

# مروری بر روش‌های عیب‌یابی الکتروپمپ بر اساس مدل سامانه



مهندس مهدی افشاری



دکتر جواد پشنان

واژه‌های کلیدی: عیب‌یابی، الکتروپمپ، مدل، پایش وضعیت

گردآوری

## ۱. مقدمه

الکتروپمپ‌ها از جمله عناصر پرکاربرد در صنعت هستند که شامل دو بخش اصلی پمپ و موتور می‌باشند. پمپ‌ها انواع گوناگونی دارند اگرچه مطالعات مختلفی بر روی ۳ دسته از پمپ‌ها انجام شده است.

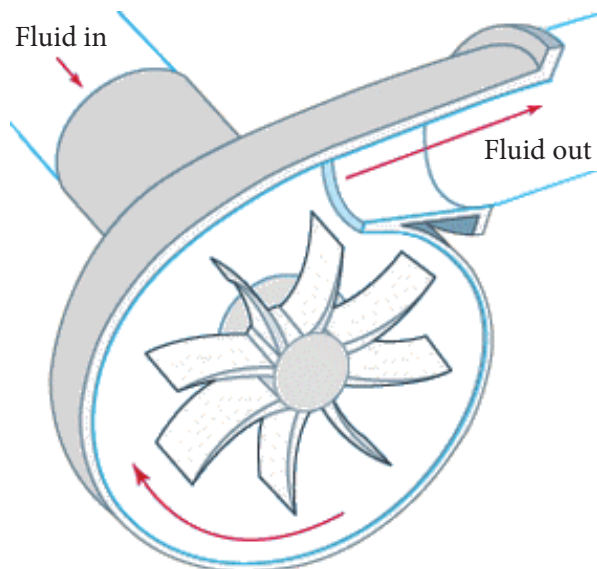
۱. پمپ‌های گریز از مرکز؛
۲. پمپ‌های پیستونی؛
۳. پمپ‌های خلاء.

پمپ‌های گریز از مرکز از پرکاربردترین پمپ‌ها در جهان می‌باشند. این پمپ‌ها دارای اصول عملکردی یکسان و ساده‌ای هستند و دارای قیمت‌های معقولی نیز می‌باشند. وظیفه‌ی اصلی پمپ افزایش فشار

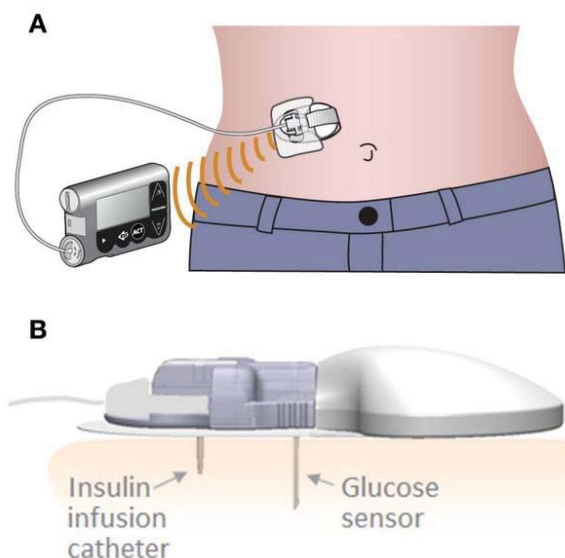
صنعت هستند و کاربرد بسیار زیادی دارند. با توجه به کاربرد گسترده‌ی این تجهیزات، نیازمند روش‌هایی هستیم که به هنگام وقوع عیب بتوانند به صورت برخط این عیوب را تشخیص دهند. همچنین باید به این نکته توجه داشته باشیم که روش مورد استفاده باید در تمامی شرایط قابل پیاده‌سازی باشد و مهم‌تر اینکه، از قابلیت اطمینان بالایی نیز برخوردار باشد. بدین منظور به معرفی روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر مدل می‌پردازیم که با توجه به دقت بالای آن‌ها در صنایع حساس حائز اهمیت هستند.

امروزه، با توجه به گسترش و پیشرفت سامانه‌ها برای افزایش اطمینان از عملکرد، کیفیت و امنیت آن‌ها، نیازمند روش‌هایی هستیم تا به هنگام بروز مشکل در سامانه بتواند نوع، مکان و منبع آن را تشخیص داده و علاوه بر آن روشی را برای رفع آن ارایه دهد. این امر در گذشته به وسیله‌ی هشدار دهنده‌ها انجام می‌شد. اما این ابزارها، شرایط رفع خودکار عیوب را برآورده نمی‌کردند. از سوی دیگر به هنگام وقوع عیب، نیاز بود تا سامانه از حلقه خارج شود و سپس تعمیر شود که این امر موجب خسارت‌های اقتصادی فراوان به تولیدکنندگان می‌شد. الکتروپمپ‌ها از جمله تجهیزات مهم در

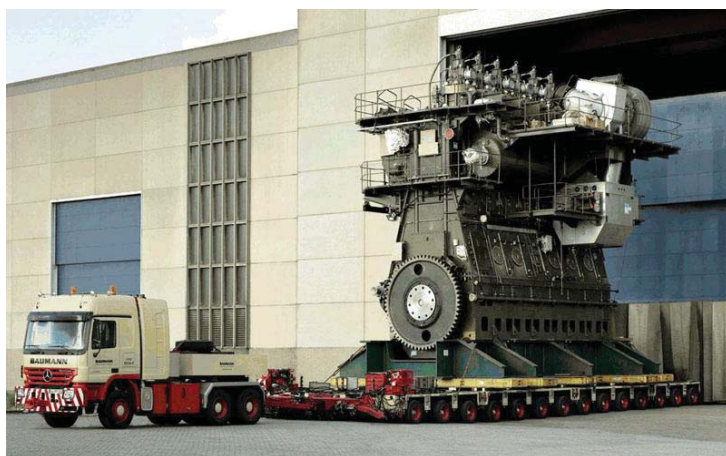




شکل ۱. نحوه‌ی عملکرد پمپ



شکل ۲. سامانه‌ی تزریق انسولین به صورت خودکار



شکل ۳. تصویر موتور دیزل الکتروپمپ نیوارلان

سیال خروجی پمپ به نسبت فشار سیال ورودی پمپ است. این اختلاف فشار به سبب به پیش راندن سیال در پمپ ایجاد می‌شود. پمپ گریز از مرکز با انتقال انرژی مکانیکی از موتور به پروانه‌ی چرخنده افزایش فشار را به وجود می‌آورد. سیال از ورودی به سمت مرکز پروانه حرکت می‌کند و در طول تیغه‌های پروانه قرار می‌گیرد. نیروی گریز از مرکز بدین وسیله سرعت سیال را افزایش می‌دهد و در نتیجه انرژی پتانسیل را به فشار تبدیل می‌کند. در شکل ۱ شمایی از نحوه‌ی عملکرد پمپ را مشاهده می‌کنیم. [۱]

پمپ‌ها از جمله عناصر بسیار پرکاربرد در صنعت هستند که در ابعاد و اندازه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند به‌طور نمونه به دو مورد از بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین پمپ‌های مورد استفاده اشاره می‌گردد.

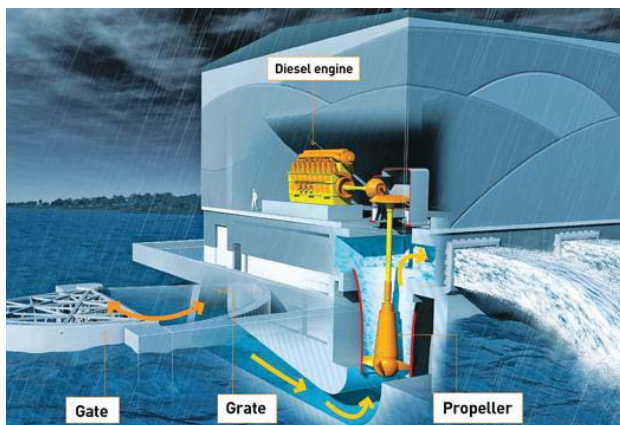
در مهندسی پزشکی از پمپ‌هایی در ابعاد بسیار کوچک استفاده می‌شود که نمونه‌ی جالبی از کاربرد پمپ‌ها در این زمینه پمپ کردن انسولین به داخل رگ‌های فرد بیمار است که در این سامانه، میزان انسولین موجود در خون فرد توسط حسگرها سنجش می‌شود و در صورت تشخیص کمبود، انسولین توسط پمپ‌های بسیار کوچک به بدن فرد بیمار تزریق می‌شود. در شکل ۲ شمایی از این سامانه مشاهده می‌شود.

از دیگر نمونه‌های کاربرد پمپ می‌توان به بزرگ‌ترین پمپ آب تحت احداث در نیواورلان اشاره کرد. این پمپ توسط یک موتور دیزل با قدرت ۵۰۰۰ اسب بخار و با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه به گردش در خواهد آمد که در نتیجه قابلیت جابجایی کل آب ۱۵ استخر استاندارد المپیک را در عرض ۱ دقیقه دارد. تصویر موتور دیزل مربوطه در شکل ۳ آمده است.

این پمپ به سبب جلوگیری از جریان آب در خیابان‌های شهر به دلیل طوفان‌ها می‌باشد که در یک محفظه استیل به ارتفاع تقریبی ۱۰ متر و طول تقریبی ۷۰ متر نگهداری می‌گردد و شمای کلی آن در شکل ۴ آمده است.

همان‌طور که دیدیم پمپ‌ها دارای کاربردهای بسیار متفاوتی هستند. پمپ‌ها در صنایع بسیار حساسی مورد استفاده قرار می‌گیرند که این نکته اهمیت پایش و کنترل وضعیت آن‌ها را روشن می‌سازد.

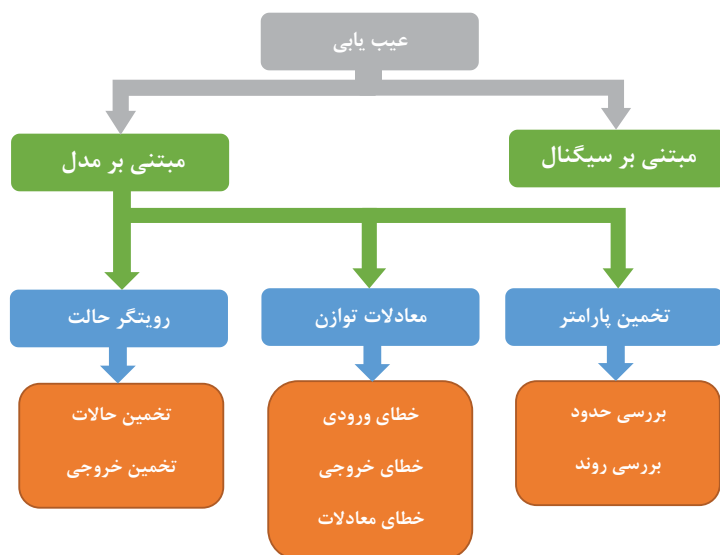




شکل ۴. شمای کلی الکتروپمپ نیوارلان



شکل ۵. تأثیر مخرب پدیده‌ی کاویتاسیون



شکل ۶. روش‌های عیب‌یابی بر مبنای مدل

### ۱.۱. عیوب رایج در الکتروپمپ‌ها

عیوب گوناگونی در الکتروپمپ‌ها رخ می‌دهد این عیوب به شکل‌های مختلفی دسته‌بندی می‌شوند که یکی از این دسته‌بندی‌ها به قرار زیر می‌باشد.

#### ۱.۱.۱. خرابی‌های هیدرولیکی

این خرابی‌ها از تغییر فشار در لوله‌ها و یا داخل پمپ رخ می‌دهد که باعث تغییر عواملی نظیر دما، سرعت و فلوی سیال می‌شوند. مهم‌ترین عیوب هیدرولیکی به شرح زیر هستند [۲]

- کاویتاسیون: کاویتاسیون رایج‌ترین عیبی است که در پمپ رخ می‌دهد. این پدیده یکی از خطرناک‌ترین حالت‌هایی است که ممکن است برای یک پمپ به وجود آید. آب یا هر مایع دیگری، در هر درجه حرارتی به ازای فشار معینی تبخیر می‌شود. هرگاه در حین جریان مایع در داخل چرخه‌ی یک پمپ، فشار مایع در نقطه‌ای، از فشار تبخیر مایع در درجه حرارت مربوطه کمتر شود، حباب‌های بخار یا گازی در فاز مایع به وجود می‌آیند که به همراه مایع به نقطه‌ای دیگر با فشار بالاتر حرکت می‌نمایند. اگر در محل جدید فشار مایع به اندازه کافی زیاد باشد، حباب‌های بخار در این محل تقطیر شده و در نتیجه ذراتی از مایع از مسیر اصلی خود منحرف شده و با سرعت‌های فوق‌العاده زیاد به اطراف و از جمله پره‌ها برخورد می‌نمایند. در چنین مکانی بسته به شدت برخورد، سطح پره‌ها خورده شده و متخلخل می‌گردد. این پدیده‌ی مخرب در پمپ‌ها را کاویتاسیون می‌نامند. تصویری از تأثیر مخرب پدیده کاویتاسیون را بر روی پره‌ها در شکل ۵ می‌بینیم [۳]

- فشار ضربانی: این عیب معمولاً در پمپ‌هایی با فشار بالا رخ می‌دهد که حداکثر ارتفاعی برابر ۳۰۰ متر دارند. این فشار ضربانی باعث ناپایداری و آسیب‌های جدی در پمپ می‌شود.

از دیگر عیوب هیدرولیکی می‌توان رانش شعاعی و محوری را نام برد. [۴]

#### ۲.۱.۱. عیوب مکانیکی

این عیوب در اثر خرابی در قطعات حاصل می‌شود که به شرح زیر می‌باشند.



- عیب یاتاقان؛
- عیب عایق؛
- عیب روغن کاری؛
- فرسودگی.

با توجه به گزارش تکرار خرابی‌هایی که شرکت‌های مختلف ارایه داده‌اند عیب کاویتاسیون، عیب یاتاقان و عیب عایق بیشترین تکرار را در میان پمپ‌ها داشته‌اند.

## ۲.۱. مروری بر انواع روش‌های عیب‌یابی

به‌طور کلی در عیب‌یابی سامانه‌ها دو روش اصلی موجود می‌باشد که روش‌های جانبی و ترکیبی دیگری نیز از این دو روش حاصل می‌گردد این دو روش به شرح ذیل می‌باشد.

### ۱.۲.۱. روش بکارگیری سیگنال‌ها برای تعیین عیب

در این روش با استفاده از تحلیل سیگنال‌های سامانه که عمدتاً از نوع ارتعاشی می‌باشند به تشخیص عیب پرداخته می‌شود. سیگنال‌هایی که از سامانه‌ی عملی اخذ می‌شوند معمولاً آغشته به نویز هستند. علاوه بر این مشکل، این سیگنال‌ها ممکن است دامنه‌ی مناسب در حوزه‌ی زمان برای تحلیل و تشخیص عیب را نداشته باشند. برای رفع این مشکلات ابتدا بر روی سیگنال پردازش‌های اولیه انجام می‌گیرد. بعد از پردازش‌های اولیه برای تعیین عیب سامانه نیاز به تحلیل سیگنال می‌باشد که بدین منظور الگوریتم‌های متنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۵]

### ۲.۲.۱. روش بر پایه‌ی مدل برای تعیین عیب

در این روش با استفاده از اندازه‌گیری سیگنال‌های سامانه و تشکیل مدل سامانه

حالات سامانه در دسترس باشند) و روش دیگر آن تخمین خروجی (اگر حالات سامانه در دسترس نباشند یا مد نظر جهت عیب‌یابی نباشند) می‌گردد که در روش تخمین خروجی از رؤیتگر ورودی ناشناخته نیز استفاده می‌گردد. با در روش معادلات توازن نیز با در نظر گرفتن یک مدل ثابت که به صورت جانبی اجرا می‌گردد اقدام به ایجاد سیگنال‌های مانده<sup>۱</sup> می‌کنند. در نظر گرفتن این مدل جانبی که به صورت همزمان با سامانه‌ی واقعی باید عمل نماید سه روش اصلی جهت تشکیل خطا وجود دارد. این سه روش شامل خطای ورودی، خطای خروجی و خطای معادلات می‌باشد. به‌طور کلی روش‌های عیب‌یابی بر مبنای مدل را همانند شکل ۶ می‌توان دسته‌بندی نمود. [۶]

در ادامه نمونه‌هایی از عیب‌یابی بر مبنای مدل در مراجع آمده است. در [۷] سیگنال‌های الکتریکی موتور و فشار تولید شده توسط پمپ اندازه‌گیری شده است. چهار عیب مورد توجه قرار گرفته است که عبارتند از:

- گرفتگی داخل پمپ؛
- افزایش اصطکاک ناشی از عیوبی نظیر عیب یاتاقان؛
- نزول عملکرد پمپ در اثر عیب کاویتاسیون و خشک کار کردن.

برای تعیین عیب چهار سیگنال مانده تولید می‌شود. در [۸] ابتدا مدل دینامیکی برای مجموعه‌ی الکتروپمپ استخراج شده و سپس این مدل حول نقطه‌ی کار سامانه خطی شده است. در مدل کردن مشخصه‌های اصلی پمپ یعنی گشتاور و فشار، شش پارامتر استفاده شده است. علاوه بر این پارامترها، پارامترهایی نیز برای مدل کردن دینامیک خاموشی سامانه استفاده شده و در سرعت ثابت این پارامترها در حالت سالم تخمین

اقدام به عیب‌یابی می‌گردد. سیگنال‌های اندازه‌گیری شده انواع مختلفی دارند که البته عمدتاً از سنجش کمیت‌های فیزیکی سامانه حاصل می‌گردند. به‌طور نمونه در عیب‌یابی سامانه‌ی الکتروپمپ مقداری همچون فلوی سیال ورودی به پمپ، فلوی سیال خروجی از پمپ، فشار سیال ورودی به پمپ، فشار سیال خروجی از پمپ، جریان الکتریکی موتور، ولتاژ الکتریکی موتور، دمای پمپ، دمای موتور، دمای سیال، دمای محیط و غیره در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پس از اندازه‌گیری این قبیل سیگنال‌ها باید با استفاده از مدل سامانه‌ی تحت بررسی که در اکثر موارد از روابط فیزیکی و یا شیمیای حاکم بر سامانه حاصل می‌شود به مقایسه سامانه‌ی واقعی در حال کار و سامانه‌ی سالم پرداخت. در این مسیر روش‌های مختلفی وجود دارد که به‌طور خلاصه از سه روش اصلی نشأت می‌گیرند. این سه روش با عنوان تخمین پارامتر، معادلات توازن و رؤیتگر حالت شناخته شده هستند. در روش عیب‌یابی به کمک تخمین پارامتر به صورت بر خط، به سنجش سیگنال‌ها و تخمین پارامترهایی مشخصی از سامانه پرداخته می‌شود که طبیعی است با تغییر این پارامترها به تشخیص عیب پرداخته می‌شود. در بررسی این تغییرات ۲ معیار اصلی وجود دارند که این معیارها شامل بررسی گذر از آستانه و بررسی روند تغییرات می‌شوند که در هر یک از سامانه‌ها با توجه به ماهیت متغیر از آن‌ها استفاده می‌کنند. در روش‌های بر مبنای رؤیتگر با استفاده از یک یا چند رؤیتگر که حالات سامانه را تخمین می‌زنند اقدام به مقایسه مقادیر واقعی و مقادیر اندازه‌گیری شده می‌نمایند. این روش خود به دو دسته قابل تقسیم است که شامل تخمین حالات (اگر

1. Residual Signal

پیچیده دارد که به دست آوردن آن دشوار است. مهم‌ترین مزیت‌های روش مبتنی بر سیگنال عدم استفاده از مدل ریاضی و سادگی آن هستند. نقطه ضعف این روش مقاوم نبودن نسبت به تغییرات پارامترها است. در بیشتر صنایع برای تشخیص عیب و پایش وضعیت از روش‌های مبتنی بر سیگنال استفاده می‌شود. رایج‌ترین سیگنال برای تشخیص عیب پمپ، سیگنال ارتعاش است. البته امروزه با توجه به هزینه‌ی بالای حسگرهای ارتعاشی سیگنال‌های الکتریکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در صنایع با توجه به دقت مورد نظر و هزینه‌ها، روش عیب‌یابی مطلوب را انتخاب می‌کنند.

### ۳. نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد گسترده‌ی الکتروپمپ و سامانه‌های دوار در صنایع با هزینه یا حساسیت بالا، نیاز به قابلیت اطمینان بالا در عملکرد، بسیار حائز اهمیت است. روش‌های مختلفی برای نگهداری و پایش وضعیت این دستگاه‌ها وجود دارد که هر یک مزایا و معایب خود را دارند. روش‌های مبتنی بر مدل بسیار دقیق هستند و می‌توانند رفتار دینامیکی سامانه را به خوبی شرح دهند. ولی مهم‌ترین مشکل این روش دقت مدل دینامیکی استخراج شده است. مدل دینامیکی دقیق نیاز به روابط ریاضی بسیار

زده می‌شوند. در سامانه‌ی مذکور عیوب مختلفی نظیر خوردگی در شکاف محفظه‌ی ورودی سیال، خوردگی خروجی پروانه و ... مورد بررسی قرار گرفته است. در این سامانه با استفاده از روش تخمین پارامتر روند تغییر پارامترهای مذکور در حالت سالم و معیوب مورد مقایسه قرار گرفته است. در اثر وقوع هرگونه عیب در سامانه به دلیل عوض شدن عملکرد سامانه این پارامترها دچار تغییرات می‌شوند. این الگوریتم، تغییرات پارامترها را در اثر هر کدام از عیوب مذکور، مورد بررسی قرار می‌دهد و با توجه به این تغییرات اقدام به عیب‌یابی می‌نماید.

### تکاورنگاه

۱. دکتر جواد پشتان، دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. مهندس مهدی افشاری، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

### منابع

1. Tuzson, John. Centrifugal pump design. John Wiley & Sons, 2000.
2. Huijie, Zhu, et al. "Fault diagnosis of hydraulic pump based on stacked autoencoders." Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2015 12th IEEE International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2015.
3. Cdina, M. "Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound." Mechanical Systems and Signal Processing 17.6 (2003): 1335-1347.
4. Hast, Daniel, Rolf Findeisen, and Stefan Streif. "Detection and isolation of parametric faults in hydraulic pumps using a set-based approach and quantitative-qualitative fault specifications." Control Engineering Practice 40 (2015): 61-70.
5. McInerny, Sally A., and Yi Dai. "Basic vibration signal processing for bearing fault detection." IEEE Transactions on education 46.1 (2003): 149-156.
6. Isermann, Rolf. "Model-based fault-detection and diagnosis-status and applications." Annual Reviews in control 29.1 (2005): 71-85.
7. C. S. Kallesoe, V. Cocquempot, and R. Izadi-Zamanabadi, "Model based fault detection in a centrifugal pump application," Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol ,14 .
8. R. Isermann, Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems: Springer Science & Business Media, 2011.

