



آنالیز انتشار عیب برای یک سیستم شامل الکتروموتور القایی و پمپ گریز از مرکز

حامد صادقی¹، جواد پشتمان^{2*}، مصطفی مطلوبی³

1- دانشجوی دکترا، مهندسی برق-کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استاد، مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846، jposhtan@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 شهریور 1396

پذیرش: 04 آذر 1396

ارائه در سایت: 01 دی 1396

کلید واژگان:

آنالیز انتشار عیب

موتور القایی

پمپ گریز از مرکز

تشخیص عیب

روش مبتنی بر سیگنال

چکیده

آنالیز انتشار عیب، روشی مبتنی بر نظریه گراف برای مطالعه نحوه انتشار اثرات عیوب و اغتشاش ها در اجزا سیستم است. در نظر گرفتن نحوه انتشار و تداخل اثرات عیوب و اغتشاش ها در طراحی الگوریتم های تشخیص عیب و سیستم های پایش وضعیت سبب افزایش قابلیت اطمینان و کاهش خطاهای اشتباه می گردد. در این مقاله برای یک سیستم شامل الکتروموتور القایی و پمپ گریز از مرکز با استفاده از آنالیز مدهای خرابی و اثرات، عیوب و اغتشاش های محتمل برای هر یک از بخش های سیستم موتور و پمپ تعیین گردیده اند، سپس با استفاده از آنالیز انتشار عیب مدلی منطقی برای توصیف ارتباط بین بخش های مختلف و نیز نحوه انتشار اثرات الکتریکی، ارتعاشی و فرآیندی عیوب و اغتشاش های محتمل به دست آمده است. با استفاده از این مدل می توان در طراحی روش های تشخیص عیب تداخل اثرات اغتشاش و عیب را در نظر گرفت و در نتیجه اثرات مناسب یا به عبارت دیگر ساختار سنسورهای لازم برای تشخیص مقاوم عیوب را تعیین نمود. در این مقاله پس از انجام آنالیز انتشار عیب از یک سیستم آزمایشگاهی به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده استفاده شده است.

Fault propagation analysis for an induction motor- centrifugal pump system

Hamed Sadeghi¹, Javad Poshtan^{1*}, Mostafa Matloobi²

1- Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846 Tehran, Iran, jposhtan@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 21 September 2017

Accepted 25 November 2017

Available Online 22 December 2017

Keywords:

Fault propagation analysis

Induction motor

Centrifugal pump

Fault detection

Signal Based

ABSTRACT

Fault propagation analysis is a method based on graph theory used to study the propagation of the effects of faults and disturbances in the system parts. The inclusion of fault propagation and interference of fault and disturbance effects in the design of fault detection algorithms increases reliability and reduces false alarms in critical equipment. In this paper the failure mode and effects analysis (FMEA) method was used to prepare a list of the possible faults and disturbances of each part of a system including of an induction motor and a centrifugal pump. Then a logical model is obtained through the fault propagation analysis to explain the connection between different parts of this system and the propagation of the electrical, vibrational and process effects. This model can be used to consider the propagation of the effects of faults and disturbances in system parts, and the interference of these effects and to select the appropriate effects or sensor configurations required for robust fault detection. The concept of this method is illustrated in this paper by applying this technique to an experimental system.

1- مقدمه

اندازه گیری شده تعیین و الگوریتم های مبتنی بر سیگنال برای تشخیص آن اثر طراحی شده است، اما در عمل برای پیاده سازی این روش ها در قالب یک سیستم جامع تشخیص عیب که قابلیت جداسازی مجموعه کاملی از عیوب محتمل را داشته باشد، چالش بزرگی وجود دارد که کمتر مورد توجه قرار گرفته و آن مسأله انتشار اثر عیوب در اجزای مختلف سیستم و نیز تداخل اثرات مشابه عیوب و اغتشاش هاست. به عبارت دیگر ممکن است اثرات انتخاب شده برای یک عیب خاص مشابه اثرات انتشار یافته عیوب و اغتشاش های بخش های دیگر سیستم باشند و این موضوع باید در طراحی یک سیستم جامع تشخیص عیب مورد مطالعه قرار گیرد. تاکنون روش های مختلفی برای آنالیز انتشار اثرات عیب به ویژه در

پمپ های گریز از مرکز و موتورهای القایی که آن ها را به حرکت در می آورند از مهم ترین تجهیزات مورد استفاده در بسیاری از صنایع هستند. خرابی این تجهیزات و توقف های پیش بینی نشده موجب توقف تولید، اختلال در فرآیندهای صنعتی و تحمیل خسارات های مالی سنگین می گردد. به همین دلیل در دهه های گذشته طراحی سیستم های پایش وضعیت و تشخیص هنگام عیب برای این تجهیزات هدف تحقیقات زیادی بوده و روش های متنوعی برای تشخیص عیوب محتمل در اجزا موتور القایی و پمپ گریز از مرکز ارائه شده است. در بسیاری از این تحقیقات با هدف طراحی روشی برای تشخیص یکی از عیوب محتمل، اثرات و مشخصه هایی خاص در سیگنال های

Please cite this article using:

H. Sadeghi, J. Poshtan, M. Matloobi, Fault propagation analysis for an induction motor- centrifugal pump system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 485-494, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

منطقی نحوه انتشار این اثرات را توجیه کرد. (برای مثال تشخیص برخی از عیوب الکتریکی موتور با استفاده از اثرات ارتعاشی بخش مکانیکی)، همچنین با استفاد از این روش می‌توان در طراحی الگوریتم‌های تشخیص برای یک عیب خاص اثرات مشابه عیوب و اغتشاش دیگر سیستم را در نظر گرفت و در نهایت با در نظر گرفتن تداخل بین اثرات اغتشاش و عیب مجموعه‌ای از اثرات مناسب برای تشخیص مقاوم عیب مورد نظر را تعیین کرد.

2- آنالیز مدهای خرابی و اثرات برای سیستم موتور-پمپ

گام نخست برای انجام آنالیز مدهای خرابی و اثرات شناسایی اجزا سیستم است. برای این منظور از مدل ساختار فیزیکی استفاده شده است. مدل ساختار فیزیکی موتور و پمپ در شکل 1 نشان داده شده است.

در این مدل ساختار فیزیکی موتور به دو بخش الکتریکی و مکانیکی و پمپ نیز به دو بخش هیدرولیکی و مکانیکی تقسیم شده است. در بخش هیدرولیکی انرژی مکانیکی به انرژی هیدرولیکی سیال تبدیل می‌شود، همچنین بخش شفت که شامل قسمت‌های اتصال‌دهنده موتور به پمپ و بخش ورودی شامل اتصالات و فیلترهای نصب شده پیش از پمپ است.

در بخش دینامیک مکانیکی، دینامیک حرکت سیستم و سرعت چرخش براساس گشتاور تولیدی، گشتاور بار، گشتاور مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک و ممان اینرسی سیستم تعیین می‌شود.

در آنالیز مدهای خرابی و اثرات برای هر بخش مجموعه‌ای از عیوب و اغتشاش‌ها به همراه علت وقوع و اثراتی که در آن بخش ایجاد می‌کنند تهیه می‌شود. پس از شناسایی عیوب و اغتشاش‌های هر بخش و نیز انتخاب اثرات رابطه بین عیوب و اثرات را می‌توان به صورت ریاضی با ماتریس ارتباط‌دهنده عیب با اثر A_{fi}^i برای هر بخش مطابق رابطه (1) در فضای بولین نشان داد.

$$A_{fi}^i: F \times E \rightarrow \{0,1\} \quad (1-a)$$

$$A_{fi}^i(k,j) = \begin{cases} 1 & \text{if } f_{ij} = 1 \rightarrow e_{ik} = 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1-b)$$

در این رابطه f_{ij} ، j -امین عیب در بردار عیوب بخش i -ام ($f_i \in F$) و e_{ik} ، k -امین اثر در بردار اثرات مربوط به آن ($e_i \in E$) است. به عبارت دیگر در صورت ایجاد یک اثر هنگام وقوع یک عیب، عنصر متناظر با آن در ماتریس ارتباط‌دهنده عیب با اثر برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است. پس از انجام آنالیز مدهای خرابی و اثرات برای هر بخش و تعیین عیوب، اغتشاش‌ها و اثرات مناسب برای هر بخش به منظور مدل‌سازی ارتباط بین بخش‌های مختلف، ماتریس‌های انتشار اثر برای هر بخش محاسبه می‌گردد. به عبارت دیگر در هر بخش سیستم علاوه بر عیوب مربوط به همان بخش، اثرات سایر بخش‌ها نیز بر آن بخش تأثیر می‌گذارند که این ارتباط را می‌توان به صورت ریاضی به شکل رابطه (2) نمایش داد. در این رابطه برای سیستمی شامل n بخش، ارتباط بین اثرات بخش i -ام با عیوب همان بخش و اثرات سایر بخش‌ها به صورت رابطه (2) تعریف می‌شود.

$$e_i = A_{fi}^i \cdot f_i + \sum_{j=1}^{i-1} A_{fj}^i \cdot e_j + \sum_{j=i+1}^n A_{fj}^i \cdot e_j \quad (2)$$

در این رابطه (+) نشان‌دهنده عملگر اجتماع بردارها و (.) بیانگر عملگر اشتراک بردارها و A_{fi}^i ماتریس انتشار از بخش i به بخش j است. در ادامه نتایج آنالیز مدهای خرابی و اثرات شامل محاسبه ماتریس‌های ارتباط‌دهنده عیب و اثر و ماتریس‌های انتشار اثر برای هر یک از بخش‌های سیستم موتور-پمپ ارائه شده است.

سیستم‌های ابعاد بزرگ پیشنهاد شده است. روش‌هایی نظیر آنالیز درخت خطا¹، آنالیز درخت حوادث² و بلوک دیاگرام قابلیت اطمینان³ از رایج‌ترین این روش‌هاست. در مرجع [1] از آنالیز درخت خطا برای توضیح اختلاف بین خروجی و مقادیر مورد انتظار در شرایط نرمال استفاده شده و روشی برای تشخیص عیب پیشنهاد شده است، همچنین در مرجع [2] با استفاده از تئوری گراف‌ها روشی برای مسأله انتشار اثرات عیب پیشنهاد شده است. در این گراف گره‌ها نشان‌دهنده اجزا مختلف سیستم و یال‌ها نشان‌دهنده ارتباط بین این اجزاست. در این مرجع دو روش مختلف برای تعیین لیست کاندیدهای احتمالی عیوب براساس اثرات انتشار یافته آن‌ها پیشنهاد و این دو روش با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در مرجع [3] از روش نمایش گرافی برای مسأله چند عیب هم‌زمان استفاده شده و با توجه به این‌که پیچیدگی محاسبات با افزایش تعداد عیوب هم‌زمان به صورت نمایی افزایش می‌یابد به منظور کاهش حجم محاسبات روشی وراثتی ارائه شده است.

از دیگر روش‌های آنالیز انتشار عیب می‌توان به روش گراف هدایت‌گر علامت‌دار⁴ اشاره کرد که در مرجع [4] برای نشان دادن ارتباط علت و اثر آن‌ها در متغیرهای یک فرآیند شیمیایی ارائه شده است. این روش در مرجع [5] توسعه یافته و با تبدیل مدل تک لایه به یک مدل سلسله مراتبی، روشی برای اصلاح روش جستجو به ویژه در سیستم‌های مقیاس بزرگ ارائه گردیده است.

استفاده از روش‌های آنالیز انتشار عیب نه تنها در سیستم‌های مقیاس بزرگ، بلکه برای تشخیص عیب در یک تجهیز که شامل بخش‌های مختلف است نیز استفاده شده است. برای مثال در مرجع [6] آنالیز انتشار عیب به عنوان یک ابزار تحلیلی و بخشی از یک روش سیستماتیک برای طراحی سیستم تشخیص و جداسازی عیوب پیشنهاد و در مرجع [7] با استفاده از این آنالیز روشی برای تحلیل مقاوم بودن روش‌های تشخیص عیب مبتنی بر سیگنال در یک سیستم شامل موتور و پمپ ارائه شده است. در مرجع [7] با توجه به سنسورهای مورد استفاده که شامل سنسورهای جریان و ولتاژ موتور و فلو و فشار پمپ بودند، تنها اثرات قابل اندازه‌گیری توسط این سنسورها در آنالیز در نظر گرفته شده و مدل منطقی به دست آمده از آنالیز انتشار عیب تنها نحوه انتشار این اثرات را توصیف می‌کند. در این مقاله علاوه بر اثرات الکتریکی و فرآیندی، آنالیز انتشار عیب با در نظر گرفتن اثرات ارتعاشی که رایج‌ترین اثرات مورد استفاده در طراحی الگوریتم‌های تشخیص عیب در ماشین‌آلات دوار هستند انجام گرفته و مدل به دست آمده به منظور توصیف نحوه انتشار این اثرات توسعه یافته است.

برای این هدف در این مقاله ابتدا با استفاده از آنالیز مدهای خرابی و اثرات⁵، عیوب و اغتشاش‌های محتمل برای هر یک از بخش‌های سیستم موتور و پمپ تعیین شده است. نتیجه این آنالیز شامل لیستی از عیوب و اغتشاش‌های هر بخش و نیز اثرات و مشخصه‌های قابل اندازه‌گیری در همان بخش سیستم است. در مرحله بعد با استفاده از آنالیز انتشار عیب که شامل تعیین ماتریس‌های انتشار عیب است، مدلی منطقی از ارتباط بین اجزا سیستم و نحوه انتشار اثرات ناشی از عیب یک بخش در بخش‌های دیگر سیستم به دست آمده است. با استفاده از این مدل می‌توان روش‌هایی را که تشخیص عیب در یک بخش سیستم را با استفاده از اثرات قابل اندازه‌گیری در بخش‌های دیگر سیستم انجام می‌دهند را مورد مطالعه قرار داد و به طور

¹ Fault tree analysis

² Event tree analysis

³ Reliability block diagram

⁴ Signed direct graph

⁵ Failure mode and effect analysis

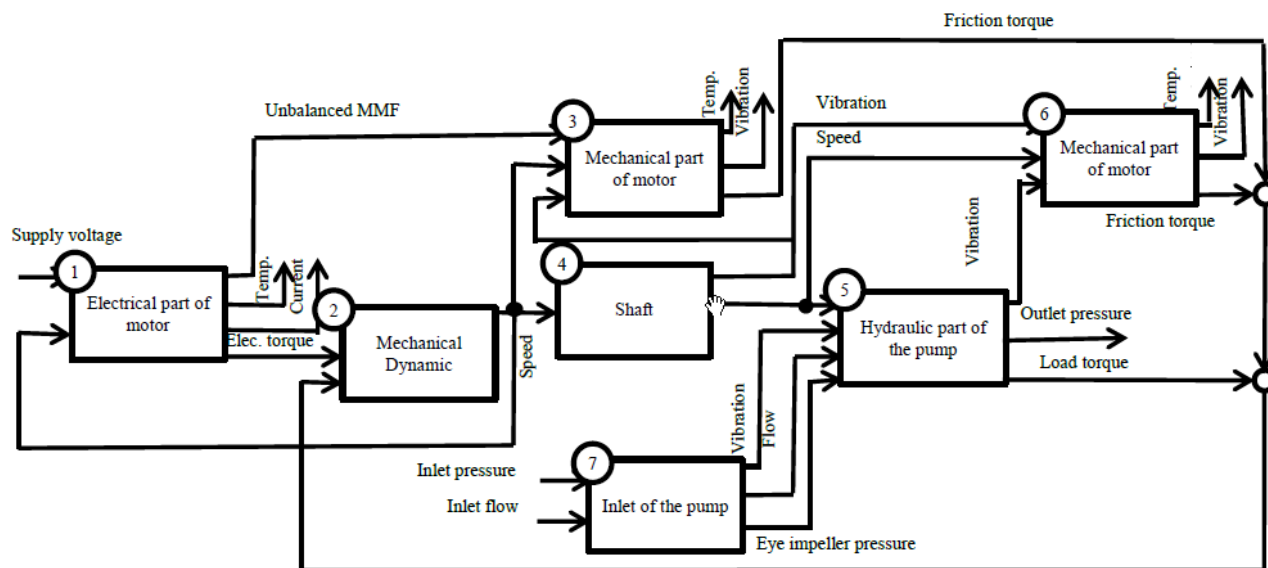


Fig. 1 The physical structure of motor-pump system

شکل 1 ساختار فیزیکی سیستم الکتروموتور و پمپ

و مقدار i_Q بر محور y دستگاه مختصات رسم شوند، شکل حاصل یک دایره به مرکز صفر و شعاع $\sqrt{6}/2i_+$ (قدرمطلق بردار پارک) خواهد بود. در شرایط وقوع عیب رابطه (4) صادق نبوده و شکل حاصل به صورت دایره کامل نخواهد بود. در آنالیز تبدیل پارک از تغییرات شکل حاصل عیوب مختلف تشخیص داده می‌شوند. در آنالیز توسعه یافته پارک با استفاده از تبدیل فوری سیگنال قدرمطلق بردار پارک و تحلیل فرکانسی آن عیوب مختلف تشخیص داده می‌شود. برای مثال از هارمونیک‌های این سیگنال برای تشخیص عیوبی شامل اتصال کوتاه سیم پیچ [8]، شکستگی میله روتور [9]، ناهم مرکزی [10] و عیب یاتاقان [11] استفاده شده است. جامع بودن این روش برای تشخیص مجموعه‌ای از عیوب الکتریکی موتور از مزایای این روش نسبت به سایر روش‌هاست که موجب کاهش حجم محاسبات و امکان پیاده‌سازی بر خط سیستم تشخیص عیب می‌گردد، همچنین با توجه به در نظر گرفتن سیگنال جریان هر سه فاز و امکان بررسی متعادل بودن آن‌ها در روش تبدیل پارک نسبت به تحلیل فرکانسی سیگنال جریان تنها یک فاز، روش تبدیل پارک امکان آنالیز دقیق‌تری را فراهم می‌آورد.

بردار عیوب و اغتشاش‌های انتخاب شده برای این بخش شامل عیوب تک‌فاز شدن f_{em1} اتصال کوتاه سیم پیچ استاتور f_{em2} شکستگی میله روتور f_{em3} و اغتشاش‌های عدم تعادل ولتاژ تغذیه d_{em1} افزایش دامنه ولتاژ تغذیه d_{em2} و کاهش دامنه ولتاژ تغذیه d_{em3} است که بردار عیب رابطه (5-a) را تشکیل می‌دهند. با توجه به خروجی‌های این بخش و نیز نتایج تحقیقات انجام شده برای تشخیص عیوب الکتریکی موتور القایی اثرات جدول 1 برای این بخش انتخاب شده است.

اثرات این جدول، بردار اثرات بخش 1 در رابطه (5-b) را تشکیل می‌دهند.

$$f_1 = [f_{em1} \ f_{em2} \ f_{em3} \ d_{em1} \ d_{em2} \ d_{em3}]^T \quad (5-a)$$

$$e_1 = [e_{em1} \ e_{em2} \ \dots \ e_{em14}]^T \quad (5-b)$$

با استفاده از رابطه (1) و ارتباط بین اثرات انتخاب شده با عیوب و اغتشاش‌های این بخش ماتریس ارتباط‌دهنده عیب با اثر این بخش به صورت ماتریس A_{f1}^1 در رابطه (6) نشان داده شده است. مطابق رابطه (1) هر ستون این ماتریس مربوط به یک عیب و هر سطر ماتریس مربوط به یک اثر است.

2-1- بخش الکتریکی موتور

انرژی الکتریکی در بخش الکتریکی موتور به نیروی محرکه مغناطیسی تبدیل می‌شود. اجزای فیزیکی این بخش شامل استاتور و روتور است. همان گونه که در شکل 1 نمایش داده شده ورودی‌های این بخش شامل ولتاژ منبع تغذیه و سرعت گردش و خروجی‌های آن شامل جریان استاتور، نیروی محرکه مغناطیسی و دماست. در صورتی که نیروی محرکه مغناطیسی وارده به میله‌های روتور به صورت متعادل باشد گشتاور الکتریکی تولید می‌شود، اما در صورتی که بخشی از این نیروها به دلیل ایجاد عیوبی نظیر شکستگی میله روتور یا به هم خوردن فاصله هوایی بین استاتور و روتور نامتعادل گردد، آن‌گاه به صورت ارتعاش در بخش مکانیکی موتور ظاهر می‌شود و به این دلیل عیوب الکتریکی موتور می‌توانند سبب ایجاد اثراتی در سیگنال ارتعاش شوند. از سیگنال جریان موتور نیز می‌توان برای تشخیص عیوب این بخش و سایر بخش‌ها (به دلیل انتشار اثرات) استفاده کرد. روش‌های مختلفی برای تشخیص عیوب با آنالیز سیگنال جریان استاتور پیشنهاد شده‌اند. در این تحقیق از میان این روش‌ها روش بردار پارک توسعه یافته انتخاب شده است. در این روش ابتدا با استفاده از مؤلفه‌های جریان هر سه فاز موتور (i_a, i_b, i_c) و تبدیل پارک، مؤلفه‌های بردار پارک (i_D, i_Q) مطابق رابطه (3) محاسبه می‌شوند [8].

$$i_D = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \sqrt{\frac{1}{6}}i_b - \sqrt{\frac{1}{6}}i_c \quad (3-a)$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{1}{2}}i_b - \sqrt{\frac{1}{2}}i_c \quad (3-b)$$

در شرایط ایده‌آل و بدون عیب هنگامی که هر سه جریان موتور متعادل باشند مؤلفه‌های بردار پارک را می‌توان به صورت روابط (4) نیز محاسبه کرد.

$$i_D = \frac{\sqrt{6}}{2}i_+ \sin(\omega t) \quad (4-a)$$

$$i_Q = \frac{\sqrt{6}}{2}i_+ \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4-b)$$

در رابطه بالا i_+ مقدار بیشینه دنباله مثبت و ω فرکانس زاویه‌ای منبع تغذیه است. با توجه به روابط (4) اگر در هر لحظه از زمان مقدار i_D بر محور x

جدول 1 اثرات انتخاب شده برای بخش الکتریکی موتور

Table 1 the effects have been selected in electrical part of motor

ردیف	نام	توضیحات
1	e_{em1}	افزایش دامنه جریان استاتور
2	e_{em2}	کاهش دامنه جریان استاتور
3	e_{em3}	افزایش دامنه هارمونیک 2 برابر فرکانس منبع تغذیه در طیف قدرمطلق بردار پارک جریان استاتور
4	e_{em4}	افزایش دامنه هارمونیک 2 برابر فرکانس لغزش در طیف قدرمطلق بردار پارک جریان استاتور
5	e_{em5}	افزایش دامنه هارمونیک 2 برابر فرکانس دور در طیف قدرمطلق بردار پارک جریان استاتور
6	e_{em6}	تغییر در دامنه ولتاژ حداقل در یک فاز
7	e_{em7}	افزایش دامنه هارمونیک‌های فرکانس بالا در طیف قدرمطلق بردار پارک ولتاژ
8	e_{em8}	نیروی محرکه مغناطیسی نامتعادل استاتیک در فاصله هوایی بین روتور و استاتور
9	e_{em9}	نیروی محرکه مغناطیسی نامتعادل دینامیک در فاصله هوایی بین روتور و استاتور
10	e_{em10}	افزایش دمای سیم‌پیچ استاتور
11	e_{em11}	افزایش گشتاور موتور
12	e_{em12}	کاهش گشتاور موتور
13	e_{em13}	نوسان دامنه هارمونیک فرکانس دور در طیف گشتاور
14	e_{em14}	نوسان دامنه هارمونیک‌های فرکانس بالا در طیف گشتاور

2-2- دینامیک بخش مکانیکی

با توجه به قانون دوم نیوتن دینامیک حرکت و سرعت چرخش شفت با توجه به گشتاورهای وارد شده به آن مطابق رابطه (8) تعیین می‌شود.

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_F - T_l \quad (8)$$

در این رابطه ω_r سرعت چرخش، J_m ممان اینرسی، T_e گشتاور تولیدی موتور در بخش الکتریکی، T_l گشتاور بار برای به حرکت در آوردن سیال در بخش هیدرولیک پمپ و T_F گشتاور مربوط به تلفات اصطکاک در یاتاقان‌ها و نشت‌بندهای بخش‌های مکانیکی پمپ و موتور و شفت است. این بخش فاقد اجزا فیزیکی است؛ بنابراین فاقد عیب و اغتشاش است. اثرات انتخاب شده برای این بخش در جدول 2 آورده شده است.

اثرات انتخاب شده بردار اثر این بخش را مطابق رابطه (9) تشکیل می‌دهند.

$$e_2 = [e_{dy1} \ e_{dy2} \ e_{dy3} \ e_{dy4}]^T \quad (9)$$

با توجه به شکل 1 گشتاور الکتریکی تولید شده در بخش الکتریکی موتور، گشتاور بار بخش هیدرولیک پمپ و گشتاور اصطکاک مربوط به بخش‌های شفت، مکانیکی موتور و مکانیکی پمپ بر اثرات انتخاب شده در این بخش تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین می‌توان اثرات خروجی بخش دینامیک مکانیکی را با استفاده از تعریف ارائه شده در رابطه (2) به شکل رابطه (10) نشان داد.

$$e_2 = A_1^2 \cdot e_1 + A_3^2 \cdot e_3 + A_4^2 \cdot e_4 + A_5^2 \cdot e_5 + A_6^2 \cdot e_6 \quad (10)$$

ماتریس‌های انتشار اثر محاسبه شده این بخش در رابطه (11) نشان داده شده است.

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_4^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_5^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_6^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2-3- بخش مکانیکی موتور القایی

این بخش شامل ساختار مکانیکی موتور القایی یعنی روتور و استاتور بدون در نظر گرفتن مدارات الکتریکی و مغناطیسی و به عنوان یک جرم در حال چرخش در داخل یک قاب و نیز دو یاتاقان در دو طرف روتور (که وظیفه نگهداشتن و کاهش اصطکاک این جرم در حال چرخش را برعهده دارند)

جدول 2 اثرات انتخاب شده برای بخش دینامیک مکانیکی

Table 2 the effects have been selected in mechanical dynamic part

ردیف	نام	توضیحات
1	e_{dy1}	افزایش سرعت گردش موتور
2	e_{dy2}	کاهش سرعت گردش موتور
3	e_{dy3}	نوسان دامنه هارمونیک فرکانس برابر دور در طیف سرعت
4	e_{dy4}	نوسان دامنه هارمونیک‌های فرکانس بالا در طیف سرعت

$$A_{f_1}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

برای مثال عدد یک در درایه سطر اول و ستون اول به این معنی است که در صورت وقوع عیب اول یعنی تک‌فاز شدن یا قطع یکی از فازهای موتور اثر اول ایجاد می‌شود و دامنه جریان در فازهای دیگر استاتور افزایش می‌یابد. با توجه به شکل 1 اثرات بخش دینامیک مکانیکی بر بخش الکتریکی موتور اثرگذارند؛ بنابراین می‌توان اثرات خروجی بخش الکتریکی را با استفاده از رابطه (2) به شکل رابطه (7) نشان داد.

$$e_1 = A_{f_1}^1 \cdot f_1 + A_2^1 \cdot e_2 \quad (7)$$

که در این رابطه ماتریس A_2^1 ماتریس انتشار اثر بخش دوم به بخش اول است که با توجه به ارتباط اثرات بخش 2 (جدول 2) با اثرات بخش 1، ماتریس A_2^1 محاسبه و در رابطه (7) ارائه شده است. در این ماتریس هر سطر مربوط به یک اثر بخش اول و هر ستون مربوط به یک اثر بخش دوم است. برای مثال عدد یک در درایه سطر اول و ستون دوم ماتریس به این معنی است که اثر دوم بخش دوم یعنی کاهش سرعت موتور سبب اثر اول بخش اول یعنی افزایش دامنه جریان استاتور می‌شود و به این ترتیب نحوه انتشار اثرات بخش دوم به بخش اول نشان داده شده است.

2-4- بخش شفت

این بخش شامل شفت موتور، شفت پمپ و اتصال کوپلینگ و وظیفه آن انتقال نیرو از موتور به پمپ و چرخش پروانه پمپ است. مهم‌ترین عیبی که در این بخش اتفاق می‌افتد مربوط به ناهم‌راستایی شفت موتور با شفت پمپ است که به دلیل عدم تنظیم صحیح کوپلینگ و یا تنش‌های حرارتی اتفاق می‌افتد. ارتعاش این بخش را می‌توان به وسیله سنسورهای غیرتماسی اندازه‌گیری کرد، همچنین به دلیل تماس شفت با بیرینگ‌های بخش مکانیکی موتور و بخش مکانیکی پمپ، ارتعاش به این بخش‌ها نیز انتشار یافته و توسط سنسورهای شتاب سنج تماسی نصب شده بر محفظه یاتاقان نیز قابل اندازه‌گیری است. عیوب انتخاب شده در این بخش شامل ناهم‌راستایی موازی f_{sh1} ، ناهم‌راستایی زاویه‌ای f_{sh2} و خم‌شدگی شفت f_{sh3} است که بردار عیب این بخش را به شکل رابطه (15) تشکیل می‌دهند و با توجه به خروجی‌ها اثرات انتخاب شده در این بخش در جدول 4 نمایش داده شده‌اند که بردار اثرات این بخش را در رابطه (15) تشکیل می‌دهند.

$$f_4 = [f_{sh1} \ f_{sh2} \ f_{sh3}]^T \quad (15-a)$$

$$e_4 = [e_{sh1} \ e_{sh2} \ \dots \ e_{sh8}]^T \quad (15-b)$$

با توجه به اتصال این بخش به بخش دینامیک مکانیکی رابطه اثرات این بخش با عیوب و نیز اثرات بخش 2 را می‌توان به شکل رابطه (16) نشان داد.

$$e_4 = A_{f_4}^4 \cdot f_4 + A_{e_2}^4 \cdot e_2 \quad (16)$$

در رابطه (16) ماتریس ارتباط‌دهنده عیب و اثر این بخش و ماتریس‌های انتشار اثر بخش 2 محاسبه و در رابطه (17) نشان داده شده‌اند.

$$A_{f_4}^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad A_{e_2}^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2-5- بخش هیدرولیک پمپ گریز از مرکز

بخش هیدرولیک پمپ شامل پروانه، تیغه‌های هدایت‌کننده¹ و مسیرهای ورودی و خروجی است. حرکت پروانه سبب گردش سیال شده که این انرژی جنبشی در تیغه‌های هدایت‌کننده به فشار استاتیکی تبدیل شده و سبب انتقال سیال در طول مسیر لوله‌ها می‌شود. عیوب شناسایی شده در این بخش شامل خشک کار کردن پمپ f_{i1} بالانس نبودن پروانه f_{i2} ، فرسایش پروانه f_{i3}

است. نیروی محرکه مغناطیسی متعادل تولید شده در بخش اول در بخش دوم سبب گردش روتور شده و سرعت چرخش به عنوان ورودی بخش مکانیکی در نظر گرفته شده است. بخش نامتعادل نیروی محرکه مغناطیسی به طور مستقیم سبب ایجاد ارتعاش در این بخش می‌گردد. ارتعاشات ایجاد شده در شفت با توجه به ارتباط فیزیکی این بخش با شفت (برای مثال به دلیل ناهم‌راستایی کوپلینگ) به دلیل تماس فیزیکی به این بخش انتقال داده می‌شوند. خروجی‌های این بخش شامل ارتعاش، دمای یاتاقان‌ها و گشتاور مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک است. عیوب شناسایی شده شامل عیوب مربوط به یاتاقان‌ها f_{mm1} و عدم تعادل روتور f_{mm2} هستند که بردار عیب رابطه (12) را تشکیل می‌دهند. با توجه به خروجی‌های این بخش اثرات جدول 3 برای این بخش انتخاب شده‌اند که بردار اثرات را در رابطه (12) تشکیل می‌دهند.

$$f_3 = [f_{mm1} \ f_{mm2}]^T \quad (12-a)$$

$$e_3 = [e_{mm1} \ e_{mm2} \ \dots \ e_{mm10}]^T \quad (12-b)$$

با توجه به ارتباط این بخش با بخش‌های دیگر سیستم رابطه اثرات خروجی این بخش با عیوب و اثرات بخش‌های دیگر را می‌توان به شکل رابطه (13) نشان داد.

$$e_3 = A_{f_3}^3 \cdot f_3 + A_1^3 \cdot e_1 + A_2^3 \cdot e_2 + A_4^3 \cdot e_4 \quad (13)$$

ماتریس ارتباط‌دهنده عیب و اثر مربوط به این بخش و ماتریس‌های انتشار اثر سایر بخش‌ها محاسبه و در رابطه (14) ارائه شده‌اند.

$$A_{f_3}^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_1^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_2^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_4^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

جدول 3 اثرات انتخاب شده برای بخش مکانیکی موتور

ردیف	نام	توضیحات
1	e_{mm1}	افزایش گشتاور مورد نیاز برای جبران اصطکاک
2	e_{mm2}	کاهش گشتاور مورد نیاز برای جبران اصطکاک
3	e_{mm3}	نوسان دامنه فرکانس برابر دور در طیف گشتاور اصطکاک
4	e_{mm4}	نوسان دامنه هارمونیک‌های بالاترطیف گشتاور اصطکاک
5	e_{mm5}	افزایش دما یاتاقان
6	e_{mm6}	افزایش دامنه فرکانس دور در جهت شعاعی در طیف ارتعاش
7	e_{mm7}	افزایش دامنه فرکانس دور در جهت محوری در طیف ارتعاش
8	e_{mm8}	افزایش دامنه هارمونیک‌های بالاتر دور طیف ارتعاش شعاعی
9	e_{mm9}	افزایش دامنه فرکانس دو برابر فرکانس تغذیه در طیف ارتعاش
10	e_{mm10}	افزایش باند‌های کناری دو برابر فرکانس لغزش اطراف فرکانس دور در طیف ارتعاش

جدول 4 اثرات انتخاب شده برای بخش شفت

ردیف	نام	توضیحات
1	e_{sh1}	افزایش سرعت گردش شفت
2	e_{sh2}	کاهش سرعت گردش شفت
3	e_{sh3}	نوسان دامنه هارمونیک‌های فرکانس پایین در طیف سرعت
4	e_{sh4}	نوسان دامنه هارمونیک‌های فرکانس بالا در طیف سرعت
5	e_{sh5}	افزایش گشتاور مورد نیاز برای جبران اصطکاک شفت
6	e_{sh6}	کاهش گشتاور مورد نیاز برای جبران اصطکاک شفت
7	e_{sh7}	افزایش دامنه فرکانس دور در طیف ارتعاش در جهت شعاعی
8	e_{sh8}	افزایش دامنه فرکانس دور در طیف ارتعاش در جهت محوری
9	e_{sh9}	افزایش دامنه فرکانس‌های بالاتر در طیف ارتعاش در جهت شعاعی

¹ diffuser

جدول 6 اثرات انتخاب شده برای بخش مکانیک پمپ

Table 6 the effects have been selected in mechanical part of pump

ردیف	نام	توضیحات
1	e_{mp1}	افزایش گشتاور مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک
2	e_{mp2}	کاهش گشتاور مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک
3	e_{mp3}	نوسان دامنه فرکانس دور در طیف گشتاور
4	e_{mp4}	نوسان هارمونیک‌های بالاتر در طیف گشتاور
5	e_{mp5}	افزایش دما یاتاقان
6	e_{mp6}	افزایش دامنه فرکانس دور در طیف ارتعاش
7	e_{mp7}	افزایش دامنه فرکانس گذر پروانه در طیف ارتعاش
8	e_{mp8}	افزایش دامنه فرکانس مربوط به یاتاقان در طیف ارتعاش
9	e_{mp9}	افزایش دامنه هارمونیک‌های بالاتر در طیف ارتعاش

با توجه به ارتباط این بخش با بخش شفت و هیدرولیک پمپ در شکل 1 رابطه اثرات این بخش با عیوب و اثرات بخش‌های دیگر را می‌توان به شکل رابطه (22) نشان داد.

$$e_6 = A_{f_6}^6 \cdot f_6 + A_4^6 \cdot e_6 + A_5^6 \cdot e_6 \quad (22)$$

در این رابطه ماتریس ارتباط دهنده عیب و اثر این بخش و ماتریس‌های انتشار عیب به شکل ماتریس‌های رابطه (23) است.

$$A_{f_6}^6 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_4^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_5^6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

7-2- بخش ورودی پمپ

اجزا این بخش شامل لوله‌ها، اتصالات، شیر و فیلترهای قسمت ورودی پمپ و وظیفه این بخش انتقال سیال به داخل پمپ و به سمت پروانه است. عیوب شناسایی شده در این بخش شامل کاویتاسیون f_{ip1} و انسداد لوله‌های ورودی f_{ip2} است و عواملی نظیر کاهش دبی d_{ip1} و افزایش دبی d_{ip2} به عنوان اغتشاش در این بخش در نظر گرفته شده‌اند. اثرات انتخاب شده برای این بخش در جدول 7 نمایش داده شده است.

جدول 7 اثرات انتخاب شده برای بخش ورودی پمپ

Table 7 the effects have been selected in inlet of the pump

ردیف	نام	توضیحات
1	e_{ip1}	افزایش فشار چشمه پروانه
2	e_{ip2}	کاهش فشار چشمه پروانه
3	e_{ip3}	نوسان دامنه هارمونیک فرکانس دور در طیف فشار
4	e_{ip4}	افزایش فلو داخل پمپ
5	e_{ip5}	کاهش فلو داخل پمپ
6	e_{ip6}	افزایش هارمونیک‌های فرکانس بالا در طیف ارتعاش

و فرسایش حلقه‌های آب‌بند f_{i4} است و همچنین تغییر چگالی سیال d_{i1} در حال انتقال را می‌توان به عنوان اغتشاش در نظر گرفت. بردار عیب این بخش به شکل رابطه (18) است. اثرات مناسب با توجه به این عیوب برای این بخش در جدول 5 انتخاب شده که بردار اثرات این بخش در رابطه (18) را تشکیل می‌دهند.

$$f_5 = [f_{i1} \ f_{i2} \ f_{i3} \ f_{i4} \ d_{i1}]^T \quad (18-a)$$

$$e_5 = [e_{i1} \ e_{i2} \ \dots \ e_{i12}]^T \quad (18-b)$$

با توجه به اتصال این بخش به شفت و بخش ورودی پمپ رابطه اثرات این بخش با عیوب و اثرات بخش‌های دیگر را به شکل رابطه (19) است.

$$e_5 = A_{f_5}^5 \cdot f_5 + A_4^5 \cdot e_5 + A_7^5 \cdot e_7 \quad (19)$$

در این رابطه ماتریس ارتباط دهنده عیب و اثر این بخش و ماتریس‌های انتشار اثر بخش‌های 4 و 7 محاسبه و در رابطه (20) نشان داده شده است.

$$A_{f_5}^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_4^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

2-6- بخش مکانیکی پمپ گریز از مرکز

این بخش شامل شفت پمپ، یاتاقان‌های داخل پمپ که در دو طرف شفت قرار گرفته‌اند و نیز بدنه پمپ است. وظیفه این بخش نگهداشتن اجزا بخش هیدرولیک در مکان صحیح و هدایت سیال به سمت اجزا هیدرولیک و یا هدایت آن به خارج پمپ است. عیوب شناسایی شده در این بخش شامل عیب یاتاقان‌های پمپ f_{mp1} و سایش بین پروانه و بدنه f_{mp2} است و اثرات انتخاب شده برای این بخش در جدول 6 نمایش داده شده است.

این عیوب و اثرات بردار عیب و اثر این بخش را به شکل رابطه (21) تشکیل می‌دهند.

$$f_6 = [f_{mp1} \ f_{mp2}]^T \quad (21-a)$$

$$e_6 = [e_{mp1} \ e_{mp2} \ \dots \ e_{mp9}]^T \quad (21-b)$$

جدول 5 اثرات انتخاب شده برای بخش هیدرولیک پمپ

Table 5 the effects have been selected in hydraulic part of pump

ردیف	نام	توضیحات
1	e_{i1}	افزایش فشار خروجی پمپ
2	e_{i2}	کاهش فشار خروجی پمپ
3	e_{i3}	صفر شدن فشار خروجی پمپ
4	e_{i4}	نوسان دامنه فرکانس برابر دور در طیف فشار خروجی
5	e_{i5}	افزایش گشتاور بار
6	e_{i6}	کاهش گشتاور بار
7	e_{i7}	گشتاور بار صفر
8	e_{i8}	نوسان دامنه فرکانس دور در طیف گشتاور بار
9	e_{i9}	نوسان هارمونیک‌های بالاتر در طیف گشتاور بار
10	e_{i10}	افزایش دامنه فرکانس دور در طیف ارتعاش
11	e_{i11}	افزایش دامنه فرکانس گذر پروانه در طیف ارتعاش
12	e_{i12}	افزایش دامنه هارمونیک‌های بالاتر در طیف ارتعاش

ارتباط بین بخش‌ها در این گراف را می‌توان به صورت ریاضی با ماتریس مجاورت گراف D_e نمایش داد. ماتریس مجاورت گراف سیستم موتور-پمپ در رابطه (2) نشان داده شده است. برای مثال در گراف مجاورت عدد یک در درایه سطر اول - ستون دوم به این معنی است که یک یال از بخش 2 (متناظر با ستون دوم) به بخش 1 (متناظر با سطر اول) به صورت رابطه (26) وجود دارد.

$$D_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

در این تحقیق با هدف طراحی سیستم پایش وضعیت و تشخیص عیب و با استفاده از آنالیز انتشار عیب، ارتباط بین عیوب و اغتشاش‌ها با اثراتی که با نصب سنسورهای مناسب قابل اندازه‌گیری هستند (اثرات انتهایی) مشخص می‌گردد. به عبارت دیگر هدف در این مرحله این است که مشخص گردد به عنوان مثال با نصب سنسور جریان موتور در بخش الکتریکی موتور کدام عیوب در بخش‌های مختلف سیستم بر اثرات اندازه‌گیری شده توسط این سنسور اثرگذار هستند. در مرجع [12] نشان داده شده است که در صورتی که بتوان با تغییر ترتیب n رأس Y به صورت $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ و انتخاب ماتریس مجاورت D_e را به ساختار پایین مثلثی رابطه (27) تبدیل کرد، آن‌گاه می‌توان ارتباط بین عیوب و اثرات انتهایی را از رابطه (28) محاسبه کرد. (بخشی که اثرات انتهایی (e_{end}) در آن قرار دارند آخرین رأس Y یعنی y_n انتخاب می‌شود).

$$D_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d_{2,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d_{3,1} & d_{3,2} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n-1,1} & d_{n-1,2} & \dots & d_{n-1,n-2} & 0 & 0 \\ d_{n,1} & d_{n,2} & \dots & d_{n,n-2} & d_{n,n-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$e_{end} = [T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_{n-1} \quad I] \cdot A_f \cdot f_e \quad (28-a)$$

$$T_{n-k} = \begin{cases} A_{n-k}^n, & K = 1 \\ A_{n-k}^n + \sum_{i=1}^{k-1} T_{n-i} \cdot A_{n-k}^{n-i}, & K > 1 \end{cases} \quad (28-b)$$

$$A_f = [A_f^T \quad A_f^T \quad \dots \quad A_f^T]^T \quad (28-c)$$

ثابت می‌شود [12] که هر گرافی را که شامل حلقه نباشد می‌توان با تغییر ترتیب رأس‌ها به فرم قابل محاسبه تبدیل کرد؛ بنابراین رابطه (26) زمانی قابل استفاده است که حلقه‌ای در گراف وجود نداشته باشد؛ بنابراین قبل از محاسبه ارتباط اثرات انتهایی با عیوب (رابطه 28) باید حلقه‌های موجود حذف گردند و برای حذف این حلقه ناگزیر برخی از یال‌های گراف حذف می‌گردند. برای حذف حلقه ممکن است چند انتخاب برای انتخاب حذف یال وجود داشته باشد. در مرجع [13] الگوریتمی برای حذف حلقه‌ها پیشنهاد شده است که با استفاده از آن یال‌هایی حذف می‌گردند که به دنبال آن بیشترین عیب‌های ممکن در اثرات انتهایی دیده شوند، اما در این مقاله با توجه به اثرات انتخاب شده برای تشخیص عیوب، حذف حلقه‌ها به گونه‌ای انجام شده که حتی‌الامکان رابطه بین اثرات پیشنهاد شده با عیوب حفظ گردد. حذف هر یال به معنی در نظر نگرفتن ارتباط بین دو بخش سیستم در محاسبات آنالیز انتشار است. به منظور انجام آنالیز انتشار عیب در رابطه (29)

این عیوب و اثرات انتخاب شده بردار عیب و اثر این بخش را به شکل رابطه (24) تشکیل می‌دهند.

$$f_7 = [f_{ip1} \quad f_{ip2} \quad d_{ip1} \quad d_{ip2}]^T \quad (24-a)$$

$$e_7 = [e_{ip1} \quad e_{ip2} \quad \dots \quad e_{ip6}]^T \quad (24-b)$$

با توجه به این‌که این بخش در ورودی سیستم بوده و بخش‌های دیگر سیستم بر آن اثر نمی‌گذارند، تنها ماتریس ارتباط‌دهنده عیب و اثر به شکل رابطه (25) برای این بخش محاسبه شده است.

$$A_{f_7}^7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

3- آنالیز انتشار عیب برای سیستم موتور-پمپ

در بخش قبل با انجام آنالیز مدهای خرابی و اثرات، اطلاعات مربوط به عیوب، اغتشاش‌ها و اثرات در هر یک از بخش‌های سیستم گردآوری شده است. در عمل در سیستم‌های متشکل از چندین بخش نظیر سیستم موتور-پمپ وقوع یک عیب در یکی از بخش‌های سیستم در نتیجه انتشار اثرات ناشی از آن در بخش‌های دیگر سیستم نیز دارای اثرات قابل اندازه‌گیری است. در این تحقیق به منظور مشخص نمودن انتشار اثرات ناشی از عیوب در بخش‌های مختلف سیستم موتور-پمپ از آنالیز انتشار عیب استفاده شده است. در آنالیز انتشار عیب ارتباط بین یک مجموعه از اثرات انتهایی که با نصب سنسورهای مناسب در یکی از بخش‌های سیستم اندازه‌گیری می‌شوند، با مجموعه تمام عیوب بخش‌های مختلف تعیین می‌گردد؛ بنابراین با استفاده از نتایج این آنالیز می‌توان سیستم تشخیص عیب را با در نظر گرفتن تداخل اثر عیوب و اغتشاش‌ها طراحی کرد.

در این آنالیز برای نمایش ارتباط بین بخش‌های سیستمی که شامل n بخش است از یک گراف با n رأس استفاده می‌شود که هر رأس مربوط به یکی از بخش‌های سیستم است. در صورت ارتباط بین دو بخش سیستم، یک یال¹ بین این دو بخش رسم می‌شود. به صورت ریاضی اگر این گراف شامل n رأس $i=1:n$ y_i باشد، اگر $A_i^j \neq 0$ آن‌گاه یالی از y_i به y_j رسم می‌گردد (A_i^j ماتریس انتشار از بخش i به بخش j است). با توجه به نحوه ارتباط بخش‌ها در شکل 1 نمایش گرافی سیستم موتور-پمپ در شکل 2 نمایش داده شده است.

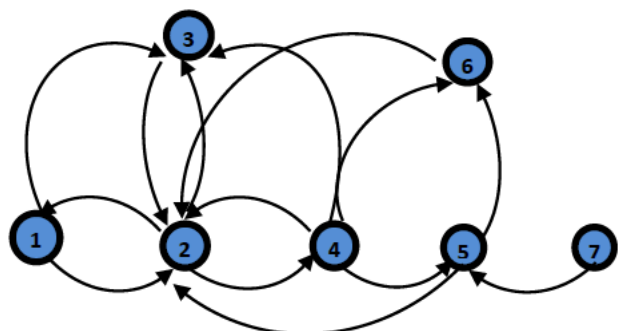


Fig. 2 graph presentation of the interconnection of motor-pump system
شکل 2 نمایش گرافی ارتباط بین بخش‌های سیستم موتور-پمپ

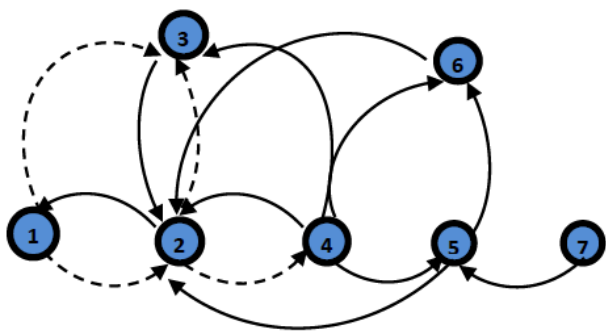


Fig. 3 graph presentation of the interconnection of system, the vertex representing the electrical part is the last vertex and the loops in the graph are omitted.

شکل 3 نمایش گرافی ارتباط بین بخش‌های سیستم موتور-پمپ با در نظر گرفتن

بخش الکتریکی موتور به عنوان بخش انتهایی و پس از حذف حلقه‌های گراف

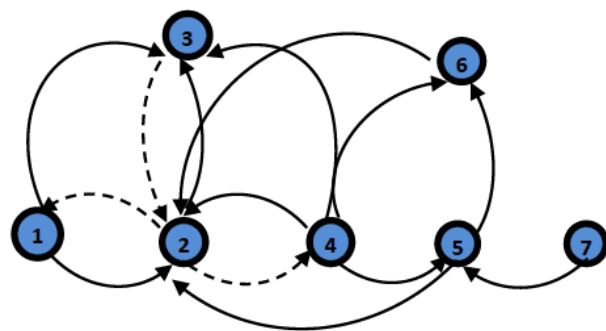


Fig. 4 graph presentation of the interconnection of system, the vertex representing the mechanical part of motor is the last vertex and the loops in the graph are omitted.

شکل 4 نمایش گرافی ارتباط بین بخش‌های سیستم موتور-پمپ با در نظر گرفتن

بخش مکانیکی موتور به عنوان بخش نهایی و پس از حذف حلقه‌های گراف

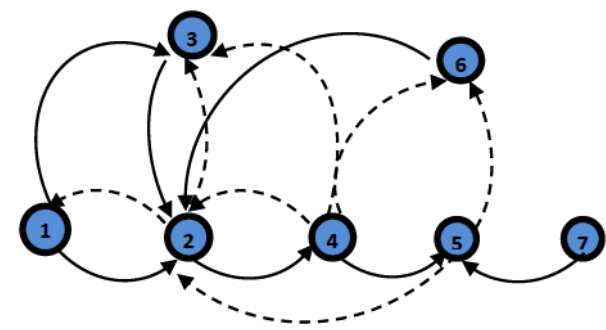


Fig. 5 graph presentation of the interconnection of system, the vertex representing the hydraulic part of pump is the last vertex and the loops in the graph are omitted.

شکل 5 نمایش گرافی ارتباط بین بخش‌های سیستم موتور-پمپ با در نظر گرفتن

بخش هیدرولیک به عنوان بخش نهایی و پس از حذف حلقه‌های گراف

اگر بردار اثرات متناظر با آن (در رابطه (34)) در فضای برداری تشکیل شده از ترکیب بردارهای اثرات اغتشاش‌ها قرار نگیرد و همچنین یک عیب قابل تفکیک از سایر عیوب است، اگر بردار اثرات آن با هیچ یک از بردار اثرات سایر عیوب یکسان نباشد.

مجموعه‌ای شامل 10 عیب و 5 اغتشاش از بخش‌های مختلف سیستم موتور و پمپ انتخاب شده‌اند.

$$f^T = [f_{em1} \ f_{em2} \ f_{em3} \ f_{mm1} \ f_{mm2} \ f_{sh1} \ f_{sh2} \ f_{i1} \ f_{ip1} \ f_{ip2}] \quad (29-a)$$

$$d^T = [d_{em1} \ d_{em2} \ d_{em3} \ d_{ip1} \ d_{ip2}] \quad (29-b)$$

$$f_e = [f^T \ d^T]^T \quad (29-c)$$

اثرات انتهایی از میان اثراتی که قابل اندازه‌گیری توسط سنسورهای جریان و ولتاژ موتور، ارتعاش و فشار خروجی پمپ هستند انتخاب گردیده‌اند. با استفاده از سنسور جریان و ولتاژ مجموعه از اثرات که قابل اندازه‌گیری است شامل بردار اثرات رابطه (30) است.

$$e_e^T = [e_{em1} \ e_{em2} \ e_{em3} \ e_{em4} \ e_{em5} \ e_{em6} \ e_{em7}] \quad (30)$$

با توجه به این که این اثرات مربوط به بخش الکتریکی موتور هستند، بخش 1 به عنوان بخش شامل اثرات انتهایی انتخاب می‌شود. یال‌های مشخص شده به صورت خط چین در شکل 3 به منظور حذف حلقه‌ها در آنالیز در نظر گرفته نشده‌اند. پس از حذف حلقه‌ها و تغییر ترتیب رأس‌های گراف به شکل $Y = [4 \ 3 \ 7 \ 5 \ 6 \ 2 \ 1]$ ماتریس مجاورت گراف به شکل پایین مثلی رابطه (31) تبدیل می‌گردد.

$$D_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

این آنالیز برای سنسور ارتعاش نصب شده بر یاتاقان بخش مکانیکی موتور انجام شده است. اثرات قابل اندازه‌گیری توسط این سنسور عبارت از رابطه (32) است.

$$e_v^T = [e_{mm6} \ e_{mm7} \ e_{mm8} \ e_{mm9}] \quad (32)$$

با توجه به این که این اثرات مربوط به بخش مکانیکی موتور هستند، بخش 3 به عنوان بخش شامل اثرات انتهایی انتخاب می‌شود. یال‌های مشخص شده به صورت خط چین در شکل 4 به منظور حذف حلقه‌ها در آنالیز در نظر گرفته نمی‌شوند. پس از حذف حلقه‌ها و تغییر ترتیب رأس‌های گراف و جابه‌جایی سطر و ستون‌ها به شکل $Y = [4 \ 7 \ 5 \ 6 \ 1 \ 2 \ 3]$ ماتریس مجاورت به فرم پایین مثلی تبدیل می‌گردد. به طور مشابه با در نظر گرفتن بخش هیدرولیک پمپ به عنوان بخش انتهایی و انتخاب اثرات قابل اندازه‌گیری توسط این سنسور (رابطه (33))، حذف حلقه‌های گراف مطابق شکل 5 انجام گرفته است و بدین ترتیب ماتریس مجاورت با تغییر ترتیب رأس‌های گراف به شکل $Y = [6 \ 1 \ 3 \ 7 \ 2 \ 4 \ 5]$ به شکل پایین مثلی به صورت رابطه (33) درمی‌آید.

$$e_p^T = [e_{i1} \ e_{i2} \ e_{i3}] \quad (33)$$

پس از تبدیل ماتریس‌های مجاورت گراف سیستم به فرم قابل محاسبه (رابطه (25))، ارتباط بین اثرات قابل اندازه‌گیری توسط هر یک از سنسورهای جریان، ولتاژ، ارتعاش و فشار با عیوب و اغتشاش‌های انتخاب شده سیستم (رابطه (27)) با استفاده از رابطه (26) محاسبه شده و به شکل رابطه (34) نمایش داده شده است. در این رابطه هر سطر ماتریس متناظر با یکی از اثرات انتهایی و هر ستون متناظر با بردار اثرات یک عیب یا اغتشاش است، همچنین سطرها مربوط به اثرات الکتریکی، ارتعاشی و فشار خروجی و ستون‌های مربوط به عیوب و اغتشاش‌ها از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

با توجه به نتایج آنالیز انتشار عیب می‌توان نتیجه گرفت هر یک از عیوب قابل تشخیص به صورت مقاوم (قابل تشخیص با وجود حضور اغتشاش) است.



Fig. 7. picture of experimental system

شکل 7 تصویر سیستم آزمایشگاهی

توسط کارت گردآوری داده نمونه برداری و در محیط نرم افزار لب ویو ذخیره و اثرات مورد نظر از این داده ها استخراج شده است.

در این سیستم آزمایشگاهی، سیال در یک مسیر بسته توسط پمپ از مخزن مکش و پس از طی مسیر دوباره به مخزن بازگردانده می شود. شیر V1 به منظور گردش داخلی پمپ و ایجاد اغتشاش استفاده شده و با بستن شیر V2 باز کردن شیر V3 می توان عیوبی نظیر خشک کار کردن پمپ و کاویتاسیون را شبیه سازی کرد.

به غیر از عیوب و اغتشاش های بخش ورودی پمپ شامل کاویتاسیون، انسداد لوله ورودی و کاهش و افزایش فلو سیال و نیز عیب خشک کار کردن پمپ به وسیله شیرآلات سیستم آزمایشگاهی پیاده سازی شده است، سایر عیوب نظیر شکستگی میله روتور و عیب یاتاقان با استفاده از قطعات معیوب و عیب اتصال کوتاه سیم پیچ به وسیله اتصال کوتاه کردن عمدی تعدادی از حلقه های استاتور ایجاد شده و عیب تک فاز شدن موتور و اغتشاش هایی نظیر کاهش و افزایش و نامتعادل شدن ولتاژ توسط واریاک های نصب شده در مسیر تغذیه موتور پیاده سازی شده است. عیب عدم تعادل روتور با سوراخ کردن روتور و در نتیجه جابه جا شدن خط محور جرمی روتور از روی محور چرخش شبیه سازی گردید و عیب ناهم راستایی موازی محور به وسیله ناهم محور کردن عمدی محورها در محل کوپلینگ به نحوی که خط محوری شفت موتور و شفت پمپ برهم منطبق نباشند شبیه سازی شد. پس از پیاده سازی هر یک از عیوب و اغتشاش ها در سیستم آزمایشگاهی، سیگنال های جریان، ولتاژ و ارتعاش اندازه گیری و سپس با استفاده از تبدیل پارک توسعه یافته و نیز آنالیز فرکانسی ویژگی های مورد نظر از سیگنال های اندازه گیری شده استخراج گردیده است.

در ادامه در شرایط وقوع هر یک از عیوب و اغتشاش ها، مقادیر این ویژگی های با مقادیر آن ها در شرایط نرمال مقایسه و بدین وسیله اثرات نهایی مربوطه تعیین و نتایج در جدول 8 نمایش داده شده است. در این جدول هر ستون مربوط به ویژگی های استخراج شده یکی از عیوب و اغتشاش هاست و سلول های مشخص شده در هر ستون جدول مربوط به اثرات انتهایی تعیین شده در مقایسه با شرایط نرمال است. همان طور که مشاهده می شود نتایج به دست آمده با نتایج مورد انتظار در آنالیز انتشار عیب (ستون های رابطه (32)) کاملاً منطبق است.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق آنالیز انتشار عیب برای سیستمی شامل الکتروموتور القایی و پمپ گریز از مرکز انجام گرفت. با محاسبه ماتریس های ارتباط دهنده عیب و

$$\begin{bmatrix} e_e \\ - \\ e_v \\ - \\ e_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f \\ - \\ d \end{bmatrix} \quad (34)$$

4- نتایج آزمایشگاهی

به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده از آنالیز انتشار عیب، عیوب و اغتشاش های انتخاب شده در یک سیستم آزمایشگاهی پیاده سازی و اثرات مورد انتظار از سیگنال های اندازه گیری شده استخراج گردیده است.

سیستم آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده برای این تحقیق شامل یک الکتروموتور القایی قفس سنجایی 2 قطبی (2900 دور) سه فاز و توان 3 کیلووات ساخت شرکت موتوژن و پمپ گریز از مرکز 3 مرحله ای مدل WKL32/3 ساخت شرکت پمپیران با حداکثر ارتفاع خروجی 74 متر است. در این پمپ از نوارهای گرافیتی برای آب بندی استفاده شده است. شماتیک سیستم آزمایشگاهی در شکل 6 و تصویر این سیستم در شکل 7 نمایش داده شده است.

سنسورهای مورد استفاده در این سیستم آزمایشگاهی شامل سنسور جریان الکتریکی اثر هال مدل LA55-p با دقت $\pm 0.9\%$ و سنسور ولتاژ مدل LV25-P با دقت $\pm 0.8\%$ برای اندازه گیری سیگنال های الکتریکی موتور است، همچنین سنسور شتاب سنج پیزوالکتریک مدل AC192-1D (رنج دینامیک $\pm 80g$ و حساسیت 100 mV/g) که در جهت شعاعی و عمود بر محور روتور در محل نزدیک به محفظه یاتاقان برای اندازه گیری ارتعاش نصب شده است. سنسور فشار مدل 17.600G-1002 با دقت $\pm 0.5\%$ برای اندازه گیری فشار خروجی پمپ و فلو متر مدل YF-s201 با دقت $\pm 10\%$ برای اندازه گیری فلو سیال نصب شده است.

سیگنال های اندازه گیری شده توسط سنسورها با نرخ 10 Ksample/s

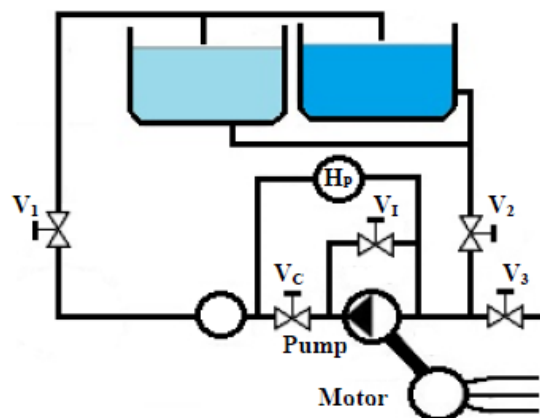


Fig. 6. schematic of experimental system

شکل 6 شماتیک سیستم آزمایشگاهی

جدول 8 نتایج اثرات اندازه‌گیری شده عیوب در سیستم آزمایشگاهی

Table 8 the measured effects of faults in experimental system

ردیف	اثرات	عیوب
1		Normal
2	e_{em1}	f_{em1} 12.06, f_{em2} 6.54, f_{em3} 5.97, f_{mm1} 5.91, f_{mm2} 5.95, f_{sh1} 5.79, f_{i1} -, f_{ip1} -, f_{ip2} -, d_{em1} 6.71, d_{em2} 5.96, d_{em3} 5.97, d_{ip1} -, d_{ip2} 6.1
3	e_{em2}	5.89, -, -, -, -, -, 3.41, 4.1, 4.1, 4.69, -, -, 5.67, -, -
4	e_{em3}	28e-3, 55, 635e-3, 32e-3, 27e-3, 70e-3, 25e-3, 45e-3, 16e-3, 55e-3, 1.75, 34e-3, 30e-3, 80e-3, 29e-3
5	e_{em4}	40e-6, 100e-6, 60e-6, 250e-6, 120e-6, 90e-6, 25e-6, 140e-3, 200e-3, 30e-6, 22e-6, 40e-6, 97e-6, 80e-6
6	e_{em5}	35e-6, 3e-3, 500e-6, 70e-6, 130e-6, 120e-6, 35e-6, 16e-6, 24e-6, 50e-6, 30e-6, 15e-6, 14e-6, 15e-6
7	e_{em6}	234, 122, 223, 234, 233, 234, 230, 235, 234, 235, 204, 245, 204, 234, 234
8	e_{em7}	36.14, 1987, 29.39, 41.45, 40.33, 35.39, 34.18, 36.2, 32.5, 34.9, 117, 41.4, 31.36, 38.7, 36.3
9	e_{mm6}	22.5, 32, 31, 51.84, 34.4, 62.4, 134, 11.04, 12.74, 16.15, 22.6, 29.1, 21.2, 21.1, 26.4
10	e_{mm8}	151.9, 1525, 169.1, 694, 219.9, 175, 193.1, 131, 133, 175.2, 138, 131, 119, 131.7, 111
11	e_{mm9}	0.9, 84.5, 2.49, 2, 1.9, 1.7, 1.9, 0.5, 0.1, 0.5, 2.1, 1.2, 0.8, 0.6, 0.45
12	e_{i1}	6.8, 6.5, 6.9, 6.9, 6.9, 6.6, 6.9, -, -, 6.3, 6.4, 6.2, 7.35, -
13	e_{i2}	6.8, -, -, -, -, -, 0, 1.3, 1.6, -, -, -, -, 5.7
14	e_{i3}	12e-8, 15e-8, 12e-6, 18e-8, 22e-8, 15e-8, 18e-8, 10e-8, 35e-8, 25e-8, 18e-8, 18e-8, 10e-8, 15e-8, 15e-8

6- مراجع

- [1] E. E. Hurdle, L. M. Bartlett, J. D. Andrews, System fault diagnostics using fault tree analysis, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Risk and Reliability*, Vol. 221, No. 1, pp. 43–55, 2007.
- [2] N. S. V Rao, Expected-value analysis of two single fault diagnosis algorithms, *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 42, No. 3, pp. 272–280, 1993.
- [3] F. Tu, K. R. Pattipati, S. Deb, V. N. Malepati, Computationally efficient algorithms for multiple fault diagnosis in large graph-based systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part A: Systems and Humans*, Vol. 33, No. 1, pp. 73–85, 2003.
- [4] M. Iri, K. Aoki, E. O'Shima, H. Matsuyama, An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 3, No. 1–4, pp. 489–493, 1979.
- [5] F. Yang, S. L. Shah, D. Xiao, Signed directed graph-based hierarchical modelling and fault propagation analysis for large-scale systems, *IET Control Theory and Applications*, Vol. 7, No. 4, pp. 537–550, 2013.
- [6] R. Izadi-Zamanabadi, *Fault-tolerant Supervisory Control: System Analysis And Logic Design*, PhD Thesis, Alborg University, Alborg, 1999.
- [7] C. Kallesøe, *Fault Detection and Isolation in Centrifugal Pumps*, PhD Thesis, Alborg University, Alborg, 2005.
- [8] S. M. A. Cruz, A. J. M. J. M. Cardoso, S. S. Member, Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park's vector approach, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No. 5, pp. 1227–1233, 2001.
- [9] S. M. A. Cruz, A. J. M. Cardoso, Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended park's vector approach, *Electric Machines and Power System*, Vol. 28, No. 4, pp. 289–299, 2000.
- [10] A. J. M. Cardoso, E. S. Saraiva, Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating three-phase induction motors by Park's vector approach, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 29, No. 5, pp. 897–901, 1993.
- [11] J. L. H. Silva, A. J. M. Cardoso, Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's Vector approach, *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2005*, Raleigh, USA, Nov 6-10 2005.
- [12] M. H. Shih, J. L. Ho, Solution of the boolean markus-yamabe problem, *Advanced in Applied Mathematics*, Vol. 22, No. 1, pp. 60–102, Jan. 1999.
- [13] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, pp. 97-98, Germany, Springer Berlin Heidelberg, 2006.

اثر در هر بخش و نیز ماتریس‌های انتشار اثر مدلی منطقی برای مطالعه ارتباط بین مجموعه عیوب و اغتشاش‌های سیستم با اثرات در بخش‌های مختلف سیستم به دست آمده و نتایج این آنالیز به وسیله سیستم آزمایشگاهی مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است.

با توجه به نتایج آنالیز در رابطه (32) و با مقایسه ستون‌های این ماتریس می‌توان نتیجه گرفت: در صورتی که تنها از سنسورهای جریان و ولتاژ استفاده شود و اثرات الکتریکی انتخاب شده در نظر گرفته شوند، به دلیل تشابه ستون‌ها آن‌گاه عیوب مکانیکی موتور شامل عدم تعادل روتور، عیب بیرینگ و شفت و همچنین عیب کاپیتاسیون و مسدود شدن مسیر ورودی قابل تشخیص و تفکیک از یکدیگر نیست. در صورتی که تنها اثرات انتخاب شده ارتعاشی مورد نظر باشد در این صورت به دلیل تشابه اثرات عیب اتصال کوتاه سیم‌پیچ و اغتشاش عدم تعادل منبع تغذیه و عیوب عدم تعادل روتور، خمیدگی شفت و اغتشاش عدم تعادل بار قابل تفکیک از هم نیست.

در صورتی که از تمامی اثرات انتهایی قابل اندازه‌گیری توسط سنسورهای الکتریکی، ارتعاش و فشار خروجی به طور هم‌زمان استفاده شود و تمامی اثرات انتخاب شده در سیستم تشخیص عیب مورد استفاده قرار گیرد در این صورت مجموعه عیوب رابطه (29) با وجود اغتشاش‌های سیستم قابل تشخیص به صورت مقاوم و قابل تفکیک است.

از مدل به دست آمده در این آنالیز می‌توان برای توسعه الگوریتم‌های تشخیص عیب استفاده کرد و بررسی تداخل اثر اغتشاش‌ها و عیوب دیگر بر اثر انتخاب شده برای تشخیص عیب را با اضافه نمودن اثر جدید به ماتریس انتشار اثر و محاسبات مجدد آنالیز انتشار عیب انجام داد.