایجاد نگاشت پوانکاره، یک مقطع پوانکاره مربوط به برش عرضی مسیر حرکت مرکز روتور در حالت دینامیکی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. هر نقطه از این مقطع عرضی، نقطه‌ای گزارش شده از سری‌های زمانی در یک بازه زمانی ثابت T می‌باشد. T برابر دوره تناوب مشتق شده از نیروهای محرک در سیستم‌های خودگردان می‌باشد. تصویر مقطع پوانکاره در صفحه $X-Y$ با نگاشت پوانکاره سیستم دینامیکی مرتبط خواهد بود. دیاگرام دوشاخه‌گی ابزاری مناسب برای مشاهده رفتار دینامیکی غیرخطی سیستم می‌باشد. برای ترسیم این دیاگرام، مکان نقاط روی نمودار پوانکاره برای مقادیر مختلف پیش بار در بازه‌های زمانی ثابت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

4- نتایج

در بررسی انجام شده اطلاعات اصلی مورد نیاز برای تحلیل در تمامی حالات مطابق جدول 1 انتخاب گردیده‌اند[7].

شرایط اولیه مورد استفاده در بررسی دینامیکی یاتاقان مطابق رابطه(27) تعریف گردیده‌اند.

$$X_{j0}=0.1,\quad Y_{j0}=0.0,\quad V_{X0}=0,\quad V_{Y0}=0 \qquad (27)$$

برای اعتبارسنجی برنامه مهیا شده در راستای تحلیل دینامیک غیرخطی یاتاقان‌های ژورنال آئرودینامیکی دو لب نمونه‌ای از نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی، مطابق جداول 2 و 3 با مراجع مقایسه گردیده‌است.

نتایج جداول 2 و 3 از عملکرد مناسب کد نوشته شده جهت بررسی رفتار استاتیکی و دینامیکی غیرخطی یاتاقان‌های گازی دو لب اشاره دارند. در ادامه، تأثیر میزان غیرمدوری (پریلود، δ) بر رفتار دینامیک غیرخطی یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور دو لب آئرودینامیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در حالات مختلف بررسی نسبت منظری یاتاقان ژورنال غیرمدور دو لب برابر $\lambda=1.5$ لحاظ شده و اثرات خروج از مرکزیت جرمی محور نیز در نظر گرفته شده‌است.

جدول 1 پارامترهای اصلی استفاده شده در تحلیل یاتاقان

پارامتر	تعریف	مقدار	واحد
$\bar{\mu}$	ویسکوزیته روانکار گازی	$1/8\times10^{-5}$	kg/m.s
$\bar{R}$	شعاع محور	0/05	m
$\bar{C}$	لقی شعاعی	3×10^{-5}	m
Λ	عدد تراکم‌پذیری یاتاقان	25	-
$\bar{\rho}$	میزان خروج از مرکزیت جرمی محور	0/001	m
$\bar{m}_r$	جرم روتور	25/82	kg
$\bar{W}_0$	بار استاتیکی وارد بر یاتاقان	506/5	N
$\bar{p}_a$	فشار محیط پیرامون یاتاقان	$1/01\times10^{5}$	N/m²

جدول 2 تغییرات قابلیت حمل بار و زاویه وضعی بر حسب عدد یاتاقان (یاتاقان گازی مدور، $\lambda=1.0$، $\varepsilon=0.2$)

FEM		FDM		Λ
θ_0	W	θ_0	W	
79/18	0/0451	79/33	0/0457	0/6
47/88	0/1737	47/93	0/176	3
17/82	0/2682	17/95	0/273	12

جدول 3 مقایسه نتایج مربوط به عملکرد دینامیکی یاتاقان ژورنال گازی غیرمدوردو لب، $\lambda=1.0$

Y		X		روش	δ
$\tau=1000$	$\tau=100$	$\tau=1000$	$\tau=100$		
-0/01566	-0/01936	0/06204	-0/03687	FEM	0/4
-0/01512	-0/01927	0/06169	-0/03586	FDM	
-0/01341	-0/00451	0/00288	-0/08705	FEM	0/5
-0/01331	-0/00490	0/00374	-0/08647	FDM	

4-1- بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی یاتاقان گازی در مقادیر مختلف پریلود در غیاب نابالانسی جرمی روتور $(\bar{\rho}=0)$

در قسمت (الف) شکل‌های 4 و 5 مسیر حرکت اغتشاشی مرکز محور بدون حضور نابالانسی جرمی $(\bar{\rho}=0)$ برای مقادیر مختلف پیش بار آمده‌است. با توجه به نتایج به ازای δ = 55/0 مرکز محور دارای حرکت پریودیک منظم حول نقطه تعادل بوده و با افزایش مقدار پریلود مطابق شکل 5 در δ = 62/0، حرکت به حالت $2T$ پریودیک تغییر وضعیت خواهد داد.

در بخش (ب) شکل‌های 4 و 5 نیز تغییرات سرعت مرکز روتور در راستای محور X بر حسب جابجایی روتور در همان راستا ترسیم شده‌است. با توجه به تصاویر روند مشابه تغییرات سرعت و نوع نوسانات آن‌ها در مقایسه با جابجایی مرکز محور مشخص می‌باشد.

از آنجا که عامل اصلی تحریک مرکز روتور در گام‌های زمانی متوالی نیروهای دینامیکی و یا به عبارت دیگر نیروهای اغتشاشی تولید شده در فیلم روانکار گازی ناشی از انحراف مرکز روتور از مکان تعادل استاتیکی می‌باشند، بررسی نحوه تغییرات این نیروها از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. در قسمت (ج) شکل‌های 4 و 5 مولفه‌های نیروی اغتشاشی در مقادیر مختلف پریلود برای یک روتور بالانس ترسیم شده‌اند. با توجه به شکل‌ها می‌توان مشاهده نمود که با افزایش میزان پریلود میزان نیروهای دینامیکی اغتشاشی به مراتب افزایش یافته و به تبع آن شتاب‌های تحمیلی به روتور در جهت محورهای مختصات، مولفه‌های سرعت و دامنه نوسانات مرکز روتور نسبت به موقعیت تعادل پایدار استاتیکی افزایش یافته و احتمال بروز پدیده برخورد محور و پوسته یاتاقان افزایش خواهد یافت.

در بخش (د) تصاویر 4 و 5 مولفه جابجایی مرکز روتور بر اساس زمان ترسیم شده‌است. شکل 4-د گویای یک حرکت نوسانی با دوره تناوب معین بوده و دامنه مولفه‌های حرکت روتور در جهت محورهای مختصات مقدار معینی را داشته و بر اساس مقدار پریلود بین دو عدد معین نوسان خواهد کرد. با افزایش میزان پریلود و تغییر وضعیت حرکتی از حالت پریودیک به انواع دیگر نظیر $2T$ پریودیک مشابه شکل 5-د، هر یک از مولفه‌های حرکتی مرکز روتور متناسب با نوع حرکت دامنه تغییرات متنوعی را تجربه خواهند نمود.

نمودار طیف توانی نشان داده شده در بخش (و) اشکال 4 و 5 نیز ابزار دیگری است که با کمک آن و انتقال داده‌ها زمانی به حوزه فرکانس می‌توان امکان تشخیص نوع حرکت مرکز روتور را در هر شرایط دلخواهی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. نمودار طیف توانی امکان بررسی فرکانس‌های تشدید کننده وضعیت حرکت دینامیکی اغتشاشی محور را فراهم می‌سازد. در کل می‌توان بیان نمود که دور شدن از رفتار پریودیک و بروز رفتارهای KT پریودیک، شبه نوسانی و آشوبی سبب افزایش نقاط تشدید بصورت قله‌های جدید روی دامنه طیف خواهد شد. این مطلب با مقایسه رفتار نوسانی و $2T$ پریودیک قابل مشاهده در اشکال 4 و 5 (د) بوضوح قابل رویت می‌باشد. جهت افزایش دقت و وضوح بالاتر مشاهدات انجام گرفته در حوزه فرکانس تنها فرکانس‌های اولیه و غالب سیستم در بررسی حاضر مورد ارزیابی قرار گرفته و دامنه تغییرات محور فرکانس محدود انتخاب شده‌است.

نگاشت پوانکاره ابزار دیگری جهت تعیین نوع حرکت سیستم دینامیکی در وضعیت‌های مختلف می‌باشد. این نگاشت با ایجاد یک مقطع عرضی در مسیر منحنی نوسانات حرکتی مرکز روتور قابل دستیابی بوده و با بکارگیری این نگاشت تشخیص نوع حرکت سیستم به سادگی میسر خواهد بود. با عبور صفحه عرضی از میان مسیر نوسانات مرکز روتور و یافتن تعداد محل‌های تلاقی متنوع سیکل‌های پی در پی با صفحه مذکور به سهولت می‌توان نوع حرکت نوسانی را تشخیص داد. مشاهده بخش (ه) از شکل‌ها 4 و 5 بخوبی نمایشگر اختلاف میان تصویر نگاشت پوانکاره برای نوسانات مورد بررسی می‌باشد. شکل 4-ه نشان می‌دهد که در صورت پریودیکی بودن نوسانات و حرکت مرکز روتور روی یک حلقه بسته، تنها یک نقطه تلاقی معین روی صفحه قابل مشاهده است در صورتیکه مطابق شکل 5-ه با افزایش میزان پریلود تعداد محل‌های برخورد به دو نقطه متمایز افزایش یافته‌است.

بر اساس شکل‌های 4 و 5 می‌توان بیان نمود که برای سیستم دینامیکی شامل روتور صلب و یاتاقان ژورنال آئرودینامیکی غیرمدور دو لب در غیاب اثرات نابالانسی محور با افزایش میزان پریلود، دامنه پایداری دینامیکی سیستم تقلیل خواهد یافت. طبق بررسی انجام گرفته حرکات دینامکی یاتاقان بصورت بازگشت به شرایط تعادل استاتیکی به ازای $\delta \geq$ 52/0، بروز حرکات نوسانی با یک دوره تناوب معین برای ۶۰۸/۰ $\ll \delta <$ 52/0، نوسانات $2T$ پریودیک با دو دوره تناوب معین برای مقادیر برای622/0 $\ll \delta <$ 608/0 و در نهایت برخورد مابین روتور و پوسته یاتاقان به ازای مقادیر بزرگتر پریلود قابل مشاهده خواهد بود. بررسی کلی تغییرات رفتاری روتور بدون نابالانسی در ازای تغییر میزان غیرمدوری یاتاقان در دیاگرام انشعابی شکل 6 آمده‌است.

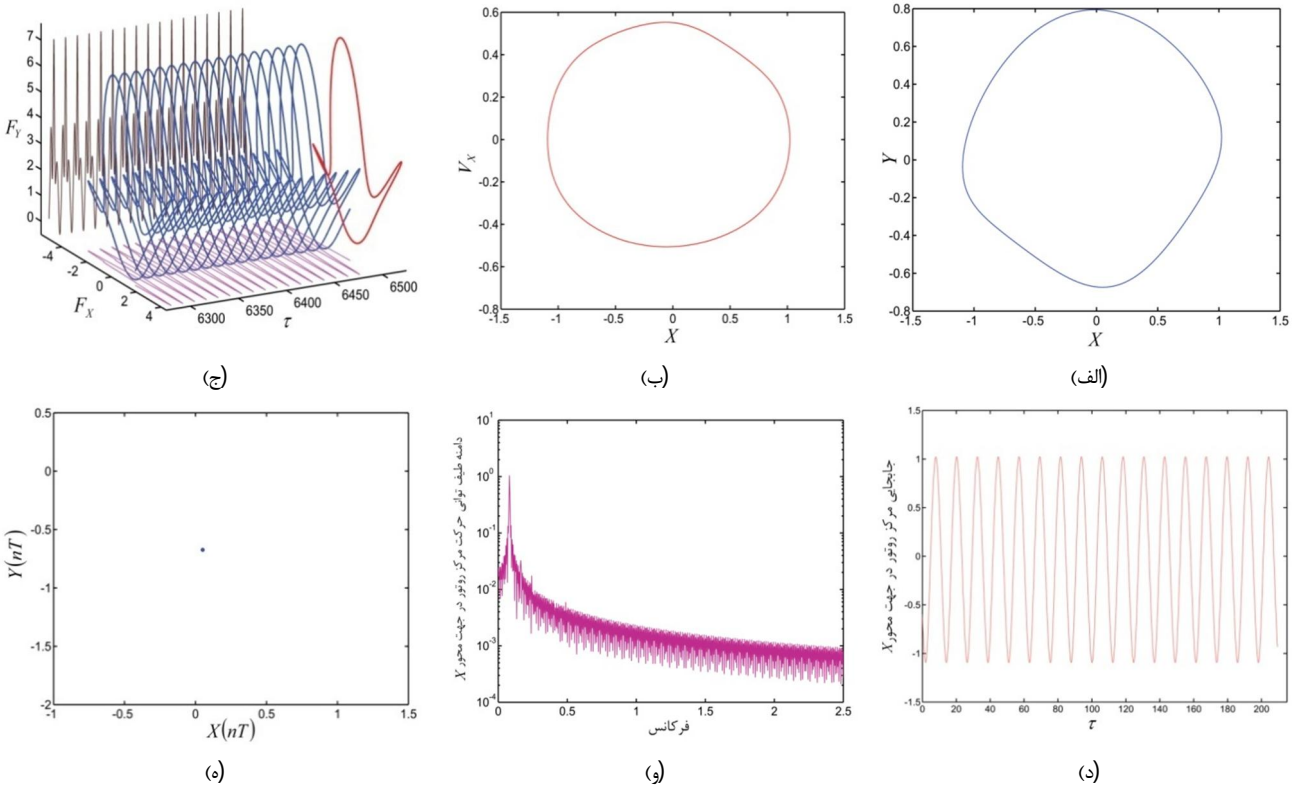
دیاگرام دوشاخه‌گی ابزار دیگری جهت تعیین چگونگی پاسخ دینامیکی سیستم به اغتشاشات ورودی در ازای تغییرات پارامتر دلخواهی از سیستم دینامیکی می‌باشد. شکل‌های 6- الف و 6-ب به ترتیب نحوه تغییرات مولفه X و Y نقاط مشاهده شده روی نگاشت پوانکاره به ازای مقادیر مختلف پریلود را نشان می‌دهند. شکل 6 به طور کامل نحوه تغییر وضعیت نوسانات سیستم از حالت بازگشت به شرایط تعادل استاتیکی تا برخورد را نمایش می‌دهد. نتایج شکل 6 موید بروز رفتارهای پریودیک و $2T$ پریودیک برای حرکت دینامیکی روتور فاقد نابالانسی جرمی قبل از برخورد می‌باشند. با توجه به نامطلوب بودن پدیده برخورد در حوزه عملکرد دینامیکی یاتاقان‌ها، همواره سعی بر آنست تا با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی یاتاقان و ویژگی‌های سیال روانکار از بروز چنین پدیده‌ای جلوگیری شود. لذا در بررسی حاضر نقطه برخورد روتور و یاتاقان به عنوان نقطه پایانی تحلیل در نظر گرفته شده و حرکات بعدی روتور پس از برخورد با لحاظ تئوری‌های ضربه و سایش که می‌تواند با پدیده آشوب و اغتشاشات نامناسب توأم باشد، ارزیابی نگردیده‌است.

4-2- بررسی رفتار دینامیکی غیرخطی یاتاقان گازی در مقادیر مختلف پریلود با لحاظ اثرات نابالانسی جرمی روتور $(\bar{\rho}=0.001)$

در ادامه به منظور بررسی اثرات نابالانسی جرمی روتور بر رفتار دینامیکی غیرخطی یاتاقان ژورنال غیرمدور دولب آئرودینامیکی، رفتار سیستم به ازای مقادیر مختلف پریلود ارائه گردیده‌است.

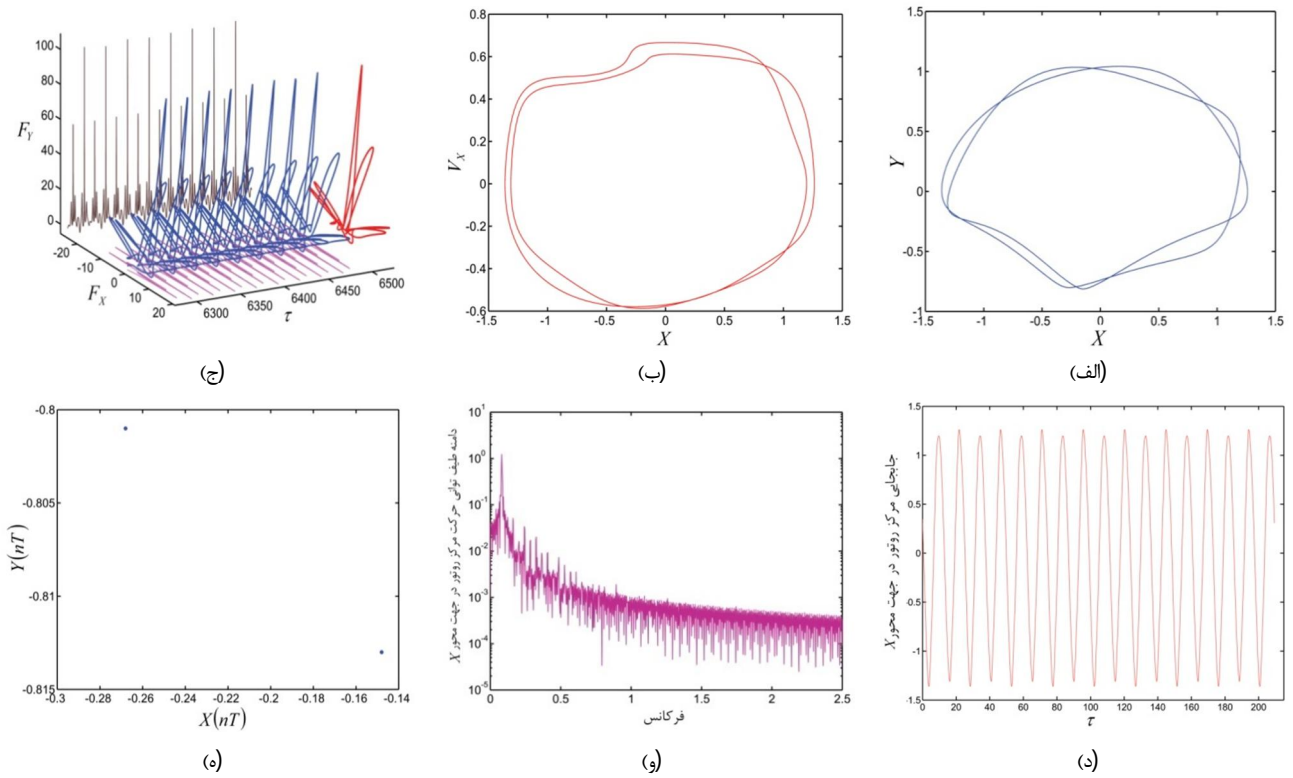
مطابق شکل 7 رفتار دینامیکی مرکز روتور برای مقادیر پایین پریلود و یا به عبارت دیگر هنگامی که یاتاقان بیشترین میزان غیرمدوری را به خود

حالت (1): $\bar{\rho}=0$ و $\delta=0.55$



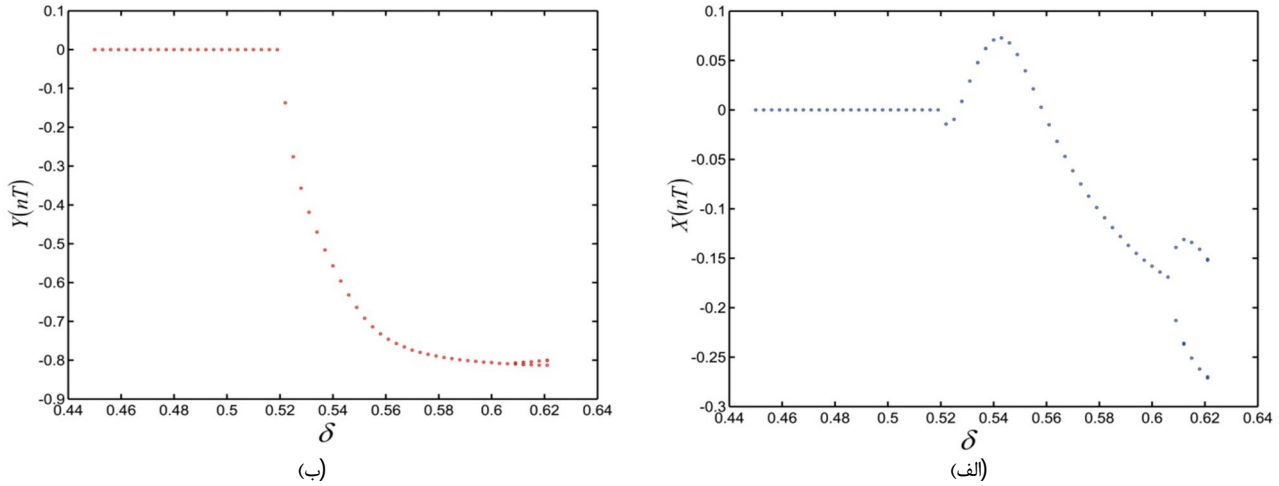
شکل 4 (الف) مسیر حرکت مرکز روتور (ب) تصویر فاز مرکز روتور (ج) مولفه‌های نیروی دینامیکی (د) سری زمانی حرکت روتور (و) طیف توانی جابجایی روتور (ه) نگاشت پوانکاره

حالت (2): $\bar{\rho}=0$ و $\delta=0.62$



شکل 5 (الف) مسیر حرکت مرکز روتور (ب) تصویر فاز مرکز روتور (ج) مولفه‌های نیروی دینامیکی (د) سری زمانی حرکت روتور (و) طیف توانی جابجایی روتور (ه) نگاشت پوانکاره

دیاگرام دوشاخه‌گی، یاتاقان دولب، $\lambda = 1.5$ ، $\bar{\rho} = 0.0$



شکل 6 (الف) تأثیر پریلود بر جابجایی دینامیکی مرکز روتور در امتداد محور X **(ب)** تأثیر پریلود بر جابجایی دینامیکی مرکز روتور در امتداد محور Y

گرفته‌است (شکل 7-الف و ب) به صورت پریودیک خواهد بود. لذا مطابق توضیحات پیشین نیروهای اغتشاشی دینامیکی نیز به عنوان عوامل تولید کننده حرکت، پریودیک بوده (شکل 7-ج) و مقادیر کوچکی خواهند داشت. همچنین دامنه نوسانات مولفه‌های حرکت دینامیکی با گذشت زمان ثابت بوده (شکل 7-د) و تنها یک قله در نمودار فرکانس (شکل 7- و) و یک نقطه تقاطع در تصویر نگاشت پوانکاره (شکل 7-ه) قابل رؤیت خواهند بود. نتایج شکل 12 نیز موید آنست که رفتار نوسانی پریودیکی مرکز روتور به ازای $\delta \geq 52/0$ قابل رویت خواهد بود. به ازایδ=0/52 مطابق شکل 8 رفتار از حالت پریودیک به پریودیک با نوسانی‌های بسیار نزدیک به یکدیگر مبدل خواهد شد. همانگونه که قسمت‌های مختلف شکل 8 و بویژه نگاشت پوانکاره (شکل 8-ه) نمایش می‌دهند، حرکت $2T$ پریودیک ایجاد شده دوره تناوب‌های بسیار نزدیک به یکدیگر دارد. برای مقادیر بزرگتر پریلود و قبل از برخورد روتور و پوسته یاتاقان همانگونه که در شکل‌های 10،۹ و 11 مشاهده می‌شود حرکت دینامیکی مرکز روتور به یک حرکت شبه نوسانی مبدل خواهد شد به این معنا که پریود نوسانات پی در پی مرکز روتور با هم اختلاف داشته لیکن نگاشت پوانکاره نوسانات تمامی آن‌ها مطابق بخش (ه) شکل‌های 10،۹و 11 تشکیل یک حلقه بسته خواهد داد. نتایج گویای این مطلب می‌باشند که با بررسی گام‌های بعدی حرکت دینامیکی روتور و رسم دیاگرام پوانکاره نقاط جدید نیز بر روی حلقه‌های قابل مشاهده قرار خواهند گرفت. از این رو می‌توان گفت برای یاتاقان ژورنال گازی غیرمدور دو لب به همراه اثرات نابالانسی جرمی روتور و با فرض شرایط جدول (1) برای مقادیر پریلود $52/0 < \delta \ll 608/0$ رفتار شبه نوسانی توسط روتور قابل مشاهده خواهد بود. بازه‌های حرکتی تشریح شده فوق بطور کامل در دیاگرام دوشاخه‌گی شکل 12 قابل مشاهده می‌باشند.

مقایسه بخش (ج) شکل‌های 9، 10 و 11 رشد نیروهای دینامیکی اغتشاشی را به ازای افزایش میزان پریلود و به عبارت دیگر کاهش میزان غیرمدوری یاتاقان و نزدیک شدن به حالت مدور را نشان می‌دهند. همچنین اثر منفی افزایش پریلود بر عملکرد دینامیکی غیرخطی یاتاقان گازی با مقایسه نمودارهای طیف توانی نشان داده شده در قسمت (و) شکل‌های 9، 10 و 11 و افزایش پی در پی تعداد فرکانس‌های تشدید کننده دامنه اغتشاشات سیستم قابل رویت می‌باشد.

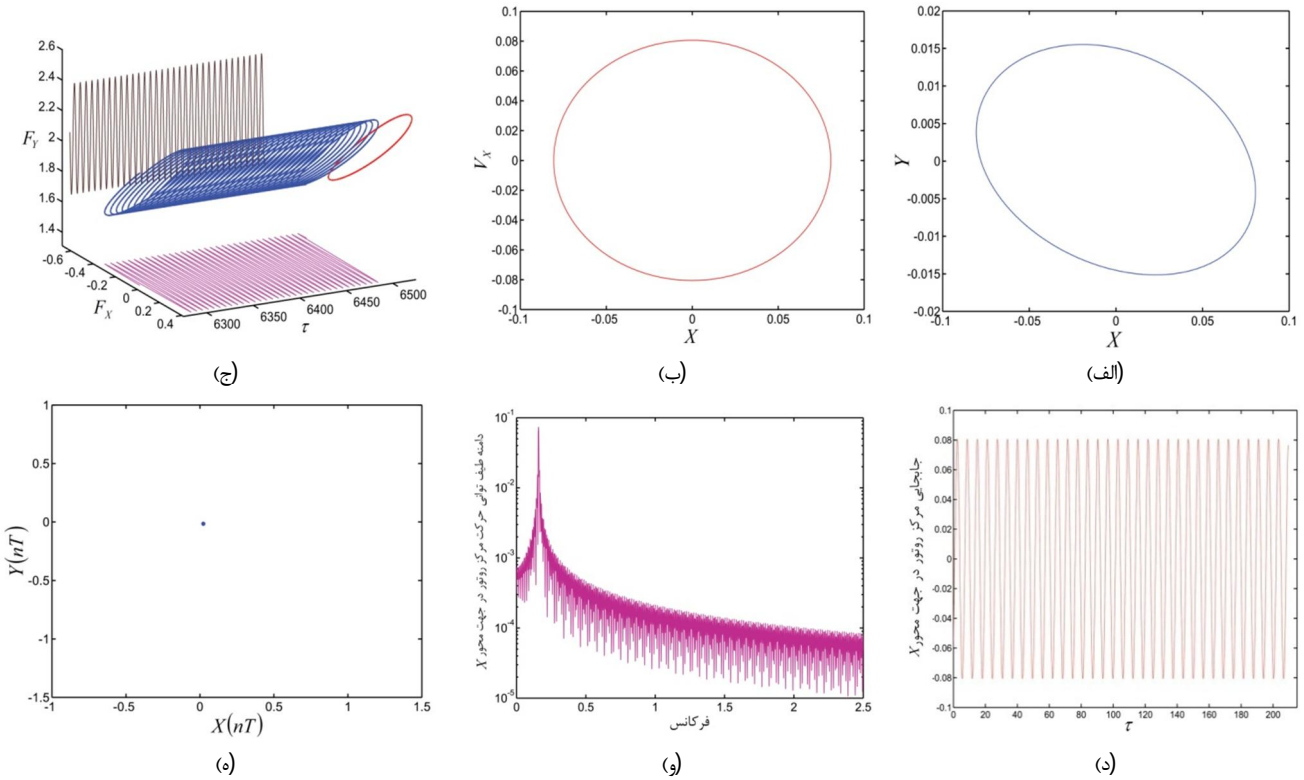
از آنجا که هدف از تحلیل ارائه شده شناسایی اثر پریلود و نابالانسی جرمی روتور بر رفتار دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال گازی می‌باشد، با توجه به نتایج حاصل می‌توان بیان نمود که افزایش میزان پریلود به عبارت دیگر کاهش میزان غیرمدوری یاتاقان و همچنین افزایش میزان نابالانسی جرمی روتور امکان بروز رفتارهای نامطلوب را تشدید خواهند نمود.

با توجه به بررسی‌های فوق می‌توان بیان نمود که با افزایش میزان غیرمدوری یاتاقان از طریق بکارگیری یاتاقان‌های با مقادیر پریلود پایین‌تر و یا جایگزینی یاتاقان‌های غیرمدور به جای انواع مدور مشابه، امکان بهبود عملکرد دینامیکی سیستم‌های شامل روتور و یاتاقان گازی وجود خواهد داشت. همچنین با مقایسه نتایج شکل‌های 6 و 12پایداری دینامیکی سیستم شامل محور بدون نابالانسی جرمی در قیاس با روتور نامیزان در مقادیر مختلف پیش بار بوضوح قابل رویت است. در سیستم‌های بدون اثرات نامیزانی جرمی روتور، حرکات پریودیک و KT پریودیک و در سیستم‌های شامل روتور نابالانس رفتارهای پریودیک، KT پریودیک و شبه نوسانی پیش از رسیدن به زمان برخورد مابین روتور و پوسته یاتاقان مطابق نتایج ارائه شده در بررسی حاضر قابل رویت هستند.

5- نتیجه‌گیری

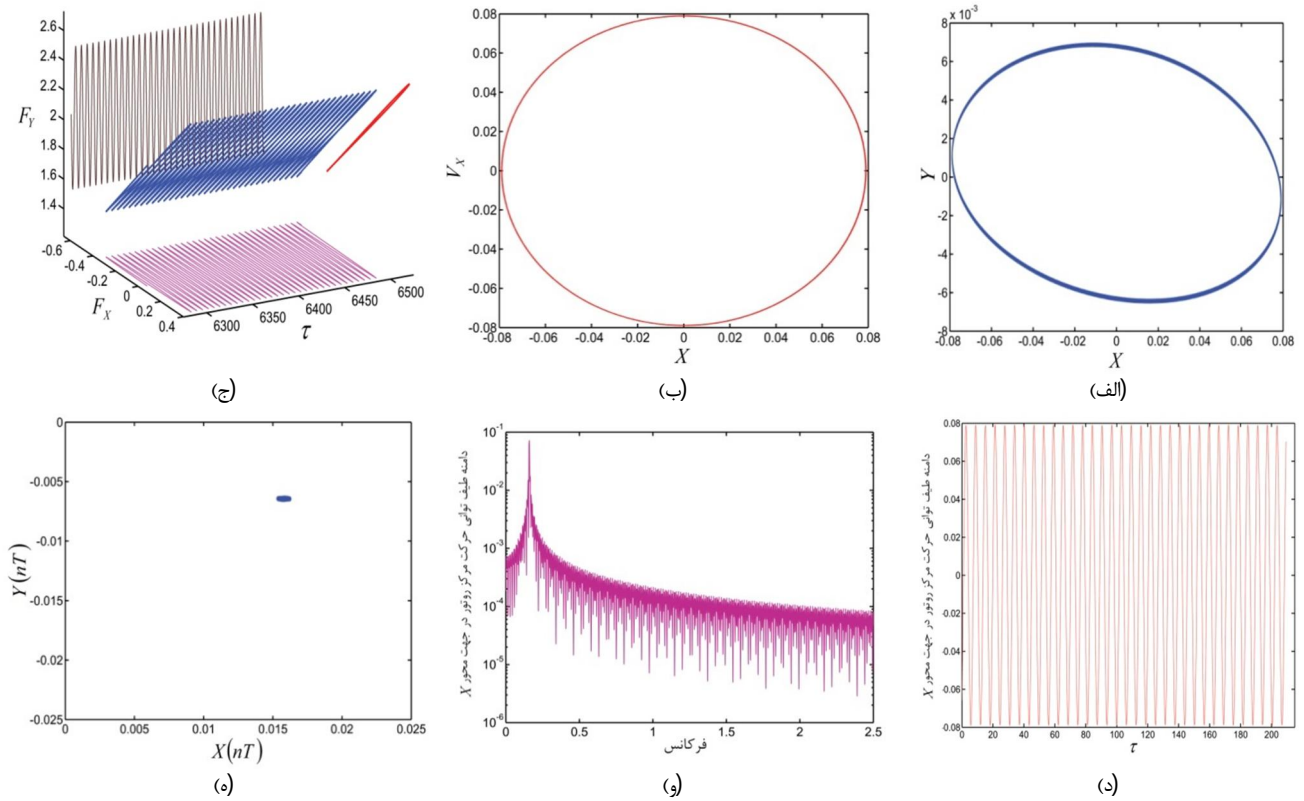
در پژوهش حاضر اثرات پیش بار بر رفتار دینامیکی غیرخطی روتور صلب دوار درون یاتاقان ژورنال آئرودینامیکی غیرمدور دولب مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. با توجه به غیرخطی بودن نیروهای ناشی از تغییر حالت توزیع فشار درون فیلم روانکار و تابعیت زمانی معادلات حرکت روتور درون یاتاقان همزمان از روش حل عددی اجزاء محدود و روش رانگ-کوتا برای تحلیل شرایط کارکرد دینامیکی سیستم استفاده شده‌است. نمودارهای جابجایی دینامیکی و سرعت مرکز محور در کنار نمودارهای نیرویی، تغییرات زمانی، طیف توانی، نگاشت پوانکاره و نمودار دوشاخه‌گی جهت بیان بهتر ویژگی‌های دینامیکی سیستم بکارگرفته شده‌اند. با توجه به بررسی‌های انجام گرفته موارد ذیل قابل استنباط می‌باشند:

حالت (1): $\bar{\rho} = 0.001$ و $\delta = 0.50$



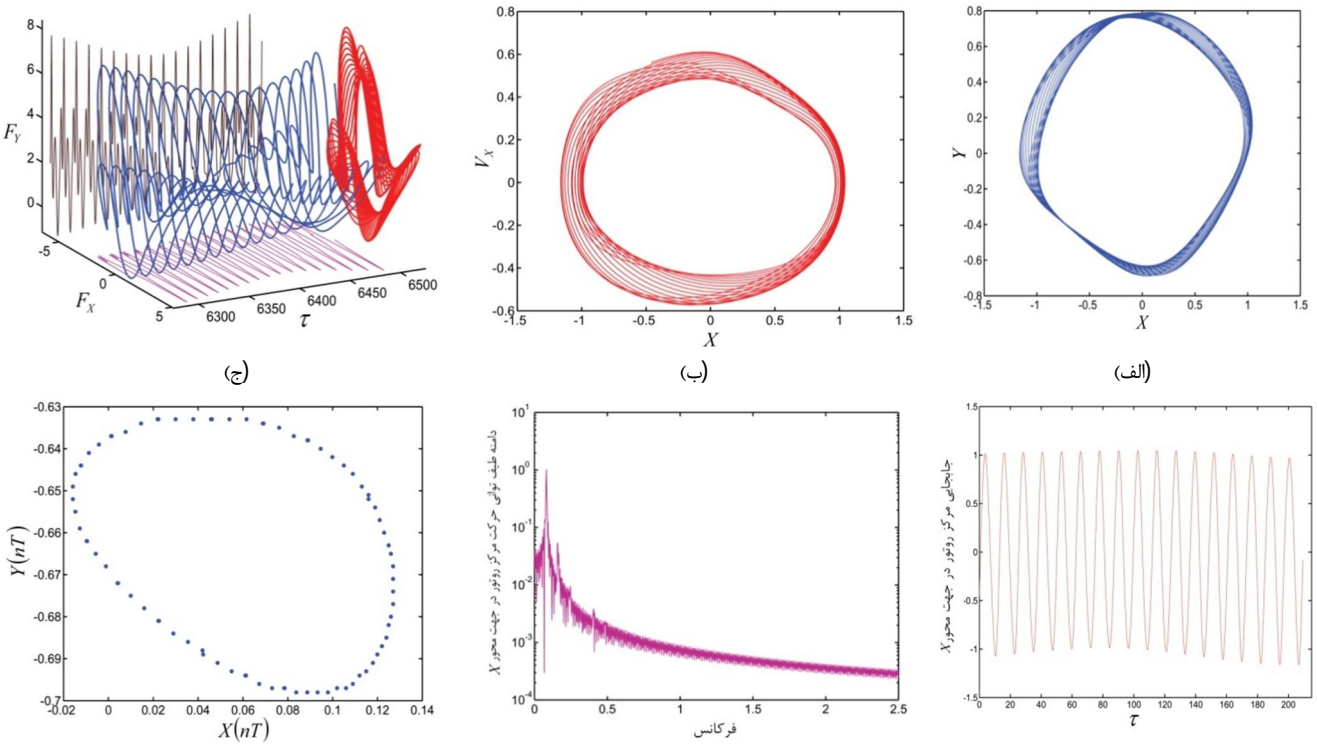
شکل 7 (الف) مسیر حرکت مرکز روتور (ب) تصویر فاز مرکز روتور (ج) مولفه‌های نیروی دینامیکی (د) سری زمانی حرکت روتور (و) طیف توانی جابجایی روتور (ه) نگاشت پوانکاره

حالت (2): $\bar{\rho} = 0.001$ و $\delta = 0.52$



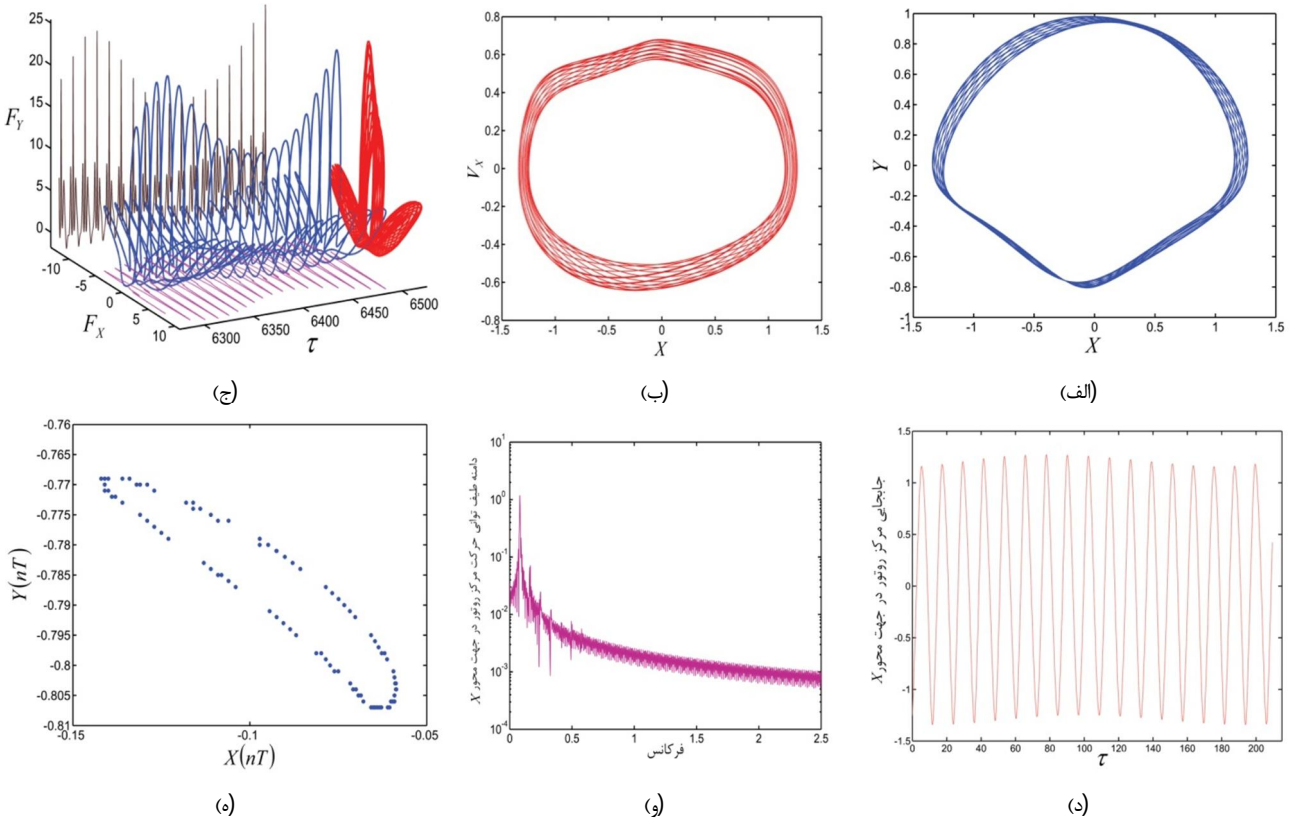
شکل 8 (الف) مسیر حرکت مرکز روتور (ب) تصویر فاز مرکز روتور (ج) مولفه‌های نیروی دینامیکی (د) سری زمانی حرکت روتور (و) طیف توانی جابجایی روتور (ه) نگاشت پوانکاره

حالت (3): $\bar{\rho} = 0.001$ و $\delta = 0.55$



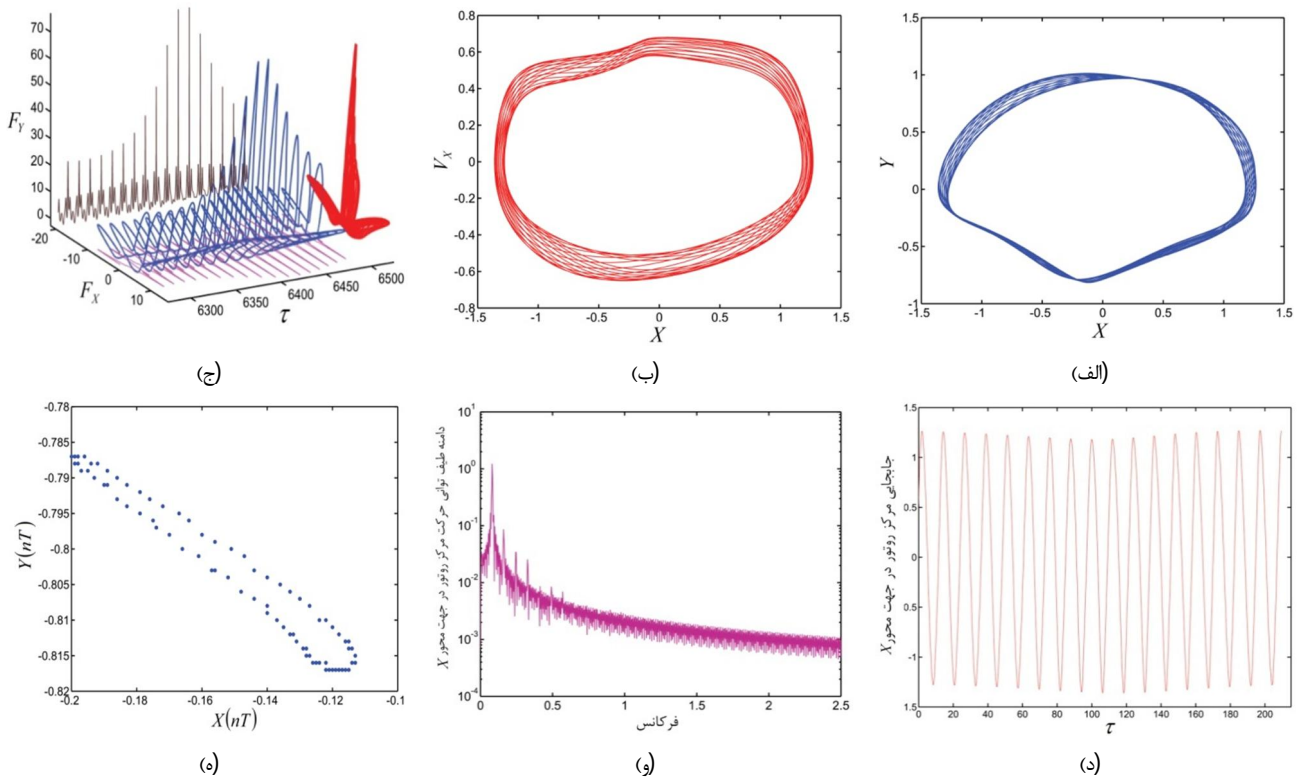
شکل 9 (الف) مسیر حرکت مرکز روتور (ب) تصویر فاز مرکز روتور (ج) مولفه‌های نیروی دینامیکی (د) سری زمانی حرکت روتور (و) طیف توانی جابجایی روتور (ه) نگاشت پوانکاره

حالت (4): $\bar{\rho} = 0.001$ و $\delta = 0.58$



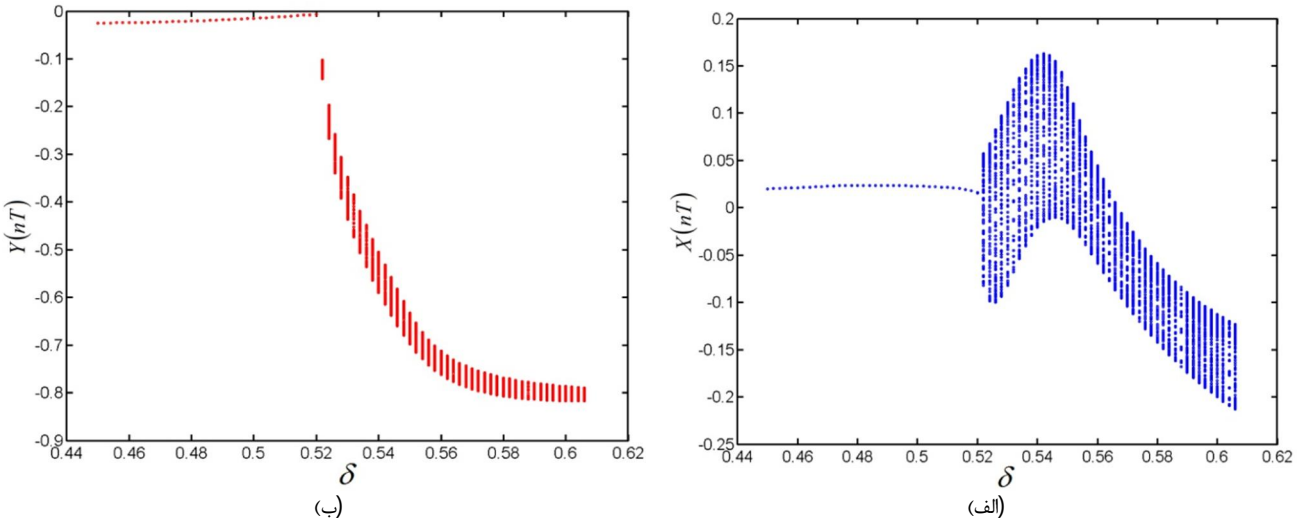
شکل 10 (الف) مسیر حرکت مرکز روتور (ب) تصویر فاز مرکز روتور (ج) مولفه‌های نیروی دینامیکی (د) سری زمانی حرکت روتور (و) طیف توانی جابجایی روتور (ه) نگاشت پوانکاره

حالت (5): $\bar{\rho} = 0.001$ و $\delta = 0.60$



شکل 11 (الف) مسیر حرکت مرکز روتور (ب) تصویر فاز مرکز روتور (ج) مولفه‌های نیروی دینامیکی (د) سری زمانی حرکت روتور (و) طیف توانی جابجایی روتور (ه) نگاشت پوانکاره

دیاگرام دوشاخه‌گی، یاتاقان دولب، $\lambda = 1.5$، $\bar{\rho} = 0.001$



شکل 12 (الف) تأثیر پریلود بر جابجایی دینامیکی مرکز روتور در امتداد محور X **(ب)** تأثیر پریلود بر جابجایی دینامیکی مرکز روتور در امتداد محور Y

1) در مقادیر مختلف پیش بار برای یاتاقان‌های گازی دو لب با فرض حالت بازگشت به وضعیت تعادل استاتیکی به عنوان نقطه مبنا، رفتارهای دینامیکی پریودیک، KT پریودیک، شبه نوسانی و حرکات اغتشاشی تشدید شونده منجر به برخورد سطوح روتور و پوسته دیده می‌شوند.

2) افزایش میزان پریلود در یاتاقان‌های ژورنال غیرمدور به ناپایدارتر شدن شرایط عملکرد دینامیکی سیستم منجر خواهد شد.

افزایش میزان خروج از مرکزیت جرمی روتور سبب کاهش دامنه پایداری حرکات دینامیکی سیستم و افزایش احتمال برخورد سطوح محور و یاتاقان خواهد شد.

موارد اشاره شده فوق نقش بسیار مهمی در وضعیت نهایی عملکرد دینامیکی یاتاقان‌های ژورنال گازی غیرمدور خواهد داشت. لذا با انتخاب صحیح نوع یاتاقان و پارامترهای طراحی آن، امکان کنترل رفتار دینامیکی سیستم در شرایط کارکرد و پیشگیری از قرارگرفتن یاتاقان در وضعیت‌های ناپایدار منجر به برخورد یاتاقان و روتور و بروز پدیده نامطلوب سایش به سهولت امکان‌پذیر خواهد بود.

6- مراجع

[1] V. Castelli, H.G. Elrod, Solution of the stability problem for 360 degree self-acting, gas-lubricated bearing, *ASME J. Basic Engineering,* Vol. 87, pp. 199-212, 1961.

[2] A.G. Holmes, C.M. Ettles, I.W. Mayes, A-periodic behavior of a rigid shaft in short journal bearings, *Int. Journal of Numerical Method in Engineering,* Vol. 12, pp. 695-702, 1978.

[3] M. Chandra, M. Malik, R. Sinhasan, Comparative study of four gas-lubricated noncircular journal bearing configuration, *Tribology Int*., Vol. 16, pp. 103-108, 1983.

[4] C.C. Wang, M.J. Jang, C.K. Chen, Nonlinear dynamic analysis of a flexible rotor supported by self acting gas journal bearing, *Proceedings of the Inst. of Mech. Eng*., Vol. 12, pp. 1527-538, 2004.

[5] J.S. Wang, C.C. Wang, Nonlinear dynamic and bifurcation analysis of short aerodynamic journal bearings, *Tribology Int*., Vol. 38, pp. 740-748, 2005.

[6] C.C. Wang, H.T. Yau, M.J. Jang, Y.L. Yeh, Theoretical analysis of the non-linear behavior of a flexible rotor supported by herringbone grooved gas journal bearings, *Tribology Int.,* Vol. 40, pp. 533-541, 2007.

[7] A.D. Rahmatabadi, R. Rashidi, Effect of mount angle on static and dynamic characteristics of gas lubricated, noncircular journal bearings, *Iranian Journal of Science & Technology,* Transaction B, Engineering, Vol. 37, pp. 27-37, 2006.

[8] A.D. Rahmatabadi, R. Rashidi, Investigation of preload effects on noncircular gas bearing systems performance, *JAST,* Vol. 4, pp. 33-38, 2007.

[9] W. Wang, Y. Lu, Z. Cao, Y. Zhang, L. Feng, L. Yu, Nonlinear behaviors and bifurcation of flexible rotor system with axial-grooved self-acting gas bearing support, *Advanced Science Letters,* Vol. 4, pp. 1796-1802, 2011.

[10] C. Wang, Bifurcation and nonlinear dynamic analysis of united gas-lubricated bearing system, *Advanced Technologies in Computer, Consumer and Control,* Vol. 64 (5), pp. 729–738, 2012.

[11] R. Rashidi Meybodi , A. Karami Mohammadi, F. Bakhtiari-Nejad, Numerical analysis of a rigid rotor supported by aerodynamic four-lobe journal bearing system with mass unbalance, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,* Vol. 17 (1), pp. 454–471, 2012.

[12] Y. Zhang, D. Hei, Y. Lü, Q. Wang, N. Müller, Bifurcation and chaos analysis of nonlinear rotor system with axial-grooved gas-lubricated journal bearing support, *Chinese Journal of Mechanical Engineering,* Vol. 27, pp 358-368, 2014.