

بررسی تاثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد یاتاقان گازی غیر مدور دو لب با روش

شبکه‌های عصبی مصنوعی

محمد رضا دهقانی زاده بغدادآبادی
کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه یزد

اصغر دشتی رحمت آبادی
استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد

سید محمد تقی المدرسی
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

چکیده

شبکه‌های عصبی مصنوعی سیستم‌های پردازش اطلاعات می‌باشند که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان برای مدل‌سازی فرآیندهای مختلف و همچنین در حل مسائل گوناگون در حوزه‌های خطی و غیر خطی قرار گرفته‌اند. در مقاله حاضر از روش شبکه‌های عصبی جهت بررسی عملکرد یاتاقان گازی غیر مدور دو لب^۱ موارد کاربرد فراوانی در صنعت دارد، استفاده شده است. در این راستا مولفه‌های عملکرد استاتیکی و دینامیکی این نوع یاتاقان‌ها از قبیل مقدار زاویه مشخصه، ظرفیت تحمل بار، اتلاف انرژی و میزان پایداری تحت تاثیر پارامترهای عدد تراکم پذیری (عدد یاتاقان)، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج به دست آمده در این مقاله با محدود نتایج گزارش شده در کارهای قبلی که از روش اجزا محدود بدست آمده‌اند، مطابقت نزدیکی داشته و در عین حال زمان کم محاسبات و سادگی روش حل نیز قابل ملاحظه می‌باشد. از بررسی نتایج حاصله مشاهده می‌شود که چرخش یاتاقان غیر مدور دو لب در اعداد تراکم پذیری مختلف، مرز پایداری سیستم را افزایش می‌دهد و اثر آن در اعداد تراکم پذیری بالا محسوس تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: یاتاقان گازی غیر مدور، دو لب، شبکه‌های عصبی مصنوعی

Investigation of The Effects of Design Parameters on The Performance of Gas Lubricated Two Lobe Journal Bearings Using Artificial Neural Networks

M.R. Dehghanizade M.Sc, Department of Mechanical Engineering, Yazd University
A. Dashti Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Yazd University
S.M. Almodarresi Assistant Professor, Department of Elc. Engineering, Yazd University

ABSTRACT

Artificial Neural Networks (ANNs) are information processing systems which in recent years have attracted the attention of many researchers for modeling of the systems and also finding solution for linear and nonlinear problems in various fields. In the present work, using ANNs method, the performance of two lobe gas lubricated noncircular journal bearing are investigated. For this purpose, the effect of compressibility number (bearing number), mount and tilt angles on the static and dynamic performance characteristics of these bearings, such as attitude angle, load carrying capacity, power loss and stability margins, are studied. The present results of ANNs method compared with earlier reported results obtained by finite element method (FEM), are in good match. It is while the ANNs method is simple and consumes not much computer time. The results also show that tilling of the two lobe bearings can improve the stability margins and this effect is more at higher compressibility numbers.

Key Words: Noncircular Gas Bearing, Two Lobe, Artificial Neural Networks

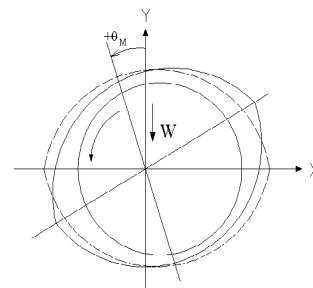
¹ -Lobe

۱- مقدمه

یاتاقان‌های با روانکار گازی طی سال‌های اخیر، به صورت تئوری و عملی مورد توجه بسیاری از محققان شاخه علم تریبولوژی قرار گرفته‌اند. یاتاقان‌های گازی هم اکنون در توربو ماشین‌های سریع، ابزار ناوبری و هوایی، ماشین‌های ابزار با دور بالا، صنایع غذایی و داروسازی، قطعات کامپیوترهای دیجیتال و غیره به کار گرفته می‌شوند. دلیل به کارگیری یاتاقان‌های گازی در موارد مذکور را می‌توان در پایداری روانکار در بازه وسیعی از تغییرات دما، فراوانی روانکار نظیر هوا، آلوده نکردن محیط، سازگاری در شرایط کارکرد با دور بالا و کاهش اتلاف انرژی در اثر نیروی اصطکاک دانست [۱].

از طرفی پایداری دینامیکی ضعیف و ظرفیت تحمل بار پایین، دو مشخصه‌ای می‌باشند که کارایی این نوع یاتاقان‌ها را در عمل تحت تأثیر قرار می‌دهند و بررسی عملکرد آن‌ها به این لحاظ نسبت به یاتاقان‌های روغنی اهمیت بیشتری می‌یابد. لذا بررسی عوامل تأثیر گذار بر عملکرد یاتاقان‌های گازی بویژه نوع غیر مدور دو لب جهت استفاده بهینه از آن‌ها و جلوگیری از هرگونه صدمه احتمالی ضروری به نظر می‌رسد. بررسی‌های انجام شده در این زمینه، نشان‌دهنده آن است که پارامترهای هندسی یاتاقان‌های غیر مدور از قبیل تعداد لب، زاویه نصب و زاویه انحراف می‌توانند بر عملکرد این نوع از یاتاقان‌ها تأثیرگذار باشند.

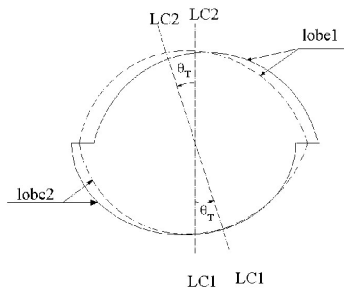
شکل ۱ چرخش یک یاتاقان گازی غیر مدور دو لب را نسبت به حالت بدون چرخش با زاویه‌ای که آن را زاویه نصب $[\theta_M +]$ می‌نامند، نشان می‌دهد.



بدون چرخش یاتاقان --- چرخش یاتاقان —

شکل ۱- نمایش یک یاتاقان غیر مدور دو لب در حالت تقارن و چرخش

این زاویه نسبت به راستای بار اعمالی روی محور سنجیده می‌شود. مقدار مثبت زاویه نصب، گویای هم جهت بودن چرخش یاتاقان با چرخش محور می‌باشد و مقدار منفی آن، به معنی خلاف جهت بودن چرخش محور با چرخش یاتاقان است. همچنین طبق شکل ۲ زاویه انحراف $[\theta_T +]$ برای یک یاتاقان غیر مدور دو لب، زاویه‌ای است که خط المکزین محور و هر لب در حالت انحراف نسبت به وضعیت یاتاقان در حالت تقارن، تشکیل می‌دهد.



حالت تقارن --- انحراف از حالت تقارن — LC : خط المکزین محور و لب

شکل ۲- نمایش یک یاتاقان غیر مدور دو لب در حالت تقارن و انحراف یافته

در طول چند دهه گذشته تحقیقات نسبتاً زیادی بر روی یاتاقان‌های گازی انجام گرفته است. اولین بار در سال ۱۸۹۷ کینگس بری [۲]، در مطالعات عملی خود از هوا به عنوان روانکار استفاده کرد و این نقطه شروعی برای استفاده از یاتاقان‌های گازی بود. سپس در سال ۱۹۱۹ هاریسون [۳] یاتاقان‌های طویل گازی را مورد بررسی قرار داد. وی فرض کرد متوسط ضخامت فیلم سیال در فضای لقی شعاعی محور یکسان باشد. تحقیقات اولیه بر روی یاتاقان‌های هیدرودینامیکی غیرمدور گازی توسط پینکوس [۴] انجام شد. چاندرا و همکارانش به محاسبه ضرایب دینامیکی یاتاقان‌های هیدرودینامیکی مدور با روش اجزا محدود پرداخته و پایداری یاتاقان‌های هیدرودینامیکی غیرمدور را نیز با تجزیه و تحلیل سیستم به روش خطی و حل معادلات به روش اجزا محدود، مورد مطالعه قرار دادند [۵ و ۶].

$$h_{ok} = \frac{1}{\delta} - (X_{jo})\cos\theta - (Y_{jo})\sin\theta + \left(\frac{1}{\delta} - 1\right)\cos(\theta - \theta_o^k) \quad (2)$$

در این روابط، ضخامت فیلم سیال در حالت پایدار می-باشد. (X_{jo}, Y_{jo}) و (X_j, Y_j) به ترتیب مختصات مرکز محور در حالت پایدار و دینامیکی می-باشند. δ پیش‌بار سیستم به معنی نسبت کوچک‌ترین فضای لقی یاتاقان به فضای لقی آن، موقعی که محور و یاتاقان هم مرکز باشند، تعریف می-شود. همچنین θ_o^k زاویه‌ای است که خط مرکزی محور و لب k ام با جهت مثبت محور X می-سازد. معادله فشار حاکم در میدان جریان هم دما برای هر یک از لب‌های یاتاقان به صورت زیر بیان می-شود [۱۲]:

$$\frac{\partial}{\partial\theta} \left\{ h^3 (P+1) \frac{\partial P}{\partial\theta} \right\} + \frac{\partial}{\partial\zeta} \left\{ h^3 (P+1) \frac{\partial P}{\partial\zeta} \right\} = \Lambda \left[U \frac{\partial}{\partial\theta} + 2 \frac{\partial}{\partial t} \right] \{ (P+1)h \} \quad (3)$$

این معادله در جهت θ و همچنین در راستای محور مختصاتی که در طول یاتاقان (ζ) منظور گشته، نوشته شده است. P, U, t به ترتیب اشاره به متغیر فشار، سرعت و زمان دارند. Λ عدد بدون بعدی است که آن را عدد تراکم پذیری یا عدد یاتاقان می‌نامند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Lambda = \frac{6\mu\omega R^2}{P_a C_m} \quad (4)$$

که در آن، μ لزجت روانکار، ω سرعت زاویه‌ای محور، R شعاع محور، P_a فشار محیط، C_m کمترین مقدار فضای لقی بین یاتاقان و محور را موقعی که آنها هم مرکزند، می‌باشد.

شرایط مرزی حاکم بر مساله به صورت زیر است

$$p(\theta_1^k, \zeta, t) = p(\theta_2^k, \zeta, t) = p(\theta, \mp \lambda, t) = 0 \quad (5)$$

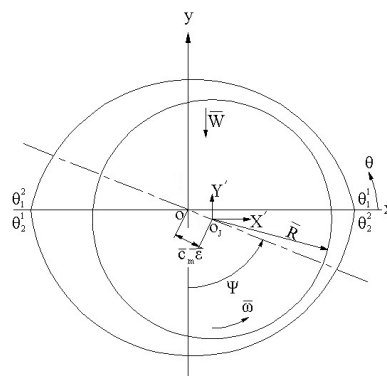
که در آن، θ_1^k و θ_2^k به ترتیب زوایای شروع و پایان هر یک از لب‌ها هستند و λ نسبت طول محور یاتاقان به قطر محور است که در کار حاضر برابر با یک منظور گردیده است. به منظور بیان حالت دینامیکی در میدان جریان، فرض می‌شود که حرکت چرخشی محور، تناوبی بوده و به صورت زیر بیان می‌شود

$$X' = \text{Re} \left(X' e^{jn} \right), Y' = \text{Re} \left(Y' e^{jn} \right) \quad (6)$$

با آشکار شدن ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های عصبی، در تحلیل مسائل پیچیده، کرکوب و الکامل [۷]، مدل توزیع فشار را روی یک یاتاقان چهارگوش گازی با دقت مطلوبی به دست آوردند. در سال ۲۰۰۵، یوان کنگ [۸]، با طراحی یک شبکه عصبی، سختی را در یک بلبرینگ محاسبه نمود. کاستجن و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۹، تشخیص خودکار عیوب موجود در سیستم یاتاقان‌های غلتشی یک ماشین صنعتی را با استفاده از روش شبکه‌های عصبی با ناظر مورد مطالعه قرار دادند. درحال حاضر نیز استفاده از روش شبکه‌های عصبی به عنوان یک روش مناسب و قدرتمند در تمام شاخه‌های مهندسی، به سرعت در حال گسترش می‌باشد [۱۰ و ۱۱].

۲- معادلات حاکم

برای تحلیل یاتاقان‌های غیر مدور، هر یک از لب‌های آن به صورت یک جزء مستقل در نظر گرفته شده و معادلات حاکم برای آن نوشته می‌شود. به منظور عمومیت دادن تحلیل برای کل هندسه یاتاقان غیر مدور، هندسه فیلم سیال نسبت به دستگاه مختصات عبوری از مرکز یاتاقان، مطابق شکل ۳، در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳- نمایش هندسی یک یاتاقان غیر مدور دو لب

ضخامت فیلم سیال در فضای لقی هر لب با قرارگیری محور در یک حالت چرخش گذرا به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲]:

$$h_k = \frac{1}{\delta} - (X_j)\cos\theta - (Y_j)\sin\theta + \left(\frac{1}{\delta} - 1\right)\cos(\theta - \theta_o^k) \quad (1)$$

در این رابطه، P'_z اشاره به P'_x و P'_y دارد به طوری که

$$P'_z = P_z + j\gamma P_x, z = x, y \quad (11)$$

و

$$f(\theta) = \begin{cases} \cos \theta & \text{for } P'_x \\ \sin \theta & \text{for } P'_y \end{cases} \quad (12)$$

می‌باشند. رابطه (۹)، رابطه غیرخطی است و به منظور دستیابی به متغیر فشار در حالت پایدار، روش نیوتن با به کارگیری تکنیک اجزا محدود [۱۴-۱۲] را می‌توان به کار گرفت. معادلات با روش گالرکین [۱۵] به شکل روابط در اجزا محدود تبدیل می‌شوند. با حل معادله (۹) میدان فشار در حالت پایدار به دست می‌آید و از این طریق می‌توان مشخصه‌های استاتیکی سیستم یاتاقان‌های گازی را محاسبه کرد. مشخصه‌های استاتیکی عبارتند از ظرفیت تحمل بار یاتاقان (W)، زاویه مشخصه سیستم (ψ) و افت انرژی (P_L).

مولفه‌های نیروی سیال روی محور با رابطه زیر بیان می‌شوند

$$\begin{bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^L \begin{bmatrix} F_{x0}^k \\ F_{y0}^k \end{bmatrix} = -\sum_{k=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k} P_{ok} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} d\theta d\zeta \quad (13)$$

همچنین، ظرفیت تحمل بار و زاویه مشخصه یاتاقان هم به

ترتیب صورت

$$W = (F_{x0}^2 + F_{y0}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

و

$$\psi = \arctan\left(\frac{X_{j0}}{Y_{j0}}\right) \quad (15)$$

و اتلاف انرژی حاصل از اثر نیروی برشی روانکار نیز با رابطه

$$P_L = \sum_{k=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k} \left(\frac{3h_{ok}}{\Lambda} \frac{\partial P_{ok}}{\partial \theta} + \frac{1}{h_{ok}} \right) d\theta d\zeta \quad (16)$$

برای یاتاقان‌های غیر مدور تعریف می‌شوند [۶]. در این روابط تعداد لب و O حالت پایدار سیستم را بیان می‌کند. در حالت

که در آن، X' و Y' مختصات اغتشاش محور است که از موقعیت پایدار آن اندازه گیری می‌شود. در این رابطه $|X'|$ و $|Y'|$ دامنه حرکت، $j = \sqrt{-1}$ و γ نسبت فرکانس چرخش محور به سرعت زاویه‌ای آن است. فرکانس چرخش، سرعت زاویه‌ای است که محور در اثر اغتشاش صورت گرفته شده حول محوری که دوران دارد، شروع به چرخش می‌کند.

فشار گاز به صورت مجموع فشار در حالت پایدار (P_o) و

حالت دینامیکی می‌باشد. بنابراین

$$P = P_o + P'_x X' + P'_y Y' \quad (7)$$

که در آن

$$P'_x = P_x + j\gamma P_x, P'_y = P_y + j\gamma P_y \quad (8)$$

مؤلفه‌های فشار دینامیکی مختلط هستند. همچنین P_x و P_y مؤلفه‌های فشار نسبت به جابجایی صورت گرفته شده و P_x و P_y مؤلفه‌های فشار نسبت به سرعت در راستای جابجایی می‌باشند. معادله فشار در حالت پایدار با جایگذاری رابطه (۷) در رابطه (۳) و قرار دادن $X' = Y' = 0$ در آن، به صورت زیر

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \theta} \right\} + \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \xi} \right\} = \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta} [(P_o + 1) h_o]$$

به دست می‌آید. معادلات برای P'_x و P'_y را می‌توان با مشتق گیری جزئی از معادله (۳) بر حسب x' و y' به دست آورد.

بنابراین

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P_{x'}}{\partial \theta} + h_o^3 \frac{\partial P_o}{\partial \theta} P_{x'} - \Lambda h_o P_{x'} \right\} +$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P_{x'}}{\partial \xi} + h_o^3 \frac{\partial P_o}{\partial \xi} P_{x'} \right\} - j2\gamma \Lambda h_o P_{x'} =$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ 3h_o^2 f(\theta) (P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \theta} - \Lambda (P_o + 1) f(\theta) \right\} +$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ 3h_o^2 f(\theta) (P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \xi} - \Lambda (P_o + 1) f(\theta) \right\} -$$

$$j2\gamma \Lambda (P_o + 1) f(\theta) \quad (10)$$

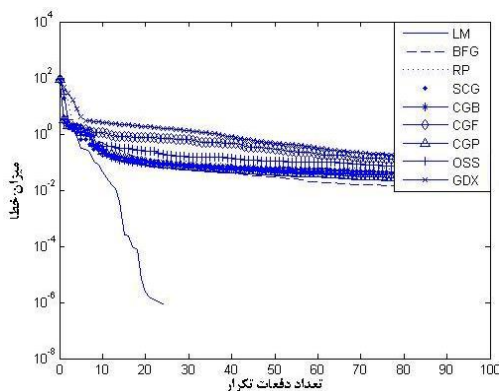
مثال، آموزش دیده و برای انجام وظیفه خاصی طراحی می-شوند [۱۷].

۳-۱- انتخاب نوع و تعداد لایه‌های شبکه

در این مقاله جهت آموزش و طراحی شبکه‌های مورد نظر برای پیش‌بینی و محاسبه پارامترهای هدف، از شبکه‌های عصبی مصنوعی MLP سه لایه استفاده گردیده است.

۳-۲- انتخاب الگوریتم آموزشی مناسب

برای طراحی شبکه بهینه، کارایی الگوریتم‌های آموزشی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای تشخیص تفاوت الگوریتم‌های مختلف به صورت شهودی، نمودار کارایی شبکه به ازای هر الگوریتم رسم می‌شود. با استفاده از برنامه نویسی در محیط نرم افزاری MATLAB، نمودار کارایی (میزان خطای شبکه بر حسب تعداد دفعات تکرار آموزش) بعد از آموزش با هر الگوریتم طبق شکل ۴ می‌باشد. به منظور مقایسه دقیق تر با استفاده از دستور state شرایط اولیه برای تمام الگوریتم ها یکسان در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- مقایسه کارایی شبکه برای الگوریتم‌های آموزشی مختلف

با توجه به شکل ۴، الگوریتم LM سریعترین روش حل می‌باشد و سرعت همگرایی بالاتر و میزان خطای کمتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد. بنابراین جهت آموزش شبکه، از این الگوریتم استفاده می‌گردد. برای طراحی شبکه بهینه، بایستی زمان اجرای برنامه و میانگین خطا نیز، مورد محاسبه قرار گیرد.

دینامیکی جهت تعیین مقدار مرز پایداری، با استفاده از معادله حرکت محور و با توجه به قانون دوم نیوتن، از روابط زیر استفاده می‌شوند [۱۶]:

$$M_c = \frac{(S_{xx}B_{yy} + S_{yy}B_{xx} - S_{xy}B_{yx} - S_{yx}B_{xy})}{(B_{xx} + B_{yy})r^2} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix}^T = \sum_{k=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} [\cos\theta \quad \sin\theta] d\theta d\zeta \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} \\ B_{yx} & B_{yy} \end{bmatrix}^T = \sum_{k=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} [\cos\theta \quad \sin\theta] d\theta d\zeta \quad (19)$$

$$M_j \gamma^2 = \frac{(S_{xx}B_{yy} + S_{yy}B_{xx} - S_{xy}B_{yx} - S_{yx}B_{xy})}{(B_{xx} + B_{yy})} \quad (20)$$

که در آن، S_{mn} و B_{mn} ($m, n=x, y$) به ترتیب ضرایب سختی و میرایی فیلم سیال بوده و γ نسبت فرکانس چرخشی در آستانه ناپایداری می‌باشد (معادلات (۲۰) - (۱۸)). همچنین کمیت جرم بحرانی سیستم را تعریف می‌کند که بر مبنای آن می‌توان میزان پایداری سیستم یاتاقان را بررسی نمود.

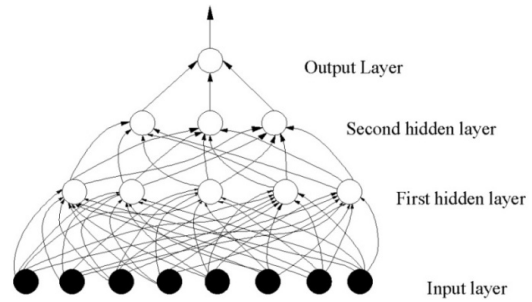
رابطه (۱۷) با فرض تقارن برای سیستم یاتاقان و محور و در نظر گرفتن نیمی از سیستم یاتاقان حاصل شده است و M_j به عنوان نصف جرم محور می‌باشد. برای $M_j < M_c$ سیستم یاتاقان پایدار است، در حالی که برای $M_j > M_c$ سیستم یاتاقان ناپایدار و آستانه ناپایداری سیستم را تعریف می‌نماید [۱۶]. بدیهی است که گرفتن نتایج از حل معادلات مذکور با استفاده از روش المان محدود بسیار پیچیده و وقت‌گیر و در بعضی موارد همراه با خطاهای غیر قابل اغماض می‌باشد.

۳- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، روشی برای پردازش اطلاعات می‌باشد که در طراحی آن از سیستم‌های عصبی زنده، مانند مغز، الگو برداری شده است. شبکه‌های عصبی مانند بشر، به وسیله

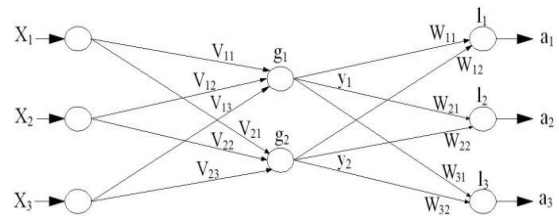
۳-۲-۱- الگوریتم آموزش LM

روش یادگیری LM را می توان برای هر شبکه چند لایه (شکل ۵) که از توابع محرک مشتق پذیر و روش آموزش با ناظر استفاده می کند، بکار برد.



شکل ۵- نمای شماتیکی از یک شبکه چند لایه پیشرونده

قبل از استفاده از این الگوریتم، ماتریس وزن های تمام لایه ها به صورت تصادفی و با مقادیر کوچک، مقداردهی می شود. سپس بردارهای ورودی به شبکه وارد و خروجی آن محاسبه می گردد. خروجی محاسبه شده با خروجی مطلوب، مقایسه و از مقدار خطای بدست آمده به عنوان معیاری جهت تنظیم وزن ها استفاده می شود [۱۷ و ۱۱]. براساس این الگوریتم، خطای محاسبه شده در هر لایه جهت تنظیم وزن های لایه مخفی قبل از آن مورد استفاده قرار می گیرد. این عملیات به طور متوالی تا تنظیم وزن های اولین لایه مخفی، ادامه پیدا می کند. فرآیند آموزش و تنظیم وزن ها تا رسیدن به مقدار مشخصی از خطا تکرار می شود. در این مقاله با استفاده از الگوریتم LM، شبکه هایی با یک لایه مخفی مطابق شکل ۶ در نظر گرفته می شود.



شکل ۶- نمایشی از متغیر ها و ارتباطات نمونه شبکه مورد

استفاده

۳-۳- طراحی شبکه مناسب

هدف از این بخش، طراحی شبکه هایی است که با داشتن عدد تراکم پذیری، نسبت خارج از مرکزی، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان به عنوان پارامترهای متنوع ورودی، مشخصه های استاتیکی چون مقادیر زاویه مشخصه، میزان تحمل بار یاتاقان، اتلاف انرژی و همچنین مشخصه دینامیکی بسیار مهمی چون میزان پایداری یاتاقان را محاسبه و پیش بینی نماید.

برای این کار شبکه های عصبی MLP سه لایه با ساختارهای متنوع (۱-۱۸-۱۹)، (۱-۱۱-۱۲)، (۱-۱۱-۱۱)، (۱-۱۰-۱۰)، (۱-۹-۱۰)، (۱-۷-۸)، با استفاده از الگوریتم آموزشی LM، به کار گرفته می شود که تعداد سلول های هر لایه با توجه به نحوه پخش شدن نمونه های ورودی در فضای ویژگی ها، معیار میانگین خطا، مدت زمان پاسخ شبکه با روش آزمون و خطا تعیین می شود. با توجه به تجربیات قبلی، توابع انتقال برای لایه های اول و دوم Tansig و برای لایه آخر Pureline انتخاب شده است. معیار خطا نیز MSE در نظر گرفته شده است.

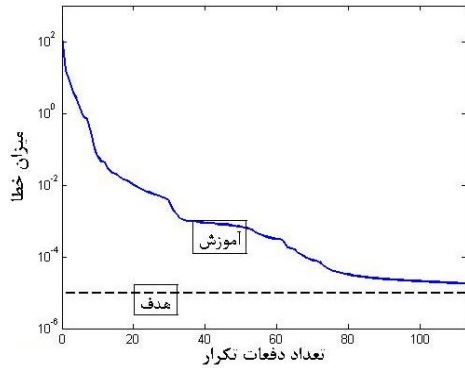
۴- نتایج و بحث

۴-۱- بررسی نتایج مربوط به شبکه های عصبی طراحی شده

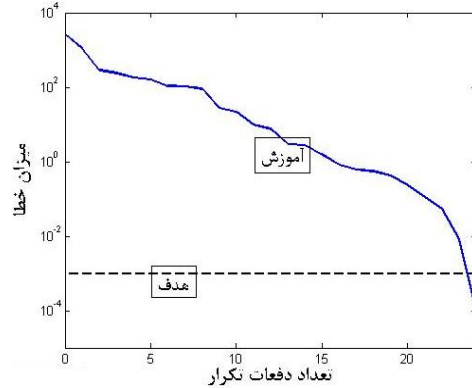
در این بخش، نتایج مربوط به شبکه های عصبی مصنوعی طراحی شده در رابطه با یاتاقان گازی هیدرو دینامیکی غیر مدور دو لب با ساختارهای مختلف، مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرند.

۴-۱-۱- نتایج عملکردی شبکه

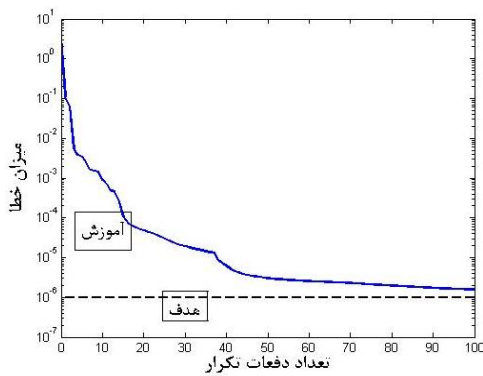
در شکل های ۷ تا ۱۱ نمونه نتایج نموداری مربوط به تعداد دفعاتی که لازم است تا دوره آموزشی در هر شبکه تکرار شود تا میزان خطای شبکه به حد مطلوب مورد نظر برسد، نشان داده شده است. این نمودارها به نحوی بیانگر نحوه عملکرد و کارایی روش شبکه های عصبی مصنوعی در تحلیل مسائل مورد بررسی می باشند.



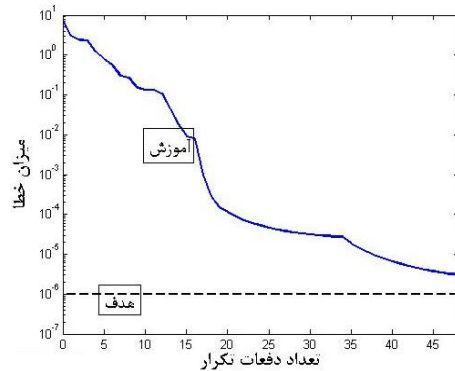
شکل ۱۰- بررسی عملکرد شبکه با ساختار (۱-۹-۱۰)



شکل ۷- بررسی عملکرد شبکه با ساختار (۱-۱۸-۱۹)



شکل ۱۱- بررسی عملکرد شبکه با ساختار (۱-۷-۸)

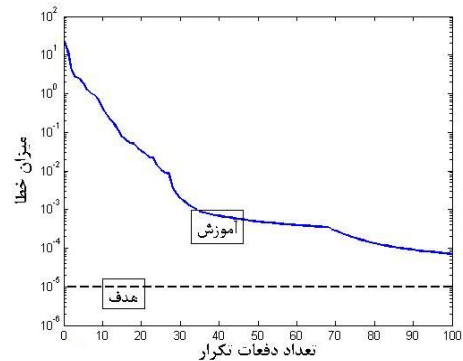


شکل ۸- بررسی عملکرد شبکه با ساختار (۱-۱۱-۱۲)

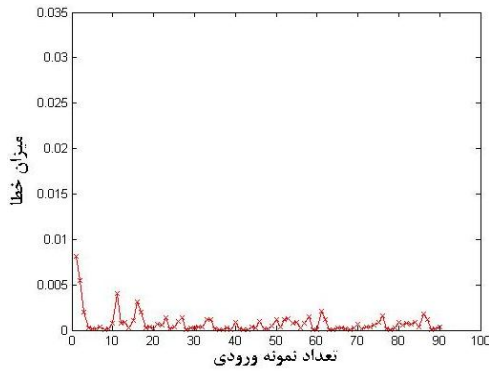
از بررسی شکل‌های فوق مشخص می‌شود که شبکه‌های عصبی طراحی شده، با تعداد تکرارهای کم به مقدار خطای مطلوب همگرا می‌گردند که تأییدی بر عملکرد بهینه آنها می‌باشد.

۴-۱-۲- نتایج مربوط به خطا

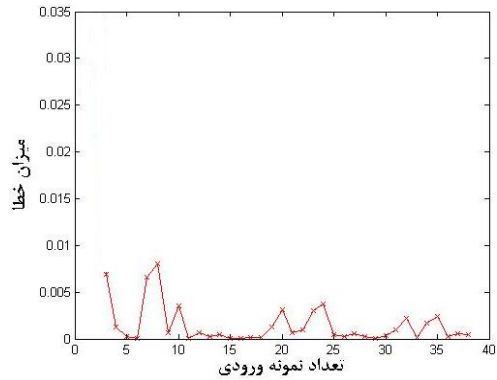
برای مشاهده دقیق مقدار خطا در شبکه‌های طراحی شده، نمونه نمودارهای ۱۲ تا ۱۶ میزان خطای شبکه بر اساس نمونه‌های ورودی اعمال شده، برای ساختارهای متنوع طراحی شده شبکه، جهت پیش بینی زاویه مشخصه، ظرفیت تحمل بار، اتلاف انرژی و میزان پایداری سیستم یاتاقان را تحت تاثیر پارامترهای عدد تراکم پذیری، نسبت خارج از مرکزی، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان نشان می‌دهند.



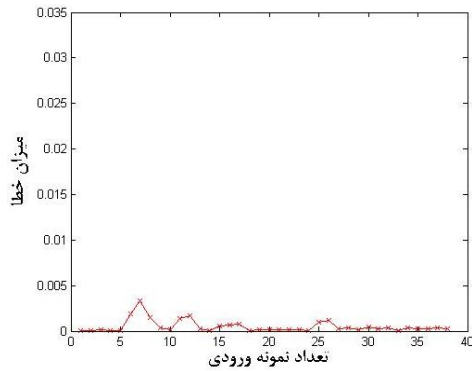
شکل ۹- بررسی عملکرد شبکه با ساختار (۱-۱۰-۱۰)



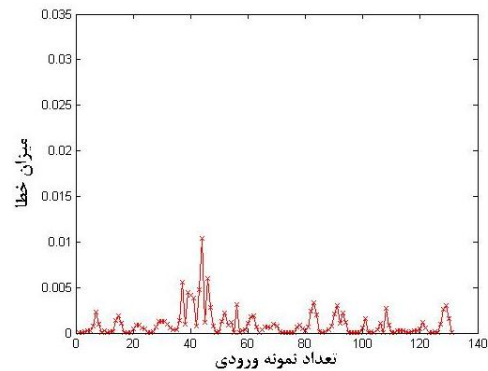
شکل ۱۵- بررسی خطای شبکه با ساختار (۱۰-۱۰-۱) بر اساس تعداد نمونه ورودی



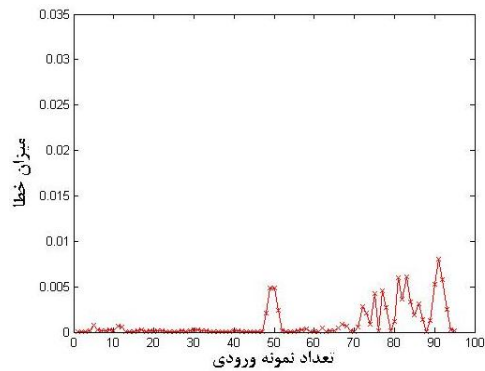
شکل ۱۲- بررسی خطای شبکه با ساختار (۱۹-۱۸-۱) بر اساس تعداد نمونه ورودی



شکل ۱۶- بررسی خطای شبکه با ساختار (۸-۷-۱) بر اساس تعداد نمونه ورودی



شکل ۱۳- بررسی خطای شبکه با ساختار (۱۲-۱۱-۱) بر اساس تعداد نمونه ورودی



شکل ۱۴- بررسی خطای شبکه با ساختار (۱۱-۱۱-۱) بر اساس تعداد نمونه ورودی

همانطور که مشخص است خطا برای تمامی ساختارهای استفاده شده در شبکه، بسیار ناچیز است که حاکی از طراحی مطلوب و بهینه ساختارهای شبکه و عملکرد قابل قبول برنامه‌های کامپیوتری نوشته شده، می‌باشد. همچنین نتایج مربوط به میزان خطا و مدت زمان اجرای برنامه با پردازنده Am2 3500, Ram 512. برای ساختارهای متنوع به کار رفته در شبکه، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- نتایج میزان خطا و مدت زمان اجرای برنامه برای ساختارهای مختلف شبکه

نوع ساختار شبکه	مدت زمان اجرای برنامه	میانگین خطای برنامه
۱۹-۱۸-۱	۳/۱ ثانیه	۰/۰۰۳۴
۱۲-۱۱-۱	۱/۹ ثانیه	۹/۷۹۷۲e-۰۰۴
۱۱-۱۱-۱	۳/۹ ثانیه	۹/۷۵۰۸e-۰۰۴
۱۰-۱۰-۱	۳/۹ ثانیه	۹/۷۹۹۷e-۰۰۴
۱۰-۹-۱	۲/۲ ثانیه	۰/۰۰۲۵
۸-۷-۱	۱/۵ ثانیه	۵/۰۹۳۹e-۰۰۴

زاویه مشخصه و W میزان تحمل بار یاتاقان می‌باشد. بررسی نتایج، گویای عملکرد صحیح روش شبکه‌های عصبی، برای دستیابی مطلوب به پارامترهای مورد نظر در حالت‌های مختلف است.

جدول ۲- مقایسه نتایج بدست آمده برای یاتاقان گازی غیر مدور دو لب با مراجع [۶ و ۱۸]

λ	ϵ	$\Psi^*(FEM)$	$\Psi^{**}(ANN)$	$W^*(FEM)$	$W^{**}(ANN)$
۲	۰/۲۰	۷۶/۶	۷۶/۶۰۰	۰/۱۷۱۸	۰/۱۷۲۴
	۰/۴۰	۷۵/۱	۷۵/۱۰۰۲	۰/۳۶۷۱	۰/۳۶۶۴
	۰/۶۰	۷۱/۵	۷۱/۴۹۹۹	۰/۶۳۱۰	۰/۶۳۱۱
	۰/۸۰	۵۸/۳	۵۸/۳۰۱۳	۱/۲۲۱۰	۱/۲۲۱۱
	۰/۹۰	۳۴/۱	۳۴/۱۰۳۲	۲/۷۹۵۰	۲/۷۹۵۲
۴	۰/۲۰	۶۲/۵	۶۲/۴۹۹۴	۰/۳۸۹۸	۰/۳۸۹۹
	۰/۴۰	۵۸/۹	۵۸/۸۹۹۰	۰/۸۵۴۴	۰/۸۵۴۲
	۰/۶۰	۵۰/۲	۵۰/۲۰۳۰	۱/۵۷۲	۱/۵۷۲۱
	۰/۸۰	۳۱/۳	۳۱/۳۹۶۳	۳/۴۴۴	۳/۴۴۴۰
	۰/۹۰	-	۲۲/۶۸۳۵	-	۵/۰۰۷۹
۱۲	۰/۲۰	۳۰/۲	۳۰/۱۹۹۶	۱/۰۵۳	۱/۰۵۴۰
	۰/۴۰	۲۶/۹	۲۶/۸۹۹۷	۲/۲۹۴	۲/۲۹۲۸
	۰/۶۰	۲۱/۵	۲۱/۴۹۹۴	۴/۱۲۴	۴/۱۲۴۴
	۰/۸۰	-	۵/۰۴۵۱	-	۸/۹۵۷۶

از جدول ۱ مشاهده می‌شود که میانگین خطای شبکه‌های طراحی شده برای سیستم یاتاقان هیدرو دینامیکی غیر مدور دو لب بسیار مطلوب و مدت زمان اجرای برنامه نیز ناچیز، می‌باشد که از مزایای این روش محاسباتی محسوب می‌گردد.

همانطور که از نتایج جدول ۲ مشخص است برای حالت‌هایی که از روش اجزا محدود در مراجع [۶ و ۱۸] جوابی گزارش نگردیده، در این مقاله جواب‌های قابل قبول ارائه شده است. پس از آموزش شبکه با محدود داده‌های حاصل از نتایج مراجع مذکور و پاره‌ای از داده‌های مراجع دیگر و دقت در نتایج فوق، کارایی بالا و عملکرد صحیح و مطلوب شبکه‌های عصبی طراحی شده جهت تحلیل سیستم یاتاقان گازی غیر مدور دو لب مشخص می‌گردد. در ادامه نتایج جدید حاصل از به کارگیری روش شبکه‌های عصبی مصنوعی در رابطه با یاتاقان گازی غیر مدور دو لب، آورده می‌شود. شکل ۱۷ اثر نسبت خارج از مرکزی را بر روی ظرفیت

۴-۲- بررسی نتایج مربوط به مشخصه های استاتیکی

از اهداف بخش حاضر، گزینش مناسب یاتاقان گازی غیر مدور دو لب جهت استفاده در کاربردهای عملی مورد نیاز می‌باشد لذا در این بخش اثراتی که عدد تراکم پذیری، نسبت خارج از مرکزی، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان می‌توانند بر مشخصه های استاتیکی سیستم یاتاقان گازی غیر مدور دو لب داشته باشند، مورد بررسی قرار گرفته است.

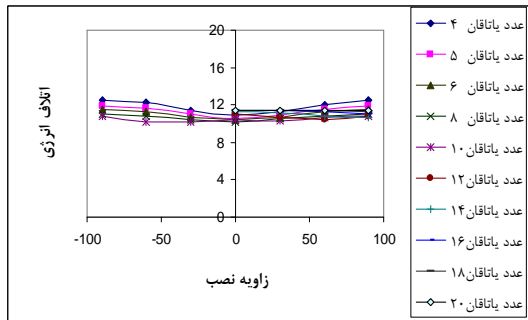
جدول ۲ نتایج بدست آمده در این بخش را در مقایسه با نتایج بدست آمده در مراجع [۶ و ۱۸] نشان می‌دهد. جهت آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد نیاز برای پیش بینی و تحلیل تاثیر پارامترهای عدد تراکم پذیری و نسبت خارج از مرکزی بر روی ظرفیت تحمل بار و مقدار زاویه مشخصه سیستم، مقادیر $\delta = 1$ و $\lambda = 0$ و همچنین سیستم یاتاقان گازی غیر مدور دو لب در حالت تقارن $[\theta_T = 0]$ و $[\theta_M = 0]$ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که λ عدد یاتاقان، ϵ نسبت خارج از مرکزی، Ψ

* مقادیر از مراجع [۶ و ۱۸]

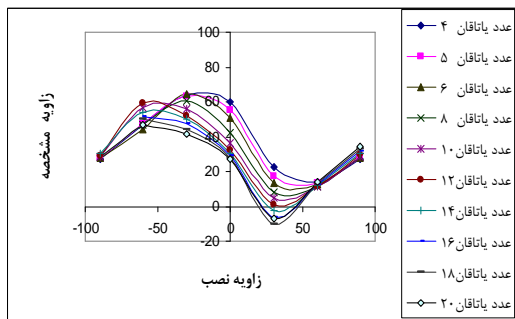
** مقادیر مربوط به بررسی حاضر که از روش شبکه عصبی بدست آمده‌اند. علامت - در جدول ۱ نشان‌دهنده آن است که این نتایج قبلاً گزارش نشده است.

شبکه‌های عصبی طراحی شده، استفاده گردیده است و نتایج حاصله بشرح زیر می‌باشند.

در شکل های ۱۸ و ۱۹ نتایج مربوط به اثر زاویه نصب بر روی میزان اتلاف انرژی و مقدار زاویه مشخصه یاتاقان دو لب، آورده شده است.



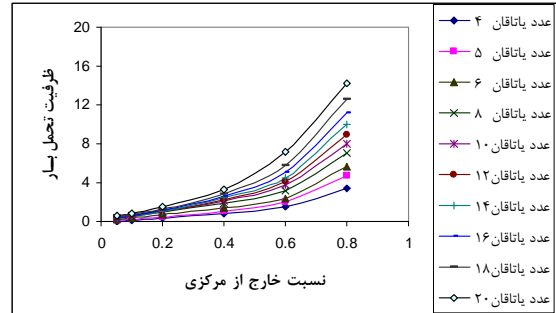
شکل ۱۸- اثر زاویه نصب بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان دو لب



شکل ۱۹- اثر زاویه نصب بر روی مقدار زاویه مشخصه یاتاقان دو لب

در بررسی تأثیر پارامتر زاویه نصب بر روی سیستم یاتاقان گازی غیر مدور دو لب در کار حاضر، مقادیر $\delta=0.5$ و $W=\lambda=1$ و هندسه یاتاقان در حالت بدون انحراف $[\theta_T = 0]$ در نظر گرفته شده است [۱۹]. محدوده تغییرات زاویه نصب برای هر نوع یاتاقان نصف طول کمان هر لب می‌باشد. بنابراین محدوده تغییرات برای یاتاقان دو لب از ۹۰- تا ۹۰+ درجه انتخاب می‌گردد تا نحوه چرخش یاتاقان به طور کامل مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. از بررسی نتایج شکل های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب مشاهده می‌شود که با افزایش در مقدار عدد تراکم پذیری یاتاقان غیر مدور دو لب، میزان اتلاف انرژی سیستم تغییر محسوسی نمی‌یابد، در حالی که

تحمل بار یاتاقان گازی غیر مدور دو لب در اعداد تراکم پذیری مختلف، نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- اثر نسبت خارج از مرکزی بر روی ظرفیت تحمل بار برای یاتاقان غیر مدور دو لب

از شکل ۱۷ مشهود است که دامنه تغییرات ظرفیت تحمل بار، با افزایش در عدد تراکم پذیری و همچنین مقدار E ، افزایش می‌یابد. نتایج جدید شبکه‌های عصبی در مورد زاویه مشخصه برای یاتاقان غیر مدور دو لب، در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- نتایج جدید زاویه مشخصه برای یاتاقان غیر مدور دو لب

ϵ	ψ در $\lambda=8$	ψ در $\lambda=12$	ψ در $\lambda=15$
۰/۰۵	۴۵/۶۰۷۰	۳۷/۶۴۲۴	۲۵/۵۵۹۲
۰/۱۰	۴۴/۸۸۸۵	۳۵/۵۱۴۷	۲۵/۲۹۸۲
۰/۲۰	۴۴/۰۵۴۱	۳۰/۱۹۹۶	۲۴/۳۵۶۴
۰/۴۰	۴۴/۰۸۷۸	۲۶/۸۹۹۷	۱۲/۱۶۴۶
۰/۶۰	۲۲/۷۲۵۸	۲۱/۴۹۹۴	۱۰/۲۰۰۵
۰/۷۰	۱۶/۲۲۲۳	۱۴/۱۷۵۹	۸/۹۹۴۲
۰/۸۰	۱۴/۱۵۰۲	۵/۰۴۵۱	۶/۵۹۶۳

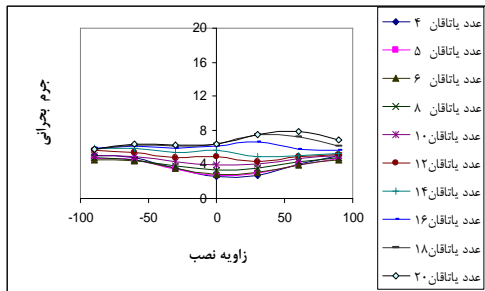
از جدول ۳ واضح است که با افزایش در عدد یاتاقان، زاویه مشخصه کاهش می‌یابد و می‌تواند در نحوه گزینش این نوع از یاتاقان‌ها در کاربردهای عملی مورد توجه صنعتگران مرتبط قرار گیرد.

به منظور بررسی اثر زاویه نصب و زاویه انحراف بر عملکرد یاتاقان دو لب، از داده های مراجع [۱۹ و ۲۰] جهت آموزش و تست

از مطالعه شکل ۲۱ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه انحراف، کاهش در مقدار زاویه مشخصه صورت می‌گیرد.

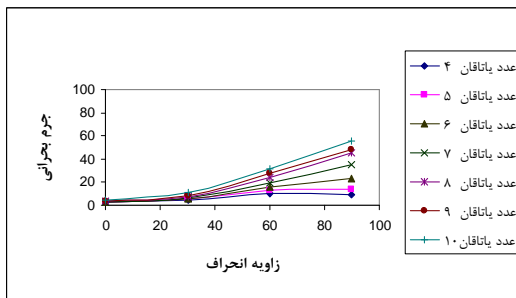
۳-۴- بررسی نتایج مربوط به مشخصه های دینامیکی

از شکل‌های ۲۲ و ۲۳ اثرات زاویه نصب و زاویه انحراف بر روی میزان پایداری سیستم یاتاقان غیر مدور دو لب مشاهده می‌شود.



شکل ۲۲- اثر زاویه نصب بر روی میزان پایداری یاتاقان دو لب

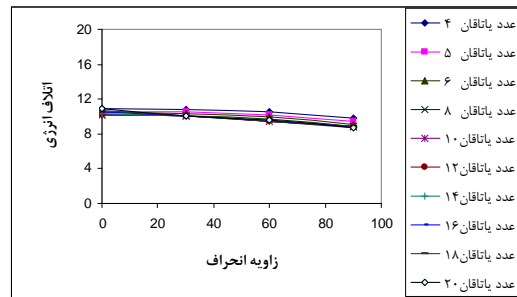
از بررسی شکل ۲۲ مشخص می‌شود که تغییر زاویه نصب یاتاقان دو لب در اعداد تراکم پذیری کمتر از ۱۶، بر روی مرز پایداری سیستم، تاثیر آنچنانی نداشته و در اعداد تراکم‌پذیری بیشتر از ۱۶ نیز، بیشترین میزان پایداری در محدوده زوایای نصب ۰ تا ۹۰ درجه صورت می‌گیرد. شکل ۲۳ گویای تاثیرات زاویه انحراف بر روی میزان پایداری سیستم یاتاقان غیر مدور دو لب که با کمیت بدون بعد جرم بحرانی تعریف می‌شود، می‌باشد.



شکل ۲۳- اثر زاویه انحراف بر روی میزان پایداری یاتاقان دو لب

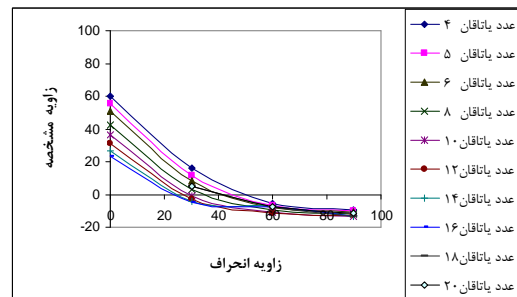
اثرات مقادیر عدد تراکم پذیری و زاویه نصب بر روی زاویه مشخصه کاملاً مشهود می‌باشد.

شکل های ۲۰ و ۲۱ نتایج زاویه انحراف در مورد میزان اتلاف انرژی و مقدار زاویه مشخصه یاتاقان دو لب را نشان می‌دهد. در این قسمت نیز جهت بررسی اثرات پارامتر زاویه انحراف بر روی سیستم یاتاقان گازی دو لب، مقادیر $\delta=0.5$ و $W=\lambda=1$ و هندسه یاتاقان در حالت بدون چرخش $[\theta_M = 0]$ در نظر گرفته شده‌اند [۲۰]. همچنین محدوده تغییرات زاویه انحراف یاتاقان از ۰ تا ۹۰ درجه برای دو لب در نظر گرفته می‌شود. این محدوده تغییرات، کمترین تا بیشترین مقادیر انحراف (کجی) یاتاقان را شامل می‌گردند.



شکل ۲۰- اثر زاویه انحراف بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان دو لب

از بررسی شکل ۲۰ واضح می‌باشد که با افزایش در مقدار زاویه انحراف یاتاقان غیر مدور دو لب، میزان اتلاف انرژی سیستم کاهش می‌یابد همچنین افزایش در عدد تراکم پذیری باعث کاهش اتلاف انرژی در سیستم یاتاقان می‌گردد.



شکل ۲۱- اثر زاویه انحراف بر مقدار زاویه مشخصه یاتاقان دو لب

در شکل ۲۳ ملاحظه می‌شود که با توجه به مقادیر پارامتر جرم بحرانی، زاویه انحراف نقش قابل ملاحظه‌ای بر روی میزان پایداری یاتاقان گازی دو لب داشته که این اثر در اعداد تراکم پذیری بالا محسوس تر می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

۱- با توجه به تراکم‌پذیری بالای گازها و وارد شدن پارامتر زمان در حل معادلات یاتاقان‌های گازی، که منجر به پیچیدگی مضاعف محاسباتی می‌شود، به‌کارگیری روش شبکه‌های عصبی جهت دستیابی به پاسخ مطلوب، در حداقل زمان محاسباتی ممکن، پیشنهاد می‌گردد.

۲- با استفاده از روش شبکه‌های عصبی، می‌توان با داشتن حداقل تعداد داده‌ها برای آموزش شبکه، نتایج جدید قابل قبولی را برای دامنه‌ای از حالت‌های مختلف عملکرد یاتاقانهای گازی به دست آورد.

۳- از بررسی نتایج مشخص می‌گردد که عدد تراکم پذیری، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نحوه عملکرد یاتاقان هیدرودینامیکی گازی غیر مدور دو لب دارد.

۴- نتایج حاصل از کار حاضر نشان‌دهنده آن می‌باشد که اعمال تغییرات مناسب در مقادیر زوایای نصب و انحراف، موجب افزایش پایداری سیستم یاتاقان گازی غیر مدور دو لب می‌شود.

۵- نتایج بدست آمده، حاکی از آن است که با انتخاب مناسب پارامترهای عدد تراکم پذیری، نسبت خارج از مرکزی، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان، می‌توان به عملکرد استاتیکی و دینامیکی بهینه‌ای برای یاتاقان گازی غیر مدور دو لب دست یافت.

لقی شعاعی (m)	\bar{C}
خارج از مرکزی $\bar{O}\bar{O}_j$ (m)	\bar{e}
شعاع محور (m)	\bar{R}
کمترین مقدار لقی شعاعی موقع هم مرکزی محور و یاتاقان (m)	\bar{C}_m
نیروی سیال روی محور: $F\bar{P}_a\bar{R}^2 (N)$	\bar{F}
ضخامت فیلم سیال: $h\bar{C}_m (m)$	\bar{h}
کمیت جرم بحرانی $M_c\bar{P}_a\bar{R}^2 / (\bar{C}_m\bar{\omega}) (kg)$	\bar{M}_c
حالت پایدار سیستم	O
حالت دینامیکی سیستم	O_j
فشار گاز نسبت به محیط، \bar{P} / \bar{P}_a	P
فشار محیط (N / m^2)	\bar{P}_a
افت انرژی $P_L\bar{\mu}\bar{R}^4\bar{\omega}^2 / \bar{C}_m$	\bar{P}_L
(Watt);	
ضرایب سختی فیلم گاز؛ $m, n = x, y (N / m)$	\bar{S}_{mn}
$S_{mn}\bar{P}_a\bar{R}^2 / \bar{C}_m$	
زمان	\bar{t}
	(s)
ظرفیت تحمل بار یاتاقان	W
سرعت محیطی محور (m / s) ; $\bar{R}\bar{\omega}U$	\bar{U}
محورهای مختصات دکارتی با در نظر گرفتن مبدأ	X, Y
در مرکز یاتاقان	
مختصات اغتشاش محور	X', Y'
علائم یونانی	
شدت غیر مدور بودن یاتاقان (پریلود) \bar{C}_m / \bar{c} ;	δ
نسبت خارج از مرکزی یاتاقان \bar{e} / \bar{c} ;	ϵ
زاویه مشخصه	Ψ
مختصات زاویه‌ای اندازه گیری شده از محور X	θ
زاویه بین خط المکزین یاتاقان و لب k ام با جهت مثبت محور X	θ_o^k

نمادها

پارامترهای بی بعد مساله بدون علامت بار نمایش داده می‌شوند.

\bar{B}_{mn}
ضرایب میرایی فیلم گاز؛
 $m, n = x, y (Ns / m)$
 $B_{mn}\bar{P}_a\bar{R}^2 / (\bar{C}_m\bar{\omega}) ;$

[9].Castejon C., Lara O., Garcia-Prada J.C., "Automated Diagnosis of Rolling Bearing Using MRA and Neural Networks", Maqlab Group, Mechanical Dept., Universidad Carlos, Vol. 30, pp. 289-299, 2009.

[10].Menhaj M.B., "Fundamentals of Neural Networks", Computational Intelligence, Vol. 1, Tehran, Iran, 2000.

[۱۱]. شنبه، م.، "استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی در پیش بینی خصوصیات کششی نخ های مغزی دار با مغزی نایلون و رویه پنبه"، استقلال، ۱۳۸۴.

[12].Chandra, M., Malik, M. and Sinhasan., "On the Dynamic Behavior of Two Gas-Lubricated Two Lob Journal Bearing Configurations", ASLE Transactions, Vol. 26, pp. 411-414, 1983.

[13].Raimondi, A.A., "A Numerical Solution for the Gas Lubricated Full Journal Bearing of Finite Length", ASLE Trans., pp. 131-155, 1961.

[14].Rohde, S.M. and Oh, K.P., "Higher Order Finite Element Methods for the Solution of Compressible Porous Bearing Problems", J.Lubr. Trans ASME, pp. 793-803, 1968.

[15].Reddy, J., "An Introduction to the Finite Element Method", Mcgraw-Hill, Newyork, U.S.A, 1984.

[16].Frence, J., Nicolas, D., Degueurce, B., Berthe, D. and Gode, M., "Hydrodynamic Lubrication : Bearing and Thrust Bearing", V.N. , Costantinescu , Elsevier, Amwsterda, 1997.

[17].Gurney, K., " An Introduction to Neural Networks", UCL press, London, 1997.

[18].Chandra, M., Malik, M. and Sinhasan., "On the Dynamic Behavior of Two Gas-Lubricated Two Lob Journal Bearing Configurations", ASLE Transactions, Vol. 26, pp. 411-414, 1983.

[19].Rahmatabadi, A.D. and Rashidi, R., " Effect of Mount Angle on Static and Dynamic Characteristics of Gas-Lubricated Noncircular Journal Bearings", Iranian Journal of Science & Technology, Vol 30, pp. 327-337, 2006.

[۲۰]رحمت آبادی، د.ا.، کرمی محمدی، ا. و رشیدی، ر.، " بررسی اثر زاویه انحراف بر عملکرد سیستم یاتاقانهای گازی غیر مدور"، مجله فنی و مهندسی مدرس (تربیت مدرس) - پذیرفته شده و در نوبت چاپ.

زاویه شروع لب k ام	θ_1^k
ویه پایان لب k ام	θ_2^k
زاویه انحراف	θ_T
زاویه نصب	θ_M
سرعت دورانی محور (rad/s)	$\bar{\omega}$
عدد تراکم پذیری یا عدد یاتاقان	Λ
نسبت طول به قطر یاتاقان (\bar{l}/\bar{d})	λ
لزجت روانکار (Ns/m^2)	$\bar{\mu}$
قسمت موهومی ماتریس	i
قسمت حقیقی ماتریس	r
اشاره به لب	k

مراجع

- [1].Rahmatabadi A.D., Rashidi R., "Investigation of Preload Effects on Noncircular Gas Bearing Systems Performance", JAST, Vol. 4, No. 1, pp. 33-38, 2007.
- [2].Kingsbury, A., "Experiments with Air-Lubricated Journal", J. Am.Soc.Nav Eng. , pp. 267-292, 1897.
- [3].Harrison, W.J., "The Hydrodynamical Theory of the Lubrication of a Cylindrical Bearing under Variable Load and of a Pivot Bearing", Trans. Cambridge Philos Soc., pp. 373-388, 1919.
- [4].Pinkus o., "Analysis of Noncircular Gas Journal Bearings", J. Lub.Technol, pp. 616-623, 1975.
- [5].Chandra M., Malik M. and Sinhasan R., "Gas Bearing Analysis and Solution Method", Part 1:Dynamic, Wear, pp. 255-268, 1983.
- [6].Chandra M., Malik M. and Sinhasan R., "Comparative Study of Four Gas-Lubricated Noncircular Journal Bearing Configuration",Tribology International ,Vol. 16, No. 2, pp. 26-31, 1983.
- [7].Karkoub M. and Elkamel A., "Modeling Pressure Distribution in a Rectangular Gas Bearing Using Neural Networks", Tribology International, Vol. 30, pp. 139-150, 1997.
- [8].Kang Yuan and Engineering Group, "Stiffness Determination of Angular-Contact Ball Bearing by Using Neural Network", Tribology International, pp. 1-9, 2005.