

# نگهداری و تعمیرات پیشگویانه در ایستگاههای پمپاژ آب

مهدی بهزاد<sup>۱</sup> علی قاسمی<sup>۲</sup> علیرضا ابراهیمی<sup>۳</sup> عباس روحانی بسطامی<sup>۳</sup>

(دریافت ۸۴/۹/۱۵ پذیرش ۸۵/۵/۱۵)

## چکیده

این مقاله به بررسی روش نگهداری و تعمیرات پیشگویانه و کنترل شرایط در مورد ایستگاههای پمپاژ آب می‌پردازد. روش کار، اندازه‌گیری ارتعاشات در محل‌های مناسب و بررسی روند این ارتعاشات و طیفهای فرکانسی آنهاست. با استفاده از روند ارتعاشات، بروز عیب در ماشین‌آلات قابل تشخیص است. طیفهای فرکانسی به دست آمده نیز گویای نوع عیب به وجود آمده هستند. در این مقاله نتایج عملی پیاده‌سازی چنین سیستمی در یکی از ایستگاههای پمپاژ آب تهران ارائه گردیده است. با استفاده از این روش، عیوب موجود، قبل از رسیدن به حالت بحرانی تشخیص داده شده و تعمیرات لازم بر روی ماشین‌آلات انجام می‌شود. استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی در تعیین وضعیت و عیب‌یابی الکتروپمپ‌های شرکت آب و فاضلاب استان تهران برای اولین بار به صورت پایلوت آغاز شده و با توجه به نتایج مثبت آن، می‌توان به تعمیر آن در سایر شرکتها پرداخت.

**واژه‌های کلیدی:** نگهداری و تعمیرات پیشگویانه، ارتعاشات، عیب‌یابی، وضعیت‌سنجی، الکتروپمپ.

## Predictive Maintenance in Water Pump Stations

Mehdi Behzad<sup>1</sup>, Ali Ghasemi<sup>2</sup>, Ali Reza Ebrahimi<sup>3</sup>, Abbas Rohani Bastami<sup>3</sup>

(Received Dec. 6, 2005 Accepted Aug. 6, 2006)

### Abstract

In this paper predictive-based maintenance and condition-based maintenance have been studied for water pump stations. Measurements of vibrations in suitable places, analysis of the vibration trend and spectrums have been dealt with in details. Using the trend of vibrations, existence of a fault in machinery can be detected. The vibration spectrums can also be used in fault diagnosis. Furthermore, in this paper the practical results of using a condition-based monitoring system in one of Tehran's water pump stations has been presented. Using this method, the existing faults have been detected before the critical situations and the proper repair has been done on the machinery. Using vibration signals for condition monitoring and fault diagnosis started for the first time at Tehran Water and Wastewater Company. Promising results of this method can be used for other water and wastewater companies.

**Keywords:** Predictive Maintenance, Vibrations, Fault Diagnosis, Condition Monitoring, Electro Pump.

۱- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف،

m\_behzad@sharif.edu

۲- معاون بهره‌برداری شرکت آب و فاضلاب تهران

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Sharif University of Technology, m\_behzad@sharif.edu

2- Production Chief Executive of Tehran Water and Wastewater Company

3- Ph.D. Student of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology

نگهداری ماشین آلات صنعتی از دیرباز از جمله مسائل مهم در صنعت بوده است. هزینه نگهداری و تعمیر در صنعت به طور معمول ۵ تا ۶ درصد سرمایه‌های ثابت می‌باشد و در صنایع سنگین به ۱۲ درصد هم می‌رسد. هزینه مربوط به نگهداری و تعمیر از دو بخش تشکیل می‌شود. بخشی از این هزینه‌ها مربوط به تجهیزات مورد نیاز، لوازم تعویض شده و نیروی کار مربوطه می‌باشد. اما بخش دیگر که اغلب به آن توجه چندانی نمی‌شود، هزینه مربوط به عدم تولید می‌باشد. در دوره تعمیرات به علت متوقف شدن دستگاه‌ها یا بخشی از آنها، تولید واحد صنعتی متوقف شده یا کاهش می‌یابد. کاهش یا توقف در تولید به طور میانگین، دو سوم هزینه نگهداری و تعمیرات واحدهای صنعتی را شامل می‌شود. این مسئله در مواردی که توقف ماشین آلات به طور پیش‌بینی نشده رخ می‌دهد، هزینه بیشتری به واحد صنعتی تحمیل می‌کند. یک تحقیق انجام گرفته در ایالات متحده نشان داد که هزینه ناشی از توقف ناخواسته ماشین آلات در این کشور، گاهی به ۳۰ تا ۴۰ درصد سود خالص واحدهای صنعتی می‌رسد [۱].

برای اساس، همواره یک روش و استراتژی نگهداری و تعمیرات که بتواند از توقف ناخواسته و پیش‌بینی نشده ماشین آلات جلوگیری کند، مورد توجه بوده است. روشهای مختلف نگهداری و تعمیرات عبارت‌اند از [۲]:

۱- نگهداری و تعمیر عکس‌العملی: در این روش ماشین تا زمانی که از کار باز نایستد، مورد استفاده قرار می‌گیرد و هر زمان که کارکرد ماشین متوقف شد، تعویض یا تعمیر می‌گردد؛

۲- نگهداری و تعمیر دوره‌ای (نگهداری پیشگیرانه): در این روش نگهداری، به منظور جلوگیری از خرابی نابهنگام ماشین آلات، از بازرسی و تعمیرات در دوره‌های زمانی مشخص استفاده می‌شود؛

۳- نگهداری و تعمیر مبتنی بر وضعیت پیش‌بینانه (CBM):<sup>۱</sup> در این روش نگهداری، وضعیت و نحوه کارکرد ماشین، مشخص‌کننده زمان مناسب برای تعمیر یا تعویض اجزای آن می‌باشد؛

۴- نگهداری و تعمیر بازدارنده: در این روش که جدیدترین روش نگهداری نیز هست، علاوه بر پیش‌بینی خرابی دستگاه، با کمک داده‌برداری از وضعیت دستگاه، سعی می‌شود که علل بروز عیوب و مشکلات مختلف نیز فهمیده شود و با سعی در برطرف کردن آن عوامل، از بروز مجدد آن عیوب جلوگیری شده و عمر دستگاه طولانی‌تر شود.

در نگهداری پیش‌بینانه، یک پارامتر مهم که معیاری از عملکرد و سلامت دستگاه باشد، مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و با بررسی این پارامتر، وضعیت دستگاه تعیین می‌شود. به این کار

وضعیت‌سنجی یا CM<sup>۲</sup> نیز گفته می‌شود. بسته به پارامترهای متنوعی که می‌توان به عنوان معیار سلامت ماشین انتخاب کرد، روشهای CM نیز متنوع‌اند. انتخاب روش مورد استفاده در CM، تابع نوع ماشین، شرایط کارکرد، شرایط محیطی، نوع وسایل اندازه‌گیری و ... می‌باشد. برخی از روشهای CM عبارت‌اند از: آنالیز ارتعاشات، آنالیز روغن، آنالیز دما، آنالیز کارآیی، آنالیز صدا و آنالیز جریان الکتریکی [۳].

آنالیز ارتعاشات در میان روشهای CM نسبت به سایر روشها دارای اهمیت و کارآیی بیشتری است. در تکنیک آنالیز ارتعاشات، میزان ارتعاشات ماشین با استفاده از حسگرهای مخصوص اندازه‌گیری می‌شود [۴]. به این منظور می‌توان یکی از پارامترهای جابجایی، سرعت و یا شتاب ارتعاشات را اندازه‌گیری کرد. ضمناً تصمیم‌گیری در انتخاب پارامتر اندازه‌گیری بایستی با دقت و با توجه به شرایط کاری ماشین و اهداف اندازه‌گیری انجام شود. آنالیز ارتعاشات می‌تواند به منظور عیب‌یابی نیز در ماشین‌ها مورد استفاده قرار گیرد. اکثر مشکلات مکانیکی ماشین‌های دوار، به صورت علائم ارتعاشی و یا تغییر در مشخصه‌های ارتعاشی سیستم ظاهر می‌گردد. از طرف دیگر هر عیب یا مشکل مکانیکی، علائم ارتعاشی مخصوص به خود ایجاد می‌کند. به این ترتیب می‌توان با تحلیل ارتعاشات ماشین، به مشکلات و عیوب آن پی برد. عیوب عمده‌ای که در ماشین آلات مشاهده می‌گردند و علائم ارتعاشی ایجاد می‌کنند، عبارت‌اند از: نامیزانی، عدم هم‌محوری، خمیدگی محور<sup>۳</sup>، خروج از مرکز، لقی مکانیکی، سایش روتور، ترک محور، مشکلات یاتاقان‌های ژورنال، معایب یاتاقان‌های غلتشی، کاویتاسیون و مسایل مربوط به جعبه‌دنده‌ها.

به کارگیری روشهای نگهداری پیش‌بینانه (CM)، می‌تواند تا حد زیادی به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمک کند. در بسیاری از فعالیتهای تولیدی و اجرایی، نگهداری و تعمیرات به عنوان مهم‌ترین عامل هزینه‌ساز ولی قابل کنترل برای افزایش بهره‌وری شناخته می‌شود. بر اساس برآوردهای پذیرفته شده جهانی، با اجرای برنامه‌های CM، هزینه نگهداری و تعمیرات تا ۲۵ درصد کاهش خواهد یافت و این در حالی است که صرفه‌جویی‌های ناشی از پیشگیری از کاهش تولید تا دو برابر این میزان خواهد بود که در این برآورد در نظر گرفته نشده است.

متأسفانه در حال حاضر استراتژی نگهداری و تعمیرات در اکثر زیر مجموعه‌های آب و فاضلاب کشور، نگهداری و تعمیرات عکس‌العملی است که استراتژی دهه ۱۹۴۰ در دنیا می‌باشد. البته مجموعه آب و فاضلاب کشور در حال حاضر در حال انجام

<sup>2</sup> Condition Monitoring (CM)

<sup>3</sup> Shaft

<sup>1</sup> Condition Based Maintenance

نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در چند شهر به صورت پایلوت است که نشان از آغاز حرکتی جهت بهبود وضعیت نگهداری و تعمیرات در مجموعه آب و فاضلاب کشور دارد [۵ و ۶].

در این مقاله به بررسی نتایج حاصل از اجرای CM بر روی یکی از ایستگاههای پمپاژ آب تهران پرداخته شده است. پیاده سازی استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه که یکی از جدیدترین روشهای تعمیرات و نگهداری در دنیاست، برای اولین بار در مجموعه آبفای کشور در این ایستگاه در حال انجام است. روش انجام کار و نتایج به دست آمده در ادامه ارائه گردیده است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- پایش ارتعاشات

پایش ارتعاشات در یک واحد صنعتی به دو روش همیشگی<sup>۱</sup> و دوره‌ای<sup>۲</sup> قابل انجام است. در روش همیشگی، حسگرهای ارتعاشی در محل مناسب، به صورت دائمی نصب می‌شوند. با کابل‌کشی مناسب سیگنال ارتعاشی که به صورت ولتاژ و یا جریان است به بخش اصلی سیستم یعنی بخش اخذ داده منتقل شده و مورد پردازش و بررسی قرار می‌گیرد.

در پایش ارتعاشات به روش دوره‌ای، اندازه‌گیری ارتعاشات در فاصله‌های زمانی مشخص انجام می‌شود. اجزای اصلی مورد نیاز در این روش عبارت‌اند از: حسگر، دیتاکالکتور و نرم افزار کامپیوتری. در مقاله حاضر از این روش دوره‌ای، برای بررسی ارتعاشات استفاده شده است.

یک استراتژی پایش ارتعاشات، از دو مرحله اساسی تشکیل شده است. این مراحل عبارت‌اند از:

الف- جمع آوری داده‌ها؛

ب- تحلیل و بررسی داده‌ها.

پس از جمع آوری داده‌ها با دنبال کردن تاریخچه ارتعاشات ماشین، داده‌های به دست آمده روی نمودار رسم شده و تغییرات ایجاد شده در کارکرد دستگاه بررسی می‌شوند. در صورت مشاهده یک روند افزایشی در میزان ارتعاشات می‌توان پیش‌بینی کرد که چه زمانی ماشین به تدریج به خرابی نزدیک می‌شود.

برای اندازه‌گیری ارتعاشات سه روش وجود دارد: ۱- اندازه‌گیری ارتعاشات مطلق پوسته (یاتاقان): ۲- اندازه‌گیری ارتعاشات مطلق محور و یا ۳- اندازه‌گیری ارتعاشات نسبی محور.

انتخاب یکی از این روشها به نوع یاتاقان، سرعت محور، نسبت جرمی محور و پوسته، پاسخ به عیوب مکانیکی و هزینه ابزار دقیق و سهولت نصب بستگی، دارد. همچنین باید محدودیتهای حسگرهای موجود در رابطه با پاسخ فرکانسی، دوام و مقاومت در مقابل عوامل محیطی مانند درجه حرارت، رطوبت، مواد شیمیایی، ارتعاشات جانبی، شوک و غیره را نیز در نظر داشت. به عنوان مثال شکل ۱-الف، ماشینی را نشان می‌دهد که دارای یاتاقان غلتشی می‌باشد.

در این حالت اندازه‌گیری ارتعاشات نسبی محور به یاتاقان فقط نمایانگر لقی موجود در سیستم است و لازم است ارتعاشات مطلق محور و یا ارتعاشات مطلق یاتاقان را اندازه‌گیری نمود. شکل ۱-ب، محور سبکی را نشان می‌دهد که در محفظه سنگین صلبی قرار گرفته و بر روی لرزه‌گیر نصب شده است. در این حالت ارتعاش مطلق محور و یا ارتعاش نسبی محور، هر یک از آن دو انتخاب مناسبی می‌باشند. شرایط سومی که ممکن است اتفاق بیفتد در شکل ۱-ج، نشان داده شده است. در این حالت پوسته ماشین یا تکیه گاه به طور نسبی دارای سختی کم یا متوسط می‌باشد. انتخاب مناسب در این حالت نیز اندازه‌گیری ارتعاشات یاتاقان و یا ارتعاشات مطلق محور می‌باشد. برای بیان سطح ارتعاشات یک ماشین می‌توان از پارامترهای جابجایی، سرعت و یا شتاب استفاده کرد. هر چند ظاهراً استفاده از هر یک از سه پارامتر فوق صحیح به نظر می‌رسد، ولی در عمل پارامتر به کار رفته برای بیان سطح ارتعاشات تأثیر به سزایی در کسب نتایج مفید از داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. انتخاب پارامتر اندازه‌گیری با استفاده از معیار هدف می‌تواند به شرح زیر بیان گردد:

• اندازه‌گیری شتاب: وقتی که نیرو، بار و یا تنش باید تحلیل شود و نیرو با شتاب متناسب باشد (همواره این گونه نیست)، از سیگنال شتاب استفاده می‌شود؛

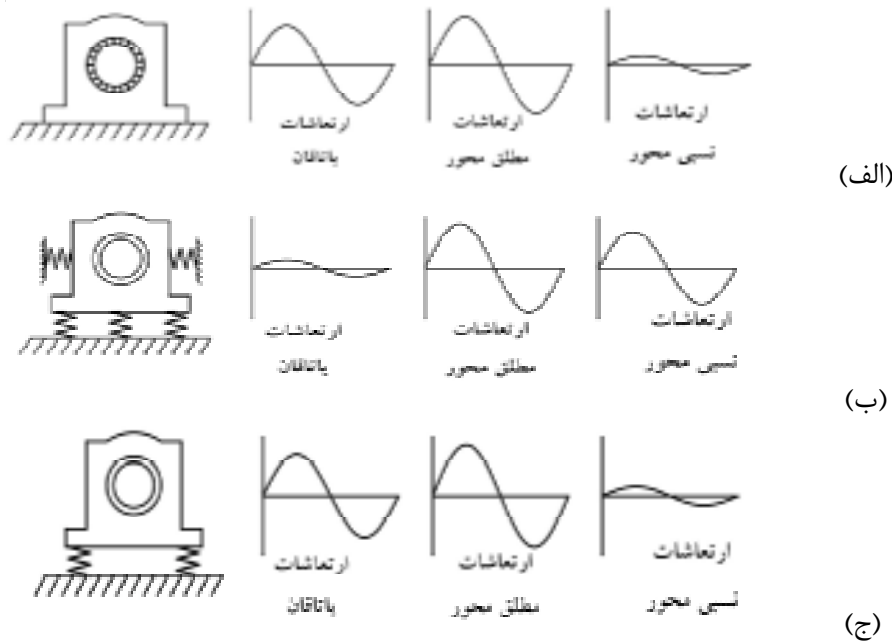
• اندازه‌گیری سرعت: وقتی که اندازه‌گیریهای ارتعاشات باید با اندازه‌گیریهای آکوستیک مرتبط شوند. زیرا فشار صوتی با سرعت سطح مرتعش متناسب است؛

• اندازه‌گیری جابجایی: وقتی که دامنه جابجایی دارای اهمیت است. مثلاً وقتی که قسمتهای مرتعش نباید با هم برخورد کنند یا اندازه جابجایی از یک حد مشخص نباید بیشتر باشد. همچنین وقتی که جابجایی نشانگر تنشی باشد که باید تحلیل گردد.

معیار دیگری که در تعیین پارامتر مناسب برای اندازه‌گیری باید مد نظر قرار بگیرد، مربوط به خاصیت ذاتی طیفهای جابجایی، سرعت و شتاب است. اطلاعات موجود در شکل ۲ به روشنی این

<sup>1</sup> Online

<sup>2</sup> Offline



شکل ۱- مقایسه ارتعاش مطلق محور، نسبی محور و مطلق پوسته یاتاقان برای (الف) یاتاقان های غلتشی (ب) یاتاقان ژورنال (ج) پوسته یاتاقان برای ماشینی که پوسته یا تکیه‌گاه با سختی کمی دارد

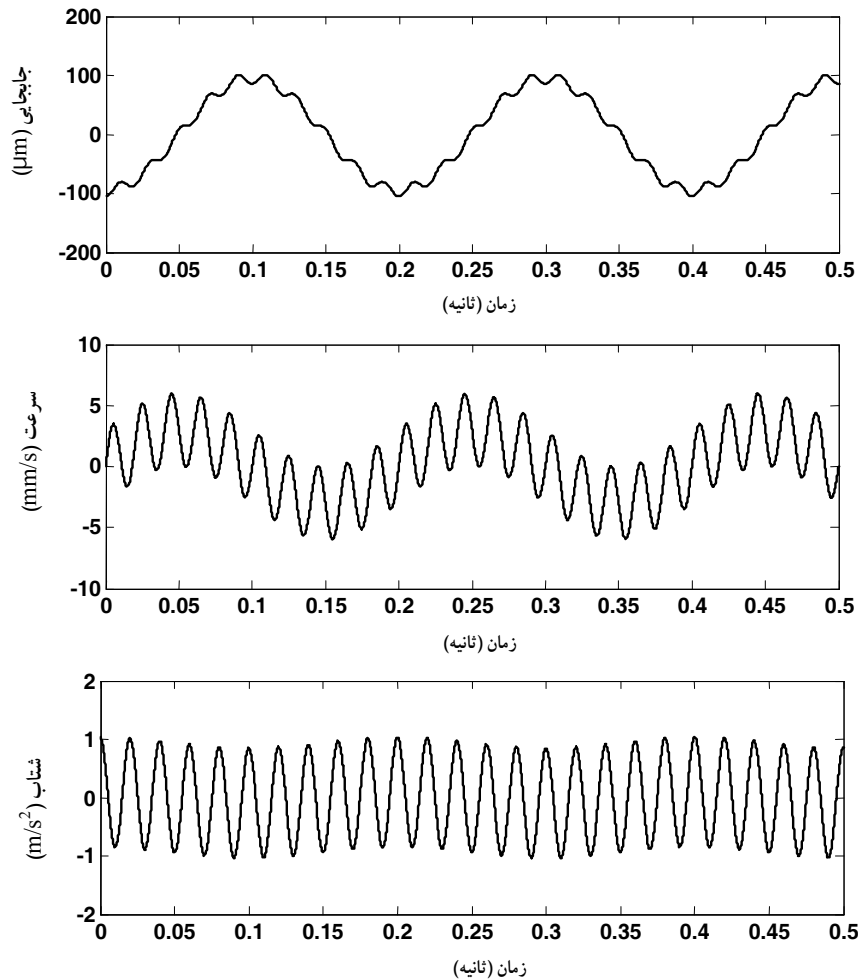
دینامیکی لوله‌ها (تکیه‌گاهها و قیدها)، پاسخ سازه‌ای تکیه‌گاهها (فونداسیون)، به کارگیری در شرایط خارج از محدوده طراحی، سرعت و جریان نامناسب، ارتفاع خالص مکشی مثبت (NPSH)<sup>1</sup> ناکافی، ورود هوا به پمپ، اثرات متقابل پمپ با تشدیدهای لوله‌کشی، ناپایداری‌های هیدرولیکی، تشدیدهای آکوستیکی (نوسانات فشار)، ضربه قوچ، مشکلات توزیع جریان، گردش مجدد (سیرکولاسیون مجدد)، کاویتاسیون، توربولانس (تحریکهای ناشی از جریان)، سرعت بالای جریان، سرعتهای بحرانی، انتخاب نامناسب یاتاقان و آب‌بند، ناپایداری روتور، تشدیدهای ناشی از پرها و تشدید در پوسته و پدستال یاتاقان‌ها. شناسایی اغلب عیوب فوق از روی طیف فرکانسی ارتعاشات اندازه‌گیری شده در محل‌های مناسب، قابل تشخیص است. محققان زیادی به بررسی مشخصه هر عیب در طیف فرکانسی ارتعاشات پرداخته‌اند [۷]. به عنوان مثال می‌توان گفت ارتعاشات ناشی از نامیزانی، در فرکانس  $1 \times \text{RPM}$  (یک برابر سرعت دوران محور) ظاهر می‌شوند. یا عدم هم‌محوری بین دو محور در محل اتصال کوپلینگ سبب پیدایش مؤلفه‌هایی با هارمونیک  $2 \times \text{RPM}$  (دو برابر سرعت دوران محور) و  $3 \times \text{RPM}$  (سه برابر سرعت دوران محور) می‌شود، هر چند مؤلفه  $1 \times \text{RPM}$  همچنان حضور دارد. سایر عیوب نیز مشخصه ارتعاشی

مسئله را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان گفت جابجایی ذاتاً تمایل به تأکید بر فرکانس‌های پایین ارتعاشی دارد در حالی که شتاب بر فرکانس‌های بالا، تأکید بیشتری دارد، به نظر می‌رسد که سرعت، اهمیت یکسانی برای پهنای فرکانسی گسترده‌ای از ارتعاشات در نظر می‌گیرد. لذا در ماشین‌هایی که عیوب متداول سبب ارتعاش در فرکانس پایین می‌شود، اندازه‌گیری جابجایی معیار خوبی از وضعیت ماشین به حساب می‌آید. اما در ماشین‌هایی که فقط به مشکلات فرکانس بالا دچار می‌شوند، اندازه‌گیری شتاب مناسب‌تر است. در ماشین‌هایی که مشکلات مکانیکی متنوعی دارند اندازه‌گیری سرعت، مناسب است.

## ۲-۲- منابع ارتعاش در پمپ‌های آب

ارتعاش پمپ‌ها شامل ارتعاش پوسته، محور، یاتاقان‌ها و لوله‌های هادی سیال می‌باشد. مشکلات پیش آمده در کارکرد سیستم پمپ، اغلب یکی از این المان‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین در اندازه‌گیری ارتعاش، لازم است که این نقاط روی مجموعه پمپ به عنوان نقاط اندازه‌گیری انتخاب شوند. به علت برهم‌کنش بین اجزای مختلف در پمپ، عوامل ارتعاشی در پمپ‌ها از تنوع زیادی برخوردار هستند. برخی از عوامل متداول که سبب بروز ارتعاش می‌گردند به شرح زیر می‌باشند: نامیزانی، عدم هم‌محوری، سایش در آب‌بندها، تغییر شکل پوسته در اثر بار وارده از لوله‌ها، پاسخ

<sup>1</sup> Net Positive Suction Head



شکل ۲- مقایسه سیگنال‌های جابجایی، سرعت و شتاب برای یک سیگنال ارتعاشی مرکب از دو موج ۵ و ۵۰ هرتز

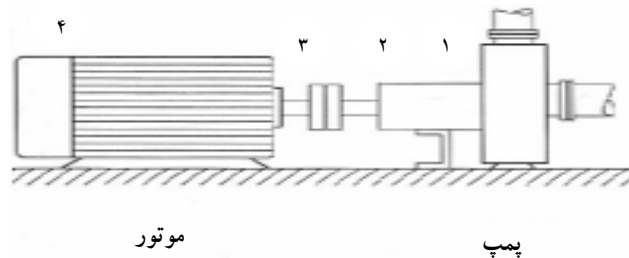
عیوب مختلف الکتروپمپ‌ها در مضارب مختلفی از دور کارکرد، نظیر مضارب یک، دو، سه، چهار و در فرکانس گذر پره‌ها رخ می‌دهد. الکتروپمپ‌های موجود ۲۵ هرتز هستند. بنابراین عیوب موجود در این نوع از الکتروپمپ‌ها ممکن است در فرکانس‌های بین ۲۵ تا ۲۰۰ هرتز و حتی بالاتر نیز ظاهر شوند. این محدوده فرکانسی محدوده گسترده‌ایست لذا پارامتر سرعت که قابلیت نشان دادن فرکانس‌های بالا و پایین را به صورت همزمان دارد، برای تشخیص انواع عیوب محتمل، از بقیه پارامترها بهتر خواهد بود. به منظور تشخیص بهتر عیوب احتمالی و وضعیت سنجی دقیق‌تر، اندازه‌گیری بر روی هر یاتاقان در سه جهت افقی، عمودی و محوری انجام پذیرفته شد. این اندازه‌گیریها بر روی هر دو یاتاقان پمپ‌ها و هر دو یاتاقان موتورها انجام پذیرفت. علاوه بر این، به منظور برآورد اثر متقابل ارتعاشی موتور-پمپ‌ها بر یکدیگر بر روی پایه هر موتور و هر پمپ نیز اندازه‌گیری میزان ارتعاشات صورت گرفت.

مخصوص به خود را دارند. با استفاده از این مشخصه‌ها می‌توان نسبت به تشخیص عیوب در الکتروپمپ‌ها مبادرت ورزید.

### ۳- مطالعه موردی

#### ۳-۱- اندازه‌گیری ارتعاشات در ایستگاه پمپاژ آب یوسف‌آباد

ایستگاه پمپاژ آب یوسف‌آباد شامل شش الکتروپمپ عملیاتی است. این الکتروپمپ‌ها شامل سه الکتروپمپ موسوم به تلمبه‌خانه قدیم و سه الکتروپمپ موسوم به تلمبه‌خانه جدید می‌باشند. هر یک از الکتروپمپ‌های ذکر شده در هر تلمبه‌خانه به ترتیب از شماره یک تا سه شماره‌گذاری شده‌اند. در این الکتروپمپ‌ها، یاتاقان‌ها از نوع غلطشی (بلبرینگی یا رولربیرینگی) هستند لذا می‌توان گفت که در محل یاتاقان، ارتعاشات محور تقریباً برابر ارتعاشات پوسته یاتاقان است. لذا همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، اندازه‌گیری ارتعاشات بر روی پوسته یاتاقان قابل قبول و بیانگر ارتعاشات محور است.



شکل ۳- نحوه شماره‌گذاری یاتاقان‌های الکتروپمپ‌ها

احتیاطات لازم را به عمل آورد و در اسرع وقت اقدام به تعمیر ماشین نمود. ارتعاشات فراتر از عدد چهارم خطرناک بوده و باید فوراً ماشین را متوقف نموده و تعمیرات لازم را انجام داد. جزئیات بیشتر مربوط به نحوه طبقه‌بندی ماشین‌آلات و سطوح مجاز ارتعاشی در متن استاندارد قابل دسترسی است.

پس از چند اندازه‌گیری و بر مبنای اطلاعات جمع‌آوری شده، وضعیت یاتاقان‌های الکتروپمپ‌ها، مطابق اطلاعات ارائه شده در جدول ۱ ارزیابی گردید. همان‌گونه که در این جدول ملاحظه می‌شود، الکتروپمپ‌های موجود در تلمبه‌خانه جدید در ناحیهٔ اخطار<sup>۱</sup> و خطر<sup>۲</sup> قرار داشتند. هر چهار یاتاقان الکتروپمپ شماره ۱ در ناحیهٔ اخطار بودند. طیفهای فرکانسی به دست آمده نشان می‌دهند که فرکانس غالب ارتعاشی، مربوط به فرکانس گذر پره است (شکل ۴-الف) و لذا میزان نامناسب ارتعاشات ناشی از عدم کارکرد صحیح پمپ می‌باشد. یاتاقان شماره ۱ از الکتروپمپ شماره ۲ و یاتاقان‌های ۱ و ۲ از الکتروپمپ شماره ۳ نیز دارای وضعیت مشابهی بودند.

یاتاقان‌های ۲ و ۳ الکتروپمپ ۲ جدید نیز در ناحیهٔ خطرناک واقع شده بودند و ادامهٔ کارکرد آنها سبب آسیب‌دیدگی ماشین می‌شد. با توجه به طیفهای فرکانسی به دست آمده به نظر می‌رسد که نامیزانی یا عدم هم راستایی محورهای موتور و پمپ موجب به وجود آمدن ارتعاشات بالا گردیده بود (شکل ۴-ب).

پس از اعلام وضعیت، مسئولان، اقدام به تعمیر الکتروپمپ شماره ۲ تلمبه‌خانه جدید نمودند. پس از انجام این تعمیر، اندازه‌گیری ارتعاشات، بهبود وضعیت این ماشین را به خوبی تأیید نمودند.

شکل ۵ روند ارتعاشات اندازه‌گیری شده در محل یکی از یاتاقان‌های این الکتروپمپ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشهود است، ابتدا ارتعاشات یک روند صعودی را طی کرده و به

همان‌طور که ملاحظه می‌شود شکل ۳ طریقهٔ شماره‌گذاری یاتاقان‌ها را نشان می‌دهد.

برای اندازه‌گیری ارتعاشات از دستگاه Vibrotest 60 استفاده گردیده است. نوع حسگرهای مورد استفاده شتاب سنج پیزوالکتریک مدل Schenck-AS065 بوده است. اجرای CM بر روی ماشین‌آلات ایستگاه پمپاژ یوسف آباد، از خردادماه سال ۱۳۸۴ آغاز گردید و در فروردین ماه سال ۱۳۸۵ به اتمام رسید. در این مدت ۱۸ مورد اندازه‌گیری ارتعاشی بر روی ماشین‌آلات و در نقاط تعیین شده صورت پذیرفت. پس از هر مورد اندازه‌گیری، داده‌های به دست آمده با داده‌های قبلی مقایسه شده و در صورت فراتر رفتن مقادیر ارتعاشات از مقادیر استاندارد یا اندازه‌گیریهای قبلی بر روی خود این ماشین‌آلات، طیفهای فرکانسی ماشین مورد بررسی قرار گرفت، تا علت بالا رفتن ارتعاشات مشخص گردد. پس از مشخص شدن علت افزایش ارتعاشات، مراتب به کارفرما اطلاع داده شده تا نسبت به اجرای تعمیرات لازم اقدام نمایند. پس از انجام تعمیرات مجدداً اندازه‌گیری ارتعاشات بر روی ماشین‌آلات صورت پذیرفت تا مشخص گردد که آیا تعمیرات انجام شده در جهت کاهش ارتعاشات، مؤثر بوده یا خیر. بعد از انجام این اندازه‌گیری، مجدداً نتیجهٔ تعمیرات انجام شده به شرکت آب و فاضلاب اعلام گردید.

### ۳-۲- نتایج به دست آمده از اندازه‌گیریها

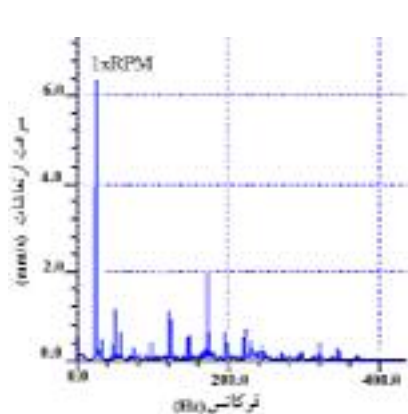
در ایستگاه مورد بررسی، ارزیابی ماشین‌آلات مطابق با استاندارد ISO 2372 بوده و ماشین‌آلات در کلاس سه (Class III) طبق تعریف این استاندارد طبقه‌بندی شده‌اند. برای هر یک از انواع ماشین‌آلات ارائه شده در این استاندارد، چهار عدد به عنوان حدود ارتعاشات ارائه گردیده است. عدد اول بیانگر حد ارتعاشاتی است که اگر ارتعاشات ماشین کمتر از آن باشد، وضعیت کارکرد ایده‌آل است. اگر میزان ارتعاشات بین عدد اول و دوم باشد وضعیت ماشین قابل قبول است و کارکرد آن بدون نیاز به تعمیرات مانعی ندارد. بین عدد سوم و چهارم ناحیهٔ اخطار است. یعنی در این محدوده باید

<sup>1</sup> Alarm  
<sup>2</sup> Danger

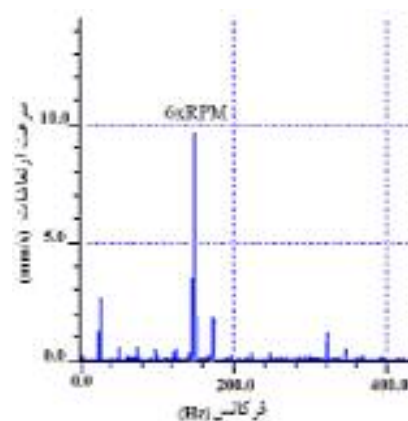
جدول ۱- وضعیت یاتاقان‌های الکتروپمپ‌ها بر اساس استاندارد ISO 2372

تلمبه خانه	شماره الکتروپمپ	وضعیت ارتعاشی یاتاقان‌ها			
		یاتاقان ۱	یاتاقان ۲	یاتاقان ۳	یاتاقان ۴
تلمبه خانه قدیم	شماره ۱	A	B	B	B
	شماره ۲	B	B	B	B
	شماره ۳	A	A	A	A
تلمبه خانه جدید	شماره ۱	C	C	C	C
	شماره ۲	C	D	D	C
	شماره ۳	C	C	B	B

در این جدول، A به معنای خوب، B به معنای قابل قبول، C به معنای اخطار و D به معنای خطرناک است

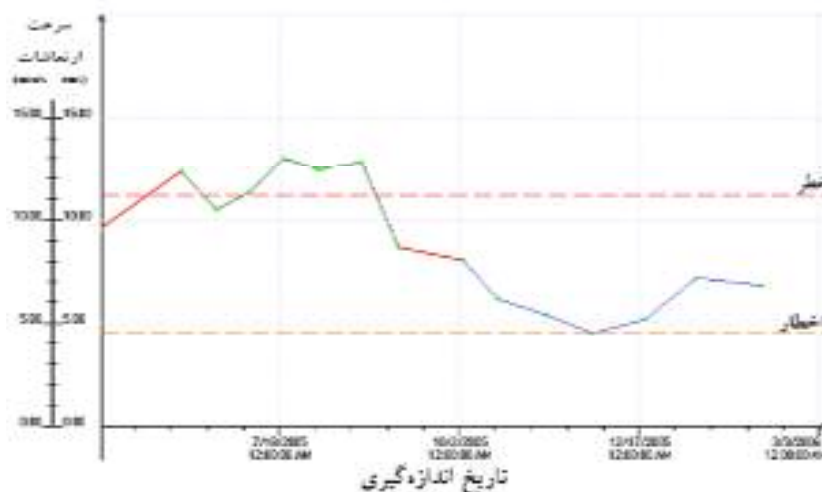


(ب)

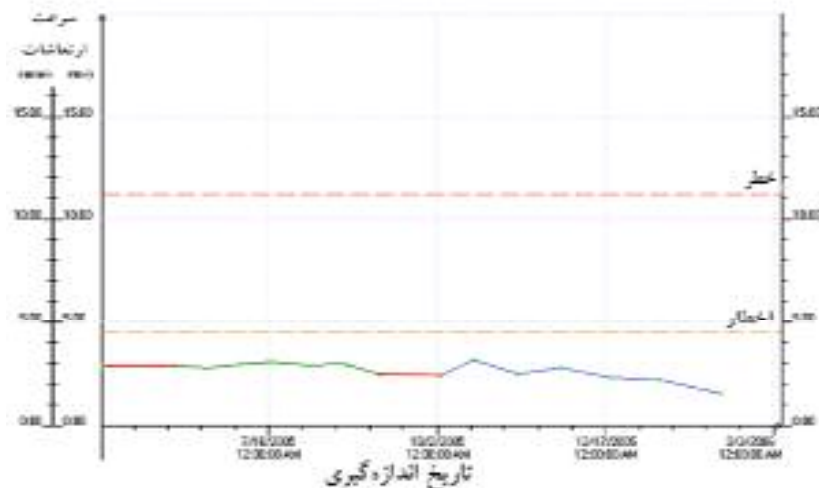


(الف)

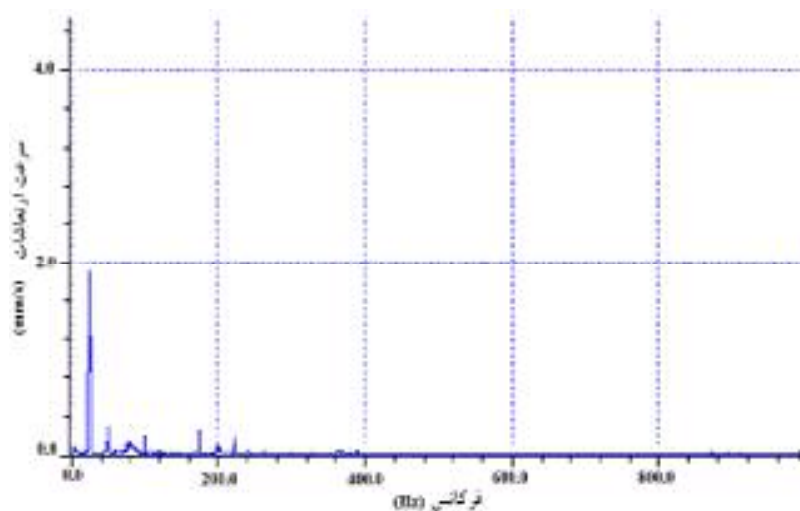
شکل ۴- نمونه‌ای از طیف‌های فرکانسی اندازه‌گیری شده در یاتاقان‌ها (الف) الکتروپمپ شماره ۱ جدید و (ب) الکتروپمپ شماره ۲ جدید



شکل ۵- روند ارتعاشات در یاتاقان ۳ از الکتروپمپ شماره ۲ تلمبه خانه جدید



شکل ۶- روند ارتعاشات در یاتاقان ۲ از الکتروپمپ شماره ۱ تلمبه خانه قدیم



شکل ۷- نمونه‌ای از طیفهای فرکانسی اندازه‌گیری شده در یاتاقان ۲ از الکتروپمپ شماره ۱ قدیم

می‌شود، اما از آنجا که نامیزانی جزء ذاتی هر سیستم مکانیکی است و رهایی کامل از اثرات آن امکان پذیر نمی‌باشد و با توجه به دامنه کم ارتعاشات، این نامیزانی مجاز شمرده شد. بنابراین الکتروپمپ‌ها در وضعیت مطلوب قلمداد شده و نیازمند تعمیر تشخیص داده نشدند

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به صورت مختصر به بررسی روشهای گوناگون نگهداری و تعمیرات و خصوصاً روش نگهداری و تعمیرات پیشگویانه پرداخته شد. نتایج آماری به دست آمده نشان می‌دهد که این روش نگهداری و تعمیرات چه از لحاظ اقتصادی و چه از لحاظ قابلیت اطمینان ماشین آلات، بر سایر روشهای نگهداری و تعمیرات

ناحیه خطرناک رسیده است. پس از اعلام اخطار توسط کارشناسان (نویسندگان مقاله) و انجام تعمیرات در دو مرحله، توسط شرکت آب و فاضلاب استان تهران، مجدداً سطح ارتعاشات پایین آمده و به وضعیت عادی بازگشت. با استفاده از این روش، خطر توقف ناگهانی ماشین و بروز خسارات سنگین از میان رفته است. نگاه مجدد به جدول ۱ نشان می‌دهد که وضعیت ارتعاشی الکتروپمپ‌های موجود در تلمبه‌خانه قدیم قابل قبول است. شکل ۶ روند ارتعاشات یکی از یاتاقان‌های مربوط به الکتروپمپ‌های تلمبه‌خانه جدید را نشان می‌دهد. همان گونه که ملاحظه می‌شود، روند ارتعاشات تقریباً ثابت بوده و در محدوده مجاز می‌باشد. شکل ۷ طیف فرکانسی ارتعاشات این یاتاقان را نشان می‌دهد. با وجود اینکه در این طیف فرکانسی، فرکانس غالب  $1 \times \text{RPM}$  مشاهده



تشخیص داده شده و با انجام تعمیرات به موقع از خرابی ناگهانی ماشین آلات و نیز بروز خسارات اقتصادی گوناگون ممانعت به عمل می‌آید.

#### ۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از مدیریت محترم عامل شرکت آب و فاضلاب، معاونت محترم بهره‌برداری آبفای تهران و کارشناسان محترم، آقایان مهندس مداح و کنعانی به دلیل همکاریهای ارزشمند و نیز تأمین بودجه این تحقیق کاربردی قدردانی به عمل می‌آید.

ارجحیت دارد. در ادامه به بررسی منابع ارتعاشات در پمپ‌های آب پرداخته شد و نحوه اجرای یک سیستم وضعیت سنجی در مورد مجموعه‌ای از پمپ‌های آب مورد بحث قرار گرفت. در بخش انتهایی نیز نتایج عملی به دست آمده از پیاده سازی چنین سیستمی در یکی از ایستگاههای پمپاژ آب ارائه گردید. پیاده سازی استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگویانه که یکی از جدیدترین روشهای تعمیرات و نگهداری در دنیاست، برای اولین بار در مجموعه آبفای کشور در این ایستگاه در حال انجام است. بر مبنای این نتایج، عیوب ماشین آلات پیش از رسیدن به مرحله بحرانی

#### ۶- مراجع

- 1- Davies, A. (1998). *Handbook of condition monitoring*, 1<sup>st</sup> Ed., Chapman and Hall Press, London.
- 2- Articles & Papers, Aladon Ltd. (1999). "Reliability-centered maintenance, an introduction." <[http://www.aladon.com/10\\_intro.html](http://www.aladon.com/10_intro.html)> (Dec. 2005).
- 3- Fitch, J. (2002). "Proactive maintenance can yield more than a ten fold saving over conventional predictive-preventive maintenance program." *J. Practicing Oil Analysis Magazine*, 11 (2), ? .
- 4- Wovk, V. (1991). *Machinery vibration : measurement and analysis*, 1<sup>st</sup> Ed., McGraw-Hill, New York.
- ۵- تشیعی، ح. (۱۳۸۴). "استقرار و پیاده‌سازی نظام نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه تأسیسات آب شرب کشور، چالشها و دستاوردهای حاصله." *سومین کنفرانس بین‌المللی نگهداری و تعمیرات، تهران*.
- ۶- نظری، ع.، عسکری، ع.، و ارجمند نیا تبریز، س. (۱۳۸۴). "تجارب استقرار سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه - PM تأسیسات آب آشامیدنی شهر گرگان." *سومین کنفرانس بین‌المللی نگهداری و تعمیرات، تهران*.
7. Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*, 2<sup>nd</sup> Ed., Elsevier science USA.