

بررسی مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی عمل کرد یاتاقان گازی غیرمدور سه لب با روش شبکه‌های عصبی مصنوعی

محمد رضا دهقانی زاده بغداد آبادی^۱ و اصغر دشتی رحمت آبادی^۲ سید محمد تقی المدرسی^۳
دانشکده مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی برق

دانشگاه یزد

(تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۱۳)

چکیده

استفاده گسترده از یاتاقان‌های گازی در صنایع گوناگون و کارایی بالای آن‌ها در زمینه‌های مختلف همواره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. از طرفی، تحلیل یاتاقان‌ها به خاطر تراکم‌پذیر بودن نوع روان‌کار (گاز) بسیار دشوار است. لذا، در این مقاله برای بررسی عمل‌کرد یاتاقان گازی غیرمدور سه لب، به علت سادگی روش حل، از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده است. برای این منظور، مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی مهم یاتاقان، از قبیل میزان پایداری، اتلاف انرژی و مقدار زاویه مشخصه یاتاقان مذکور، تحت تأثیر پارامترهای عدد تراکم‌پذیری، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده در این بررسی با نتایج گزارش شده قبلی که از روش اجزاء محدود به‌دست آمده‌اند، تطابق خوبی دارند. نتایج جدید نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه پارامترهای مذکور بر نحوه عمل‌کرد یاتاقان گازی غیرمدور سه لب بوده و گویای عمل‌کرد مطلوب شبکه‌های عصبی مصنوعی در تحلیل مسائل مربوط به یاتاقان‌ها که دارای روابط حاکم پیچیده و غیرخطی هستند، می‌باشد. از نتایج کار حاضر می‌توان برای گزینش بهینه این نوع یاتاقان‌ها در شرایط متنوع استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: یاتاقان گازی غیرمدور، مشخصه استاتیکی، مشخصه دینامیکی، شبکه عصبی مصنوعی

Investigation of Static and Dynamic Performance Characteristics of Three-lobe Gas Lubricated Journal Bearings, Using Artificial Neural Networks

M.R.D. Baghdadabadi and A.D. Rahmatabadi

Mech. Eng. Dep't.

Yazd Univ.

(Received: 20 Nov. 2009; Accepted: 4 Dec. 2010)

S.M.T Almodarresi

Elect. Eng. Dep't.

ABSTRACT

Due to vast use of gas lubricated bearings in various industries and their advantages in specific applications, they have been investigated by many researchers. However, analytical treatments of gas lubrication are tedious due to high non-linearity of the pressure equation as the consequence of lubricant compressibility. Hence, in this paper a feed-forward neural network is employed to investigate the performance of three-lobe gas lubricated bearings. It is believed that neural network can easily compete with theoretical model in predicting the solution of lubrication problems. The performance parameters considered are stability margin, power loss, and attitude angle for various values of bearing compressibility numbers, mount and tilt angles. The results of the neural network are compared to theoretical model (FEM) and it is observed that they are in good agreements. The results also indicate that the above parameters can influence the performance of the bearings.

Keywords: Non-circular Gas Bearing, Static Characteristics, Dynamic Characteristics, Artificial Neural Network

۱- کارشناس ارشد: mr.dehghanizade@yahoo.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): dashti@yazduni.ac.ir

۳- استادیار: almodarresi@gmail.com

$\bar{\mu}$	لزجت روان کار (Ns/m^2)
r, i	قسمت موهومی ماتریس
r	قسمت حقیقی ماتریس
k	اشاره به لب

۱- مقدمه

یاتاقان‌های گازی در توربو ماشین‌های سریع، ماشین‌های ابزار با دور بالا، صنایع داروسازی، قطعات رایانه‌ها و بسیاری موارد دیگر به کار گرفته می‌شوند. دلیل استفاده از یاتاقان‌های گازی در موارد فوق را می‌توان پایداری روان کار در بازه وسیعی از تغییرات دما، فراوانی روان کار مانند هوا، عدم آلوده‌سازی محیط، سازگاری در شرایط کارکرد با دور بالا و کاهش میزان اتلاف انرژی در اثر نیروی اصطکاک دانست [۱]. ظرفیت تحمل بار کم و پایداری دینامیکی پایین، مؤلفه‌هایی می‌باشند که کارایی این نوع یاتاقان‌ها را در عمل تحت تأثیر قرار می‌دهند و بررسی عمل کرد آن‌ها به این لحاظ نسبت به یاتاقان‌های روغنی، اهمیت بیش‌تری می‌یابد. بنابراین بررسی عوامل مؤثر بر عمل کرد یاتاقان‌های گازی برای استفاده بهینه از آن‌ها و جلوگیری از هرگونه آسیب احتمالی، اهمیت زیادی دارد. بررسی‌های انجام شده در مورد یاتاقان‌های گازی غیرمدور، نشان‌دهنده آن است که برخلاف یاتاقان‌های مدور که فقط ابعاد یاتاقان بر نحوه عمل کرد آنها نقش دارد، پارامترهای تعداد لب، مقدار دوره^۱، مقدار زاویه نصب، زاویه انحراف و عدد تراکم‌پذیری نیز علاوه بر پارامتر ابعاد، بر عمل کرد یاتاقان‌های گازی غیرمدور اثرات قابل توجهی می‌گذارند [۱]. شکل ۱ چرخش یک یاتاقان گازی غیرمدور سلب را نسبت به حالت بدون چرخش با زاویه‌ای که آن را زاویه نصب $(+\theta_M)$ می‌نامند، نشان می‌دهد. 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 غیرمدور سلب، زاویه‌ای است که خط‌المركزین محور و هر لب در حالت انحراف نسبت به وضعیت یاتاقان در حالت تقارن، تشکیل می‌دهد.

فهرست علائم

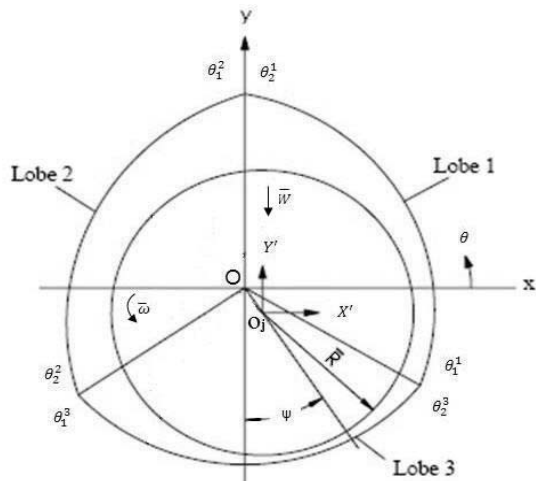
\bar{B}_{mn}	ضرایب میرایی فیلم گاز
\bar{C}	لقی شعاعی (m)
\bar{R}	شعاع محور (m)
\bar{C}_m	کمترین مقدار لقی شعاعی موقع هم مرکزی محور و یاتاقان (m)
\bar{F}	نیروی سیال روی محور (N)
\bar{h}	ضخامت فیلم سیال (m)
\bar{M}_c	کمیت جرم بحرانی (kg)
O	حالت پایدار سیستم
O_j	حالت دینامیکی سیستم
P	فشار گاز نسبت به محیط
\bar{P}_a	فشار محیط (N/m^2)
\bar{P}_L	افت انرژی (Watt)
\bar{S}_{mn}	ضرایب سختی فیلم گاز (N/m)
\bar{t}	زمان (s)
W	ظرفیت تحمل بار یاتاقان
\bar{U}	سرعت محیطی محور (m/s)
X, Y	محورهای مختصات دکارتی با در نظر گرفتن مبدأ در مرکز یاتاقان
X', Y'	مختصات اغتشاش محور

علائم یونانی

δ	شدت غیرمدور بودن یاتاقان (پریلود)
ε	نسبت خروج از مرکزیت یاتاقان
Ψ	زاویه مشخصه
θ	مختصات زاویه‌ای اندازه‌گیری شده از محور X
θ_o^k	زاویه بین خط‌المركزین یاتاقان و لب k ام با جهت مثبت محور X
θ_1^k	زاویه شروع لب k ام
θ_2^k	زاویه پایان لب k ام
θ_T	زاویه انحراف
θ_M	زاویه نصب
$\bar{\omega}$	سرعت دورانی محور (rad/s)
Λ	عدد تراکم‌پذیری یا عدد یاتاقان
λ	نسبت طول به قطر یاتاقان

1- Period

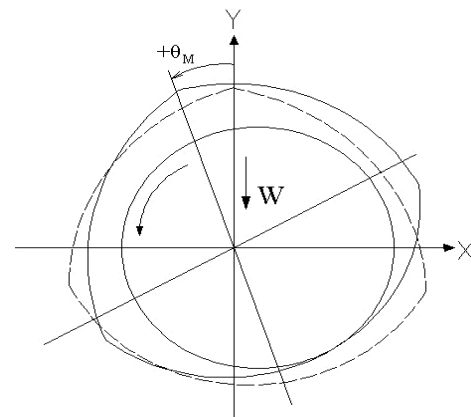
شعاعی محور یکسان باشد. پینکوس^[۳] تحقیقات اولیه بر روی یاتاقان‌های هیدرودینامیکی غیرمدور گازی را به انجام رساند. چاندرا^۴ و همکارانش به محاسبه ضرایب دینامیکی یاتاقان‌های هیدرودینامیکی مدور با روش اجزاء محدود پرداخته و پایداری یاتاقان‌های هیدرودینامیکی غیرمدور را نیز با تجزیه و تحلیل سیستم به روش خطی و حل معادلات به روش اجزاء محدود، مورد مطالعه قرار دادند [۵-۶]. با پیشرفت علم و مشخص شدن ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه‌های عصبی در تحلیل مسائل دشوار، کرکوب و الکامل^[۷]، در سال ۱۹۹۷، مدل توزیع فشار را روی یک یاتاقان چهارگوش گازی با دقت قابل قبولی به دست آوردند. در سال ۲۰۰۵ یوان کنگ^[۸] با طراحی یک شبکه عصبی، سختی را در یک بلبرینگ محاسبه نمود. در حال حاضر نیز استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، به‌عنوان یک روش مناسب و جدید در تمام رشته‌های فنی و مهندسی به سرعت در حال گسترش و پیشرفت می‌باشد [۹].



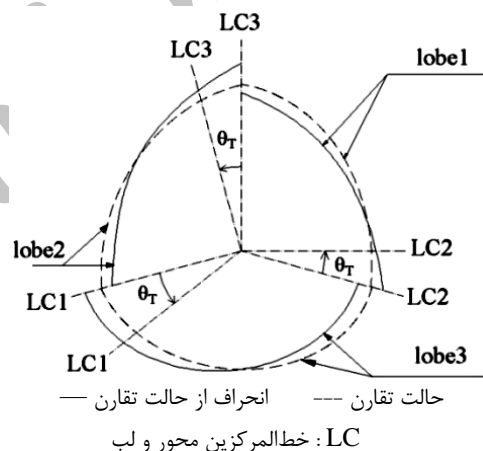
شکل (۳): نمایش هندسی یک یاتاقان غیرمدور سه لب [۶].

۲- معادلات حاکم

برای تحلیل یاتاقان‌های غیرمدور، هر یک از لب‌های آن به‌صورت یک جزء مستقل در نظر گرفته شده و معادلات



بدون چرخش یاتاقان — چرخش یاتاقان —
شکل (۱): نمایش یک یاتاقان غیرمدور سه لب در حالت تقارن و چرخش.



شکل (۲): نمایش یک یاتاقان غیرمدور سه لب در حالت تقارن و انحراف یافته.

در رابطه با یاتاقان‌های گازی در طول دهه‌های گذشته تحقیقات قابل ملاحظه‌ای انجام شده است. کینگس بری^[۲]، اولین بار در سال ۱۸۹۷، در مطالعات عملی خود از هوا به عنوان روان‌کار استفاده کرد و این آغازی برای استفاده از یاتاقان‌های گازی بود. در سال ۱۹۱۹ هاریسون^[۳] یاتاقان‌های طویل گازی را مورد بررسی قرار داد. وی در بررسی خود فرض نمود متوسط ضخامت فیلم در فضای لقی

3- Pinkus

4- Chandra

5 - Karkoub and Elkamel

6- Yuan Kang

1- Kingsbury

2- Harrison

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 در نظر گرفته شده است.

برای بیان حالت دینامیکی در میدان جریان، فرض می‌شود که حرکت چرخشی محور، تناوبی بوده و به صورت زیر بیان شود:

$$X' = \operatorname{Re} \left(|X'| e^{jn} \right), Y' = \operatorname{Re} \left(|Y'| e^{jn} \right). \quad (۶)$$

که در آن، X' و Y' مختصات اغتشاش محور است که از موقعیت پایدار آن اندازه‌گیری می‌شود. در این رابطه $|Y'|$ و $|X'|$ دامنه حرکت، $j = \sqrt{-1}$ و γ نسبت فرکانس چرخش محور به سرعت زاویه آن است. فرکانس چرخش، سرعت زاویه‌ای است که محور در اثر اغتشاش صورت گرفته 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:

$$P = P_o + P'_x X' + P'_y Y' \quad (۷)$$

$$P'_x = P_x + j\gamma P_{\dot{x}}, P'_y = P_y + j\gamma P_{\dot{y}} \quad (۸)$$

که در آن، P'_x ، P'_y مؤلفه‌های فشار دینامیکی مختلط هستند. همچنین P_x و P_y مؤلفه‌های فشار نسبت به جابه‌جایی صورت گرفته و $P_{\dot{x}}$ و $P_{\dot{y}}$ مؤلفه‌های فشار نسبت به سرعت در راستای جابه‌جایی می‌باشند.

معادله فشار در حالت پایدار با جای‌گذاری رابطه (۷) در رابطه (۳) و قرار دادن $X' = Y' = 0$ در آن، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \theta} \right\} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \xi} \right\} = \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta} [(P_o + 1) h_o] \quad (۹)$$

معادلات P'_x و P'_y را می‌توان با مشتق‌گیری جزئی از معادله (۳) بر حسب x' و y' به صورت زیر به دست آورد:

$$(۱۰)$$

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P'_x}{\partial \theta} + h_o^3 \frac{\partial P_o}{\partial \theta} P'_x - \Lambda h_o P'_x \right\} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ h_o^3 (P_o + 1) \frac{\partial P'_x}{\partial \xi} + h_o^3 \frac{\partial P_o}{\partial \xi} P'_x \right\} - j 2 \gamma \Lambda h_o P'_x =$$

حاکم برای آن نوشته می‌شود. به منظور عمومیت دادن تحلیل برای کل هندسه یاتاقان غیرمدور، هندسه فیلم سیال نسبت به دستگاه مختصات عبوری از مرکز یاتاقان، مطابق شکل ۳، در نظر گرفته شده است. ضخامت فیلم سیال در فضای لقی هر لب با قرارگیری محور در یک حالت چرخش گذرا به صورت زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$h_k = \frac{1}{\delta} - (X_j) \cos \theta - (Y_j) \sin \theta + \left(\frac{1}{\delta} - 1 \right) \cos (\theta - \theta_o^k), \quad (۱)$$

$$h_{ok} = \frac{1}{\delta} - (X_{jo}) \cos \theta - (Y_{jo}) \sin \theta + \left(\frac{1}{\delta} - 1 \right) \cos (\theta - \theta_o^k), \quad (۲)$$

که در آن، h_{ok} ضخامت فیلم سیال در حالت پایدار، و (X_{jo}, Y_{jo}) و (X_j, Y_j) به ترتیب مختصات مرکز محور در حالت پایدار و دینامیکی می‌باشند. δ پرلود سیستم، به معنی نسبت کوچک‌ترین فضای لقی یاتاقان به فضای لقی آن، موقعی که محور و یاتاقان هم‌مرکز باشند، تعریف می‌شود. همچنین θ_o^k زاویه‌ای است که خط مرکزی محور و لب k ام با جهت مثبت محور X می‌سازد. معادله فشار حاکم در میدان جریان هم‌دما برای هر یک از لب‌های یاتاقان به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ h^3 (P + 1) \frac{\partial P}{\partial \theta} \right\} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ h^3 (P + 1) \frac{\partial P}{\partial \xi} \right\} = \Lambda \left[U \frac{\partial}{\partial \theta} + 2 \frac{\partial}{\partial t} \right] \{ (P + 1) h \}, \quad (۳)$$

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

$$\Lambda = \frac{6 \mu \omega R^2}{P_a C_m} \quad (۴)$$

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 زمانی که آن‌ها هم‌مرکزند، می‌باشد. شرایط مرزی حاکم بر مساله به صورت زیر است:

$$p(\theta_1^k, \xi, t) = p(\theta_2^k, \xi, t) = p(\theta, \mp \lambda, t) = 0. \quad (۵)$$

که در آن، L تعداد لب و O حالت پایدار سیستم را بیان می‌کند. در حالت دینامیکی جهت تعیین مقدار مرز پایداری، با استفاده از معادله حرکت محور و با توجه به قانون دوم نیوتن، از روابط زیر استفاده می‌شود [۱۴]:

$$M_C = \frac{(S_{xx} B_{yy} + S_{yy} B_{xx} - S_{xy} B_{yx} - S_{yx} B_{xy})}{[(B_{xx} + B_{yy})\gamma^2]}, \quad (17)$$

(۱۸)

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

$$\begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} \\ B_{yx} & B_{yy} \end{bmatrix}^T = \sum_{k=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \end{bmatrix} [\cos\theta \quad \sin\theta] d\theta d\zeta, \quad (20)$$

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

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 M_C 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 $M_C < M_j$ سیستم یاتاقان پایدار است، در حالی که برای $M_C > M_j$ سیستم یاتاقان ناپایدار و $M_j = M_C$ آستانه ناپایداری سیستم را تعریف می‌نماید [۱۴]. 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 مثال آموزش دیده و برای انجام وظیفه خاصی طراحی می‌شوند [۹].

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ 3h_o^2 f(\theta)(P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \theta} - \Lambda(P_o + 1)f(\theta) \right\} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ 3h_o^2 f(\theta)(P_o + 1) \frac{\partial P_o}{\partial \xi} - \Lambda(P_o + 1)f(\theta) \right\} - j2\gamma\Lambda(P_o + 1)f(\theta).$$

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

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

می‌باشند. رابطه (۹)، رابطه غیرخطی است و برای دستیابی به متغیر فشار در حالت پایدار، می‌توان روش نیوتن را با به‌کارگیری روش اجزاء محدود [۱۱-۱۲] به‌کار گرفت. معادلات با روش گالرکین [۱] به شکل روابط در اجزاء محدود تبدیل می‌شوند. با حل معادله (۹) میدان فشار در حالت پایدار به دست می‌آید و از این راه می‌توان مشخصه‌های استاتیکی سیستم یاتاقان‌های گازی را محاسبه نمود. مشخصه‌های استاتیکی عبارتند از ظرفیت تحمل بار یاتاقان (W)، زاویه مشخصه سیستم (ψ) و افت انرژی (P_L). مؤلفه‌های نیروی سیال روی محور با رابطه زیر بیان می‌شوند:

(۱۳)

$$\begin{bmatrix} F_{xo} \\ F_{yo} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^L \begin{bmatrix} F_{xo}^k \\ F_{yo}^k \end{bmatrix} = - \sum_{k=1}^L \int_{-\lambda}^{\lambda} \int_{\theta_1^k}^{\theta_2^k} P_{ok} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} d\theta d\zeta,$$

همچنین، ظرفیت تحمل بار و زاویه مشخصه یاتاقان نیز به-ترتیب به صورت زیر به دست می‌آید:

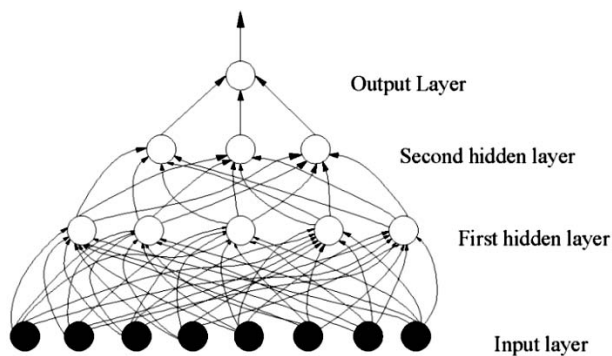
$$W = (F_{xo}^2 + F_{yo}^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

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

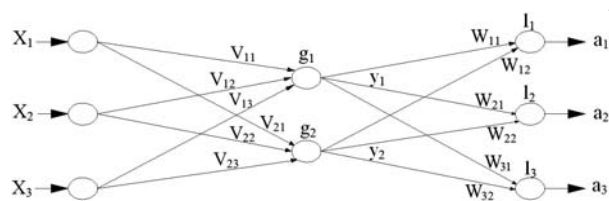
اتلاف انرژی حاصل از اثر نیروی برشی روان کار T برای یاتاقان‌های غیرمردور نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. [۶]

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

[۱۵-۱۶]. براساس این الگوریتم، خطای محاسبه شده در هر لایه برای تنظیم وزن‌های لایه مخفی قبل از آن استفاده می‌شود. این عملیات به‌طور متوالی تا تنظیم وزن‌های اولین لایه مخفی، ادامه پیدا می‌کند. فرایند آموزش و تنظیم وزن‌ها تا رسیدن به مقدار مشخصی از خطا تکرار می‌شود. به فرآیند اعمال تمام الگوهای آموزشی برای تنظیم وزن‌ها، در هر مرحله، یک تکرار گفته می‌شود.



شکل (۵): نمای شماتیک یک شبکه چندلایه پیش‌رونده [۱۵].

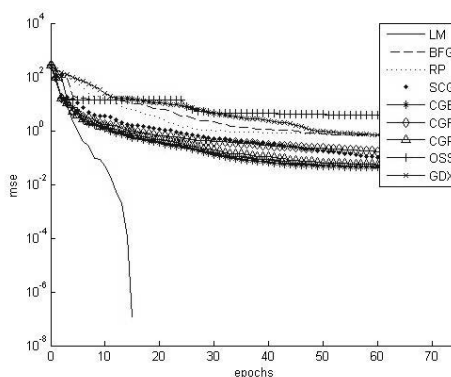


شکل (۶): نمایشی از متغیرها و ارتباطات الگوریتم شبکه مورد استفاده [۱۶].

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم LM، شبکه‌ای با یک لایه مخفی مطابق شکل ۶ در نظر گرفته می‌شود. البته نتایج به‌دست آمده را برای تعداد دلخواهی از لایه‌های مخفی می‌توان گسترش داد. در این الگوریتم، تمام واحدهای پردازشگر یک لایه، با تمام واحدهای لایه بعدی در ارتباط هستند. پارامترهای مختلف شبکه، به این صورت تعریف می‌شوند که، اندیس‌های بالایی، مبین شماره لایه و اندیس‌های پایینی، مبدأ و مقصد اتصال سیناپسی را مشخص می‌کنند. همچنین v_{ji} وزن ارتباطی بین واحد i ام لایه ورودی و واحد j ام لایه مخفی به ازای $h = 1, 2, \dots, n$ و $j = 1, 2, \dots, n$ و w_{ji} وزن ارتباطی بین واحد j ام لایه مخفی و

۱-۳- انتخاب الگوریتم آموزشی مناسب

برای طراحی شبکه بهینه، کارایی الگوریتم‌های آموزشی مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. برای تشخیص تفاوت الگوریتم‌های مختلف به‌صورت شهودی، نمودار کارایی شبکه به‌ازای هر الگوریتم بررسی می‌شود. با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزاری MATLAB، نمودار کارایی شبکه (mse بر حسب epochs) بعد از آموزش با هر الگوریتم مطابق شکل ۴ می‌باشد. به منظور مقایسه دقیق‌تر با استفاده از دستور state شرایط اولیه برای تمام الگوریتم‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. 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 برای آموزش شبکه، از این الگوریتم استفاده می‌شود. برای طراحی شبکه بهینه، باید زمان اجرای برنامه و میانگین خطا نیز، مورد محاسبه قرار گیرد.



شکل (۴): مقایسه کارایی شبکه برای الگوریتم‌های آموزشی مختلف.

۲-۳- الگوریتم آموزشی LM

این روش، برای هر شبکه چندلایه (شکل ۵) با توابع محرک مشتق‌پذیر می‌تواند به‌کار برده شود. قبل از استفاده از این الگوریتم، ماتریس وزن‌های تمام لایه‌ها به‌صورت تصادفی و با مقادیر کوچک، مقداردهی می‌شود. سپس بردارهای ورودی به شبکه وارد و خروجی آن محاسبه می‌گردد. خروجی محاسبه شده با خروجی مطلوب، مقایسه و مقدار خطای به دست آمده به‌عنوان معیاری برای تنظیم وزن‌ها استفاده می‌شود

نرخ یادگیری (η) در الگوریتم آموزشی انتشار خطا به عقب، میزان تغییرات وزن ها و به عبارت دیگر، میزان پرش وزن ها در هر تکرار را تعیین می کند. نرخ یادگیری بر روی سرعت هم گرایی شبکه مؤثر است. انتخاب نادرست نرخ آموزش باعث شکست در هم گرایی شبکه می شود [۱۶].

تابع خطای E^p به روش های مختلفی مثل میانگین مربعات خطا^۱ (MSE) و مجموع مربعات خطا^۲ (SSE) و ... تعریف می شود. معمولی ترین تابع مورد استفاده، میانگین مربعات خطا می باشد که برای الگوی ورودی p ام، به صورت زیر تعریف می شود:

$$E^p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (t_k^p - a_k^p)^2, \quad (28)$$

که در آن، ضریب ۰/۵ به دلیل ساده سازی ریاضی جایگزین شده است. برای مشخص نمودن معادله (۲۷)، برای وزن های لایه خروجی و لایه مخفی، باید مشتق E^p ، نسبت به لایه های مخفی و خروجی، بر اساس قوانین زنجیره ای نسبت به مشتق گیری، در نهایت، دستور ارتقاء وزن ها برای واحدهای پردازش گر لایه خروجی مطابق زیر می باشد:

$$\Delta w_{kj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} = \eta \delta_k y_j, \quad (29)$$

$$\delta = (t_k - a_k) f^{kj}(l_k), \quad (30)$$

از طرفی:

$$\Delta v_{ji} = \eta \delta_j x_i = \eta x_i f'(g_j) \sum_k \delta_k w_{kj}, \quad (31)$$

$$\delta_j = f'(g_j) \sum_k \delta_k w_{kj}. \quad (32)$$

در مجموع میزان تغییرات وزن ها در مرحله $(s+1)$ آموزش، برای وزن های لایه خروجی و لایه مخفی، به ترتیب، به صورت زیر می باشد:

$$w_{kj}(s+1) = w_{kj}(s) + \eta \delta_k y_j, \quad (33)$$

$$v_{ji}(s+1) = v_{ji}(s) + \eta \delta_j x_i. \quad (34)$$

۳-۳- طراحی شبکه مناسب

هدف از این بخش، طراحی شبکه هایی است که با داشتن مقادیر عدد تراکم پذیری، نسبت خارج از مرکزی، زاویه نصب و

واحد k ام لایه خروجی به ازای $m, \dots, 2, 1$ و x^p بردار n بعدی الگوی آموزشی p به ازای $p, \dots, 2, 1$ می باشد:

$$g_j = \sum_i (v_{ji} x_i), \quad (21)$$

که g_j ورودی واحد j ام لایه مخفی می باشد:

$$l_k = \sum_j (w_{kj} y_j), \quad (22)$$

که l_k ورودی واحد k ام لایه خروجی:

$$y_j = f(g_j), \quad (23)$$

که y_j خروجی واحد j ام لایه مخفی، ناشی از بردار ورودی x^p :

$$a_k = f(l_k), \quad (24)$$

که a_k^p خروجی واحد k ام لایه خروجی ناشی از بردار ورودی x^p می باشند. بنابراین برای واحد k ام لایه خروجی، a مطابق معادله زیر به دست می آید:

$$a_k = f(l_k) = f\left(\sum_j (w_{kj} \cdot y_j)\right) = f\left(\sum_j w_{kj} \cdot f(g_j)\right) = f\left(\sum_j w_{kj} \cdot f\left(\sum_i v_{ji} x_i\right)\right). \quad (25)$$

در شکل ۶، تمام پارامترهای فوق، به صورت شماتیک، نشان داده شده است [۱۶].

در این روش آموزشی، برای تعریف خطای کلی شبکه مقدار (E_{total}) متوسط خطای خروجی های شبکه و (E^p) برای همه الگوهای آموزش دهنده به عنوان معیار به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$E_{total} = \frac{1}{p} \sum_{p=1}^p E^p. \quad (26)$$

در این الگوریتم، وزن ها به گونه ای تغییر می کنند که با ارائه هر الگوی آموزشی، خطای شبکه نسبت به تکرار قبلی کاهش پیدا می کند. این هدف با تنظیم وزن ها در جهت عکس گرادیان خطا، حاصل می شود. مطابق معادله (۲۷)، تنظیم وزن ها، در مرحله $(s+1)$ آموزش، باید متناسب با مشتق خطای محاسبه شده در مرحله s باشد [۱۶].

$$\Delta w(s+1) = -\eta \frac{\partial E^p}{\partial w(s)} \quad (27)$$

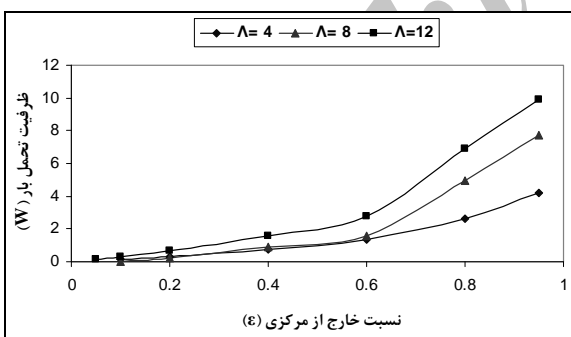
1- Mean Square Error

2- Sum Square Error

از نتایج جدول ۱ مشخص است برای حالاتی که از روش اجزاء محدود در مرجع [۶]، جوابی گزارش نشده، در این مقاله جواب‌های قابل قبول ارائه شده است. پس از آموزش شبکه و مقایسه نتایج جدول ۱، نتایج جدید بدست آمده در رابطه با یاتاقان گازی غیرمدور سه‌لب، در ادامه ارائه می‌شود.

جدول (۱): مقایسه نتایج به‌دست آمده برای یاتاقان گازی غیرمدور سه‌لب با مرجع [۶].

Λ	ε	Ψ (FM)	Ψ (AN)	W (FM)	W (AN)
۲	۰/۲	۶۸/۶	۶۸/۵۹۹۷	۰/۱۷۴۸	۰/۱۷۴۴
	۰/۴	۶۷/۱	۶۷/۱۰۰۰	۰/۳۸۰۲	۰/۳۸۰۰
	۰/۶	۶۲/۷	۶۲/۷۰۰۳	۰/۶۷۹۸	۰/۶۷۹۳
	۰/۸	۵۴/۶	۵۴/۶۰۱۰	۱/۲۸۷۹	۱/۲۸۷۶
۴	۰/۲	۵۶/۲	۵۶/۱۹۷۸	۰/۳۳۵۶	۰/۳۳۵۳
	۰/۴	۵۵/۴	۵۵/۴۰۰۲	۰/۷۴۱۸	۰/۷۴۱۹
	۰/۶	۵۱/۶	۵۱/۶۰۱۶	۱/۳۴۶۰	۱/۳۴۵۶
	۰/۸	۴۲/۱	۴۲/۱۰۲۴	۲/۶۵۴۰	۲/۶۵۳۷
۱۲	۰/۲	۴۳/۵	۴۳/۵۰۰۲	۰/۶۸۹۸	۰/۶۸۹۶
	۰/۴	۴۲/۸	۴۲/۷۹۹۴	۱/۵۳۹	۱/۵۳۹۳
	۰/۶	۳۹/۴	۳۹/۳۹۹۵	۲/۷۸۲	۲/۷۸۱۸
	۰/۸	-	۳۴/۷۷۷۱	-	۶/۸۸۹۲



شکل (۷): اثر نسبت خارج از مرکزی روی ظرفیت تحمل بار برای یاتاقان غیرمدور سه‌لب.

شکل ۷ اثر نسبت خارج از مرکزی را روی ظرفیت تحمل بار یاتاقان گازی غیرمدور سه‌لب در اعداد تراکم‌پذیری مختلف، نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود دامنه تغییرات ظرفیت تحمل بار، با افزایش تراکم‌پذیری یاتاقان، افزایش می‌یابد. علت این افزایش-

زاویه انحراف یاتاقان به عنوان پارامترهای متنوع ورودی، مشخصه‌های استاتیکی چون مقادیر زاویه مشخصه، میزان تحمل بار یاتاقان، اتلاف انرژی و هم‌چنین مشخصه دینامیکی بسیار مهمی مانند میزان پایداری یاتاقان را، پیش‌بینی و محاسبه نماید.

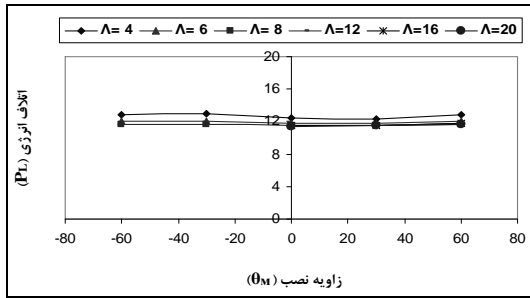
برای این منظور، شبکه‌های عصبی MLP سه‌لایه، با ساختارهای متنوع (۱-۱۸-۱)، (۱-۱۱-۱)، (۱-۱۰-۱)، (۱-۹-۱) و (۱-۷-۱) با به‌کارگیری الگوریتم آموزشی LM، استفاده شده که تعداد سلول‌های هر لایه، با توجه به نحوه پخش شدن نمونه‌های ورودی، در فضای ویژگی‌ها و معیارهای میانگین خطا و نیز مدت زمان پاسخ شبکه، تعیین می‌شود. با توجه به مطالعات و تجربیات قبلی، توابع انتقال برای لایه‌های اول و دوم \tansig و برای لایه آخر $pureline$ انتخاب شده است و هم‌چنین معیار خطای mse برای طراحی ساختارهای مختلف شبکه، در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج و بحث

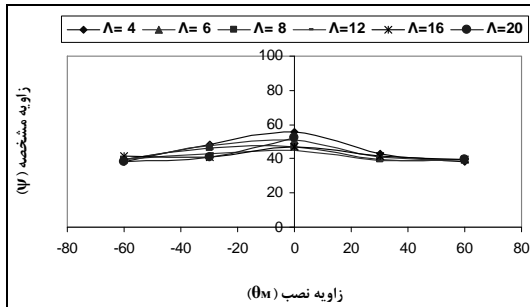
عملکرد یاتاقان‌ها می‌تواند در دو حالت استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف طراحی بر مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی آنها مطالعه گردند.

۴-۱- بررسی نتایج مربوط به مشخصه‌های استاتیکی

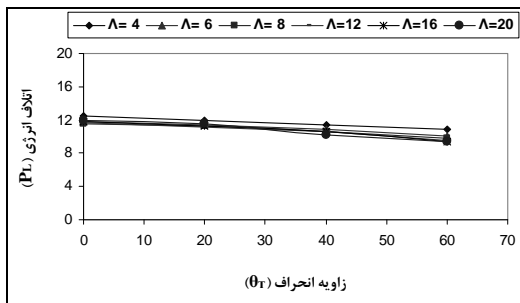
در این بخش، اثراتی که عدد تراکم‌پذیری، نسبت خارج از مرکزی، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان بر مشخصه‌های استاتیکی سیستم یاتاقان گازی غیرمدور سه‌لب می‌توانند داشته باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۱ نتایج به‌دست آمده در این بخش را در مقایسه با نتایج مرجع [۶] که برای آموزش و تست مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. بررسی نتایج، گویای عمل‌کرد صحیح روش شبکه‌های عصبی، برای دستیابی مطلوب به پارامترهای موردنظر، در حالت‌های مختلف است. در این جدول (AN)، گویای نتایج حاصل از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی، (FM)، نتایج حاصل از روش اجزاء محدود موجود در مرجع [۶] و هم‌چنین علامت (-) نیز نشان‌دهنده آن است که این نتایج قبلاً گزارش نشده است.



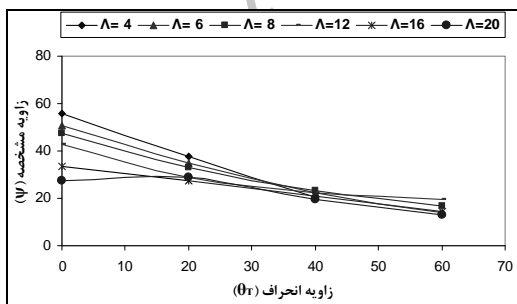
شکل (۸): اثر زاویه نصب بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان غیرمدور سه لب.



شکل (۹): اثر زاویه نصب بر روی مقدار زاویه مشخصه یاتاقان غیرمدور سه لب.



شکل (۱۰): اثر زاویه انحراف بر روی میزان اتلاف انرژی یاتاقان غیرمدور سه لب.



شکل (۱۱): اثر زاویه انحراف بر روی مقدار زاویه مشخصه یاتاقان غیرمدور سه لب.

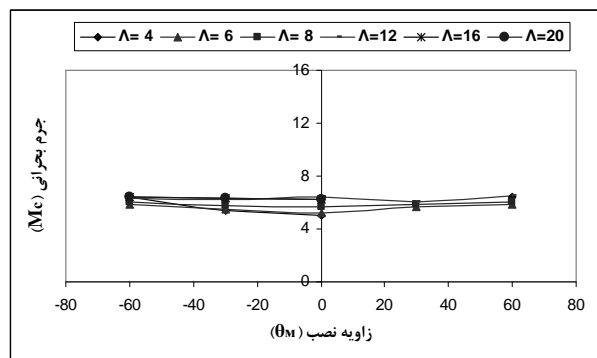
همان طور که از رابطه (۴) مشخص می‌باشد- رابطه مستقیم عدد تراکم‌پذیری و لزجت روان کار می‌باشد. ازدیاد عدد تراکم‌پذیری به معنای افزایش لزجت روان کار بوده و باعث افزایش ظرفیت تحمل بار گردیده است.

نتایج جدید شبکه‌های عصبی در مورد زاویه مشخصه بر حسب نسبت خارج از مرکزی، برای یاتاقان گازی غیرمدور سه لب، در جدول ۲ آمده است. همان گونه که در این جدول مشخص است با افزایش عدد تراکم‌پذیری، مقدار زاویه مشخصه، کاهش می‌یابد که این کاهش در مقدار زاویه مشخصه نیز به علت زیاد شدن لزجت روان کار در اعداد تراکم‌پذیری بالاتر می‌باشد. هر چه روان کار لزجت‌تر باشد در نتیجه جابه‌جایی مرکز محور کمتر و زاویه مشخصه کوچک‌تری خواهیم داشت.

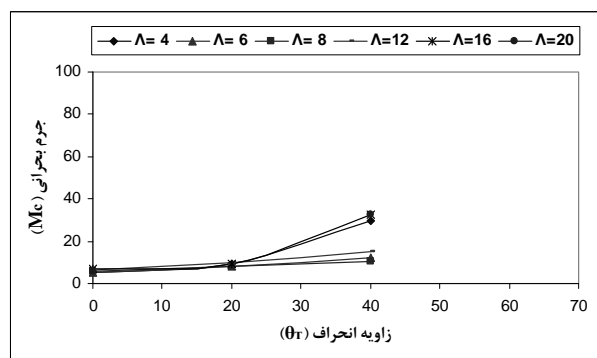
جدول (۲): نتایج زاویه مشخصه برای یاتاقان گازی غیرمدور سه لب.

ε	Ψ در Λ=۸	Ψ در Λ=۱۲	Ψ در Λ=۱۵
۰/۰۵	۵۴/۱۹۶۶	۴۵/۲۰۳۲	۳۹/۳۴۷۶
۰/۱۰	۵۴/۰۵۳۸	۴۴/۴۷۰۴	۳۹/۱۹۸۲
۰/۲۰	۵۳/۳۳۱۳	۴۳/۵۰۰۲	۳۴/۴۸۱۴
۰/۴۰	۴۹/۰۰۵۸	۴۲/۷۹۹۴	۲۷/۹۱۸۷
۰/۶۰	۴۴/۰۰۲۰	۳۹/۳۹۹۵	۲۶/۹۵۵۴
۰/۷۰	۴۲/۲۷۷۰	۳۶/۷۹۵۶	۲۶/۴۵۶۳
۰/۹۵	۳۳/۰۳۶۶	۳۱/۷۶۸۱	۱۷/۲۴۲۵

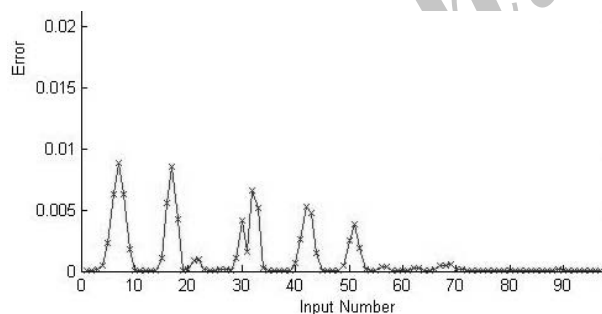
در شکل‌های ۹-۸ نتایج مربوط به اثر زاویه نصب بر روی میزان اتلاف انرژی و مقدار زاویه مشخصه یاتاقان غیرمدور سه لب، ارائه شده است. تغییرات جزئی در مقدار اتلاف انرژی یاتاقان غیرمدور سه لب، بر حسب زاویه نصب را از شکل ۸ می‌توان مشاهده نمود. شکل ۹ گویای مقدار بیشینه زاویه مشخصه یاتاقان غیرمدور سه لب برای اعداد تراکم‌پذیری مختلف، در زاویه نصب صفر می‌باشد. از آن جا که شکل هندسی یاتاقان‌های سه لب به شکل یاتاقان‌های مدور نزدیک است و در مورد یاتاقان مدور زاویه نصب بی‌تأثیر می‌باشد، نتایج حاضر نیز کم‌تأثیر بودن زاویه نصب در مورد اتلاف انرژی و زاویه مشخصه یاتاقان را نشان می‌دهند.



شکل (۱۲): اثر زاویه نصب بر میزان پایداری یاتاقان غیرمدور سه‌لب.



شکل (۱۳): اثر زاویه انحراف بر میزان پایداری یاتاقان غیرمدور سه‌لب.



شکل (۱۴): نمودار خطای نمونه شبکه با ساختار (۱۰-۱۰-۱)، بر اساس نمونه‌های ورودی اعمال شده.

شکل‌های ۱۰-۱۱ نتایج زاویه انحراف در مورد میزان اتلاف انرژی و مقدار زاویه مشخصه یاتاقان غیرمدور سه‌لب را نشان می‌دهند. از شکل ۱۰ کاهش نسبی در میزان اتلاف انرژی یاتاقان، با افزایش در مقدار زاویه انحراف آن مشاهده می‌شود. از بررسی نتایج شکل ۱۱ نیز دیده می‌شود که با افزایش در مقدار زاویه انحراف یاتاقان، مقدار زاویه مشخصه سیستم کاهش می‌یابد. نتایج فوق نشان‌دهنده بهبود در عمل‌کرد یاتاقان سه‌لب یا افزایش زاویه انحراف می‌باشند. در اثر زیاد شدن زاویه انحراف، خط‌المركزین یاتاقان و لب به امتداد بار وارده (y) نزدیک‌تر شده و باعث بهبود در عمل‌کرد یاتاقان می‌شود [۱۷].

۲-۴- بررسی نتایج مربوط به مشخصه‌های دینامیکی

شکل‌های ۱۲-۱۳ اثرات زوایای نصب و انحراف را بر میزان پایداری یاتاقان سه‌لب، نشان می‌دهند. نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهند که فقط در زوایای نصب کم، تغییرات جزئی در جرم بحرانی ایجاد می‌شود و زوایای نصب نسبتاً زیاد در تمام اعداد تراکم‌پذیری تأثیری بر مقدار جرم بحرانی نخواهند داشت. علت تأثیر کم زاویه نصب بر عمل‌کرد دینامیکی یاتاقان سه‌لب، همان‌طور که در بخش بررسی نتایج مربوط به مشخصه‌های استاتیکی (۱-۴) اشاره گردید، می‌تواند نزدیک بودن شکل هندسی یاتاقان سه‌لب به یاتاقان مدور باشد.

از نتایج اثر زاویه انحراف بر مقدار جرم بحرانی (شکل ۱۳) دیده می‌شود که در زوایای انحراف کم، در تمام اعداد تراکم‌پذیری، مقدار جرم بحرانی ثابت باقی‌مانده ولی با افزایش زاویه انحراف مقدار جرم بحرانی نیز افزایش یافته که این تأثیر در اعداد تراکم‌پذیری بالا بیشتر محسوس می‌باشد. علت این امر هم همان‌طور که قبلاً در بخش ۴-۱ توضیح داده شد، این است که با افزایش زاویه انحراف، خط‌المركزین یاتاقان و لب به امتداد بار وارده (y) نزدیک‌تر شده و باعث بهبود عمل‌کرد یاتاقان می‌شود [۱۷]. روند نتایج حاضر با نتایج گزارش شده در مرجع فوق هم‌خوانی خوبی دارند.

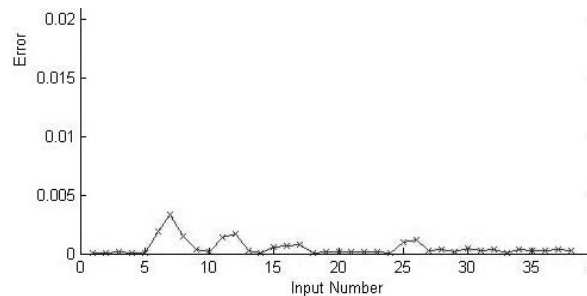
۵- نتیجه گیری

تحلیل یاتاقان‌های گازی به علت تراکم‌پذیر بودن روان کار (گاز) کار آسانی نمی‌باشد. بنا بر این در کار حاضر از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت بررسی عمل کرد یاتاقان‌های گازی غیرمدور سلب تحت تأثیر پارامترهایی از قبیل عدد تراکم‌پذیری، زاویه نصب و زاویه انحراف استفاده شده است. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- با انتخاب مناسب پارامترهای عدد تراکم‌پذیری، زاویه نصب و زاویه انحراف می‌توان به عمل کرد استاتیکی و دینامیکی بهینه‌ای برای یاتاقان گازی غیرمدور سلب دست یافت،
- ۲- تغییرات مناسب در مقادیر زوایای نصب و انحراف، موجب افزایش پایداری سیستم یاتاقان‌ها می‌شود،
- ۳- نتایج مشاهده می‌دهند که عدد تراکم‌پذیری، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نحوه عمل کرد یاتاقان‌های گازی دارد و
- ۴- با توجه به وارد شدن پارامتر زمان در حل معادلات یاتاقان‌های گازی و تراکم‌پذیری بالای گازها که منجر به دشواری مضاعف محاسباتی می‌شود، استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برای دستیابی به پاسخ مطلوب پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

1. Rahmatabadi, A.D. and Rashidi, R. "Investigation of Preload Effects on Non-circular 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., Vol. 9, No. 2, 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., Vol. 22, pp. 373-388, 1919.
4. Pinkus, O. "Analysis of Noncircular Gas Journal Bearings", J. Lub. Technol, Vol. 97, pp.616-623, 1975.
5. Chandra, M., Malik, M., and Sinhasan, R. "Gas Bearing Analysis and Solution Method, Part I: Dynamics", Wear, Vol. 88, No. 3, pp. 255-268, 1983.



شکل (۱۵): نمودار خطای نمونه شبکه با ساختار (۱-۷-۸)، بر اساس نمونه‌های ورودی اعمال شده.

شکل‌های ۱۴-۱۵ نمودار میزان خطای شبکه بر اساس نمونه‌های ورودی اعمال شده، برای نمونه ساختارهای متنوع طراحی شده شبکه، برای پیش‌بینی زاویه مشخصه، ظرفیت تحمل بار، اتلاف انرژی و میزان پایداری سیستم یاتاقان را تحت تأثیر پارامترهای عدد تراکم‌پذیری، نسبت خارج از مرکزی، زاویه نصب و زاویه انحراف یاتاقان، نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است خطا برای نمونه ساختارهای استفاده شده در شبکه، بسیار ناچیز است که حاکی از طراحی مطلوب و بهینه ساختارهای شبکه و عمل کرد قابل قبول برنامه‌های رایانه‌ای نوشته شده، می‌باشد. نتایج مربوط به میانگین خطا و مدت زمان اجرای برنامه با پردازنده 3500 Am2, RAM 512، برای ساختارهای به کار رفته در شبکه، در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود خطای شبکه‌های طراحی شده بسیار ناچیز و میانگین مدت زمان اجرای برنامه نیز در مقایسه با سایر روش‌های عددی، مطلوب است که از مزایای این روش محسوب می‌گردد.

جدول (۳): نتایج میزان خطا و مدت زمان اجرای برنامه برای ساختارهای مختلف شبکه.

ساختار شبکه	زمان اجرا	میانگین خطا
۱۹-۱۸-۱	۳/۱ ثانیه	۰/۰۰۳۴
۱۲-۱۱-۱	۱/۹ ثانیه	۹/۷۹۷۲ e-۰۰۴
۱۰-۱۰-۱	۳/۹ ثانیه	۹/۷۹۹۷ e-۰۰۴
۱۰-۹-۱	۲/۲ ثانیه	۰/۰۰۲۵
۸-۷-۱	۱/۵ ثانیه	۵/۰۹۳۹ e-۰۰۴

6. Chandra, M., Malik, M., and Sinhasan, R. "Comparative Study of Four Gas- Lubricated Non-circular Journal Bearing Configuration", *Tribology Int.*, 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 Int.*, Vol. 30, No. 2, pp. 139-150, 1997.
8. Kang, Y. and Engineering Group "Stiffness Determination of Angular-Contact Ball Bearing, Using Neural Network", *Tribology Int.*, Vol. 39, No. 6, pp. 1-9, 2005.
9. Menhaj, M.B. "Fundamentals of Neural Networks", *Computational Intelligence*, Tehran, Iran, 2000.
10. Chandra, M., Malik, M., and Sinhasan, R. "On the Dynamic Behavior of Two Gas-Lubricated Two-lob Journal Bearing Configurations", *ASLE Transactions*, Vol. 26, No. 3, pp. 411-414, 1983.
11. Rohde, S.M. and Oh, K.P. "Higher Order Finite Element Methods for the Solution of Compressible Porous Bearing Problems", *J. Lubr., Trans. ASME*, Vol. 9, No. 4, pp. 793-803, 1968.
12. Raimondi, A.A. "A Numerical Solution for the Gas Lubricated Full Journal Bearing of Finite Length", *ASLE Trans.*, Vol. 4, No. 1, pp. 131-155, 1961.
13. Reddy, J. "An Introduction to the Finite Element Method", McGraw Hill, New York, U.S.A, 1984.
14. Frence, J., Nicolas, D., Degueurce, B., Berthe, D., and Gode, M. "Hydrodynamic Lubrication: Bearing and Thrust Bearing", Elsevier, Amsterdam, 1997.
۱۵. شنبه، م. "استفاده از الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی خصوصیات کششی نخ‌های مغزی‌دار با مغزی نایلون و رویه پنبه"، استقلال، جلد ۲۴، شماره ۲، اسفند ۱۳۸۴.
16. Gurney, K., "An Introduction to Neural Networks", UCL Press, London, 1997 .
17. Malik, M., Chandra, M., and Sinhasan, R., "Performance Characteristics of Tilted Three-lobe Journal Bearing Configurations", *Tribology Int.*, Vol. 14, No. 2, pp. 345-349, 1981.