

استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی به منظور پایش کویتیشن در پمپ‌های گریز از مرکز

میرسعید صفی‌زاده^۱، سعید محمدی^۲، نوروز محمد نوری^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۱۰)

چکیده

کویتیشن یکی از مهم‌ترین عیوبی است که در پمپ‌های گریز از مرکز ظاهر گشته و موجب آسیب‌های جبران‌ناپذیری می‌شود. همچنین باعث افت هد، دبی و بازدهی پمپ‌های گریز از مرکز و خوردگی و پیتینگ در سطوح پره‌ها می‌شود. در مقاله حاضر با استفاده از تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی اندازه‌گیری شده از روی یک پمپ گریز از مرکز، نحوه طراحی سیستمی برای پایش پدیده کویتیشن در پمپ ارائه می‌گردد. در این تحقیق با استفاده از یک سامانه آزمایشی ساخته شده، به شبیه‌سازی پدیده کویتیشن در پمپ‌های گریز از مرکز پرداخته و با استفاده از سنسور شتاب‌سنج، سیگنال‌های ارتعاشی پمپ در حین بروز و گسترش کویتیشن اندازه‌گیری شده است. در نهایت با استفاده از روش‌های متداول و نوین تحلیل سیگنال در حوزه‌های زمانی، فرکانسی و زمان-فرکانسی به بررسی تأثیر بروز و گسترش کویتیشن بر پارامترهای مختلف استخراج شده از تحلیل سیگنال پرداخته شده است. تحلیل نتایج به دست آمده بیانگر مشخصه‌های حساس به پدیده کویتیشن در پمپ است که می‌تواند به منظور طراحی سیستمی برای پایش اتوماتیک کویتیشن در پمپ‌ها با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی به کار رود.

واژه‌های کلیدی: پمپ گریز از مرکز، کویتیشن، سیگنال ارتعاشی، تحلیل زمان-فرکانسی

Using Vibration Signals for Cavitation Monitoring in Centrifugal Pumps

M.S. Safizadeh, S. Mohammadi, N.M. Nouri

Mechanical Engineering Department

Iran University of Science and Technology

(Received: 03 February, 2012; Accepted: 31 May, 2014)

ABSTRACT

Cavitations phenomenon is one of the sources of inefficiently operation in a centrifugal pump and also cause reduction in capacity of the pump, decrease in head, blade erosion and corrosion, structure vibration and noise. This paper presents a method for cavitation monitoring of pumps using vibration signal analysis of a centrifugal pump. In this study, cavitation phenomena in centrifugal pump have been simulated by an experimental setup. Vibration signals of the pump have been measured during cavity inception and propagation. Finally, the cavitation effects on the parameters extracted from vibration signals using conventional and advanced signal processing methods in time, frequency and time-frequency domain have been investigated. The results indicate sensitive parameters to cavitation in pump which can be used to design a cavitation condition monitoring system based on vibration signals.

Keywords: Centrifugal Pump, Cavitation, Vibration Signal, Time-Frequency Analysis

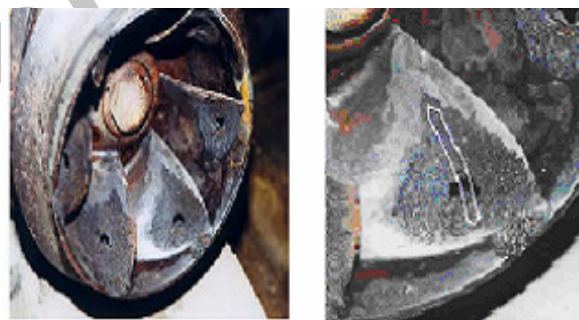
۱- استادیار (نویسنده پاسخگو): safizadeh@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

۳- دانشیار

۱- مقدمه

کویتیشن مهم‌ترین عیبی است که در پمپ‌های گریز از مرکز ظاهر شده و به آنها آسیب‌های جبران‌ناپذیر وارد می‌کند. با مکیده شدن سیال کاری به داخل پمپ و سرعت گرفتن آن فشارش کاهش می‌یابد (هنوز سیال از پره‌های پمپ انرژی دریافت نکرده است) در صورتی که در نقاطی از جریان سیال هنگام برش خوردن و ورود آن به پره‌ها فشار به زیر فشار بخار اشباع افت کند، سیال به صورت موضعی بخار شده و حباب‌هایی در جریان آن به وجود می‌آیند. هنگامی که این حباب‌ها به ناحیه پر فشار مجاور سطوح می‌رسند در اثر فشار سیال در مدت زمان بسیار کوتاهی خواهند ترکید و در نتیجه تغییر فشار شدیدی در محل ترکیدن حباب‌ها به وجود خواهد آمد. این تغییر فشار شدید مانند یک چکش هیدرولیکی کوچک عمل کرده و باعث سوراخ سوراخ شدن سطح پره‌ها می‌شود [۱]. نمونه‌هایی از این نوع خرابی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): نمونه‌هایی از خرابی‌های به وجود آمده در سطوح پره‌ها در اثر بروز کویتیشن [۲].

علاوه بر موارد ذکر شده، می‌توان علت بروز کویتیشن را هر عاملی دانست که باعث افت فشار سیال کاری به زیر فشار بخار اشباع گردد. بنابراین مواردی از قبیل افزایش دما و ویسکوزیته سیال کاری و همچنین سرعت دوران پمپ هم جزء عوامل بروز کویتیشن می‌باشند. بر اساس مقالات و کتب منتشر شده می‌توان دریافت بررسی دینامیک کویتیشن در پمپ‌های گریز از مرکز تاکنون موضوع بسیاری از تحقیقات بوده است [۷-۳]. در سال ۲۰۰۰ جنسن و دیتون^۱ از اختلاف فشار استاتیکی بین ورودی و خروجی پمپ به منظور بررسی دینامیک کویتیشن و تخمین

میزان گسترش آن استفاده نمودند [۸]. در سال ۲۰۰۳ کودینا^۲ از سیگنال‌های صوتی برای مانیتورینگ کویتیشن استفاده نمود. در این تحقیق پیک فرکانسی مربوط به نصف فرکانس عبور پره برای بررسی دینامیک کویتیشن استفاده شد [۹]. در سال ۲۰۰۵ الفیاض^۳ و همکارانش با استفاده از متوسط انرژی سیگنال صوتی که توسط هیدروفونی که روی بدنه پمپ قرار داده شده بود، برای بررسی دینامیک کویتیشن آغاز و گسترش آن استفاده نمودند [۱۰]. در سال ۲۰۰۸ تان و سلمان^۴ با انجام تحلیل رویه بر روی سیگنال ارتعاشی به دست آمده از بدنه پمپ، به بررسی دینامیک کویتیشن پرداختند [۱۱]. در سال ۲۰۰۹ کودینا پیک‌های مختلف فرکانسی را برای تعیین آغاز و گسترش کویتیشن در پمپ‌های مختلف مورد استفاده قرار داد [۱۲].

در ادامه این مقاله سامانه شبیه‌ساز کویتیشن در پمپ گریز از مرکز شرح داده می‌شود. سپس با استفاده از سامانه موجود به ایجاد کویتیشن در پمپ‌های گریز از مرکز پرداخته و با استفاده از سنسور شتاب‌سنج، سیگنال‌های ارتعاشی اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های متداول و نوین تحلیل سیگنال به بررسی تأثیر بروز و گسترش کویتیشن بر پارامترهای مختلف ارتعاشی در حوزه‌های زمانی، فرکانسی و زمان-فرکانسی پرداخته شده است.

۲- سامانه آزمایشی

به منظور انجام آزمون‌های شبیه‌سازی پیدایش و گسترش کویتیشن و تهیه سیگنال‌های مورد نیاز جهت تحقیق بر روی اثر کویتیشن بر سیگنال ارتعاشی، از مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه هیدرو دینامیک دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده شد. نمایش شماتیک سامانه آزمون مورد نظر که بر اساس معیارهای استاندارد ISO ۳۵۵۵ طراحی و ساخته شده، در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۳ و ۱۴].

این مجموعه از شش قسمت اصلی تشکیل شده است که شامل فونداسیون و سازه‌های زیرین پمپ، پمپ یک‌مرحله‌ای گریز از مرکز شش‌پره‌ای (جنس پره‌ها از چدن می‌باشد)، لوله‌های اتصال پمپ گریز از مرکز، پمپ‌های خلاء، موتور الکتریکی، سامانه داده‌برداری و شیرهای پورت ورودی و خروجی پمپ می‌باشد.

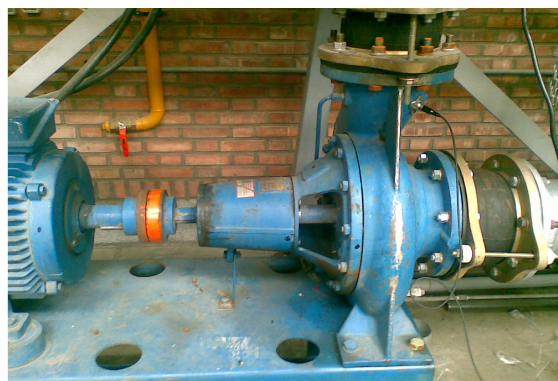
2- Cudina

3- Alfayez

4- Tan and Salman

1- Jensen and Dayton

طریق سیم و پورت مربوط به یکی از کانال های کارت مبدل منتقل شده و پس از انجام عملیات گسسته سازی از طریق پورت USB وارد رایانه شده و با استفاده از نرم افزار LABVIEW به فرمت txt ذخیره شده است. عملیات پردازش و تحلیل سیگنال های ذخیره شده توسط نرم افزار MATLAB انجام گرفت. انتخاب محل قرارگیری سنسور یکی از مهم ترین و مؤثرترین تصمیم ها بر روی کیفیت انجام تحقیقات عیب یابی می باشد. در صورتی که این انتخاب به درستی انجام شود، اثر بسیاری از نویز های موجود کاهش می یابد. در مورد پمپ گریز از مرکز نویز های هیدرو دینامیکی و ارتعاشات سازه ای ناشی از دوران موتور، انتخاب محل قرارگیری سنسور را مشکل می کند. در این مطالعه پس از انجام یک سری آزمون و خطا مکان مناسبی که در آن طیف کویتیشن پمپ گریز از مرکز نسبت به سایر اجزاء برجسته تر باشد، تعیین گردید. شکل ۴ این محل را نشان می دهد.



شکل (۴): مکان قرارگیری سنسور
بر روی پورت خروجی پمپ.

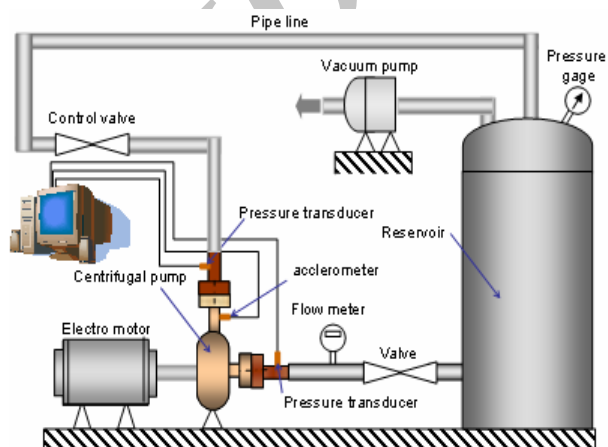
آزمون ها برای پنج دبی اولیه مختلف، مطابق جدول ۱ صورت گرفت. دبی طراحی پمپ مورد آزمایش $350 \text{ m}^3/\text{h}$ بوده و دبی های ذکر شده در جدول ۱ براساس نسبت درصد دبی طراحی می باشند.

جدول (۱): دبی مربوط به آزمون های مختلف.

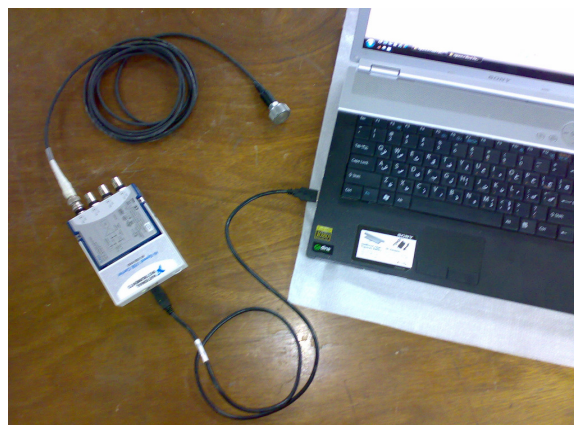
شماره آزمون	۱	۲	۳	۴	۵
دبی اولیه نسبت به دبی طراحی پمپ	%۱۱۰	%۱۰۵	%۱۰۰	%۹۵	%۹۰

در سامانه فوق با استفاده از یک پمپ خلاء فشار هوای مخزن به ندرت کاهش داده شده و در هر مرحله سیگنال های ارتعاشی با

موتور الکتریکی مورد استفاده از نوع AC سه فاز و دور آن برابر 1420 دور در دقیقه است. در این مطالعه اندازه گیری سیگنال های ارتعاشی مجموعه توسط شتابسنج مدل 608A111 ساخت شرکت IMI Sensors و کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال مدل NI-USB ۹۲۳۳ محصول شرکت NI انجام شد. شتابسنج ذکر شده دارای گستره فرکانسی $0/5$ هرتز تا 10 کیلوهرتز است. کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال نیز دارای چهار کانال داده برداری با ولتاژ ورودی ± 5 ولت می باشد. کارت مبدل مذکور دارای فیلترهای آنتی الیاسینگ می باشد. نمایی از شتابسنج و کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل (۲): شماتیک سامانه مورد استفاده برای ایجاد کویتیشن در پمپ گریز از مرکز.



شکل (۳): نمایی از مجموعه مورد استفاده در عملیات داده برداری.

شتابسنج به وسیله یک پایه مغناطیسی، دائم به پوسته پمپ متصل می شود. خروجی شتابسنج به صورت سیگنال الکتریکی از

بررسی قرار گرفت که در زیر به تعریف تعدادی از این پارامترها پرداخته می‌شود. جذر میانگین مربع (RMS) برای یک سیگنال گسسته این شاخصه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (x_i)^2 \right]} \quad (1)$$

شاخص میانگین مقادیر مطلق از شاخص‌های مراکز آمار می‌باشد. شاخص میانگین مقدار مطلق مطابق رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$Mean\ absolute = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i|}{N} \quad (2)$$

فاکتور واریانس شامل ممان دوم داده‌های آماری حول میانگین داده‌ها می‌باشد. واریانس مطابق رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$Variance = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (3)$$

از تقسیم مقدار بیشینه مثبت پیک بر مقدار RMS سیگنال پارامتری به دست می‌آید که اندازه دامنه نرمالیزه شده سیگنال را به دست می‌آورد. پارامتر ذکر شده فاکتور کرسر نام دارد. برای یک سیگنال گسسته این شاخصه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CF = \frac{Peak}{RMS} \quad (4)$$

پارامتر کورتزیس برای یک سیگنال گسسته به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$Kurtosis = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (5)$$

در مورد بسیاری از پارامترهای فوق رفتار نظام‌مندی مشاهده نشد. از طرف دیگر برای پارامترهایی مانند انحراف معیار و ریشه جذر مربع و متوسط مقدار مطلق و انرژی سیگنال، رفتار مشابهی مشاهده شد که با توجه به اینکه پارامتر انرژی حساسیت بالاتری نسبت به دیگر پارامترها از خود نشان داد، در ادامه به بررسی رفتار آن پرداخته می‌شود. بدین منظور، نه دقیقه سیگنال استخراج شده به سیگنال‌های کوچک یک ثانیه‌ای تقسیم شده و برای هر سیگنال کوچک متوسط انرژی مربوط به آن استخراج شده است. شکل ۵ مقدار انرژی سیگنال نرمال شده بر انرژی سیگنال در حالت پایدار را بر حسب زمان نشان می‌دهد.

استفاده از یک سنسور شتاب‌سنج که در خروجی پمپ نصب گردیده، استخراج شده‌اند. سپس با استفاده از مقادیر مشخصه‌هایی که در محیط‌های زمانی، فرکانسی و زمان-فرکانس از سیگنال‌های جمع‌آوری شده به دست می‌آید به بررسی دینامیک-کویتیشن پرداخته شده است.

۳- تحلیل و بررسی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده

بر اساس استانداردهای موجود، هنگامی که اختلاف فشار ورودی و خروجی پمپ به حدود ۳٪ رسید کویتیشن در حال وقوع است [۱۵]. اما کاملاً روشن است که حتی قبل از اینکه افت هد پمپ به حدود سه درصد برسد کویتیشن آغاز شده و در حال گسترش می‌باشد، زیرا در دبی‌های مختلف که آزمون‌ها صورت گرفت بین پنج تا پانزده ثانیه پس از شروع به کار پمپ خلاء افت هد و دبی پمپ آغاز می‌گردد و این هر دو از نشانه‌های بروز کویتیشن و گسترش آن می‌باشد. در این تحقیق با توجه به اینکه افت دبی اندکی قبل از افت هد پمپ بروز و ظهور می‌یابد به‌عنوان آغاز کویتیشن و ۳٪ افت هد را به‌عنوان حالت گسترش یافته کویتیشن در نظر گرفته شده است. هنگامی که کویتیشن گسترش یافته است، صدایی که از پمپ ساطع می‌شود مانند این است که مخلوط آب و ماسه در درون آن در حال دوران هستند و اگر کسی در کنار پمپ ایستاده باشد می‌تواند کویتیشن را به‌خوبی از دیگر معایب پمپ تشخیص دهد. اما در پالایشگاه‌های سامانه تصفیه فاضلاب و ... که تعداد زیادی پمپ در کنار هم در حال انجام کار هستند، نمی‌توان در کنار هر پمپ یک نفر را مأمور کرد و از طرف دیگر شروع کویتیشن و آسیب‌هایی که از بروز و گسترش آن بر پمپ وارد می‌شود مدت زیادی قبل از این آغاز می‌گردد. از این رو باید به دنبال روش‌هایی گشت که بتوان با تکیه بر آنها بروز و گسترش کویتیشن را در مراحل آغازی و به‌صورت اتوماتیک پایش کرد. یکی از این روش‌ها تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی پمپ در محیط‌های زمانی و فرکانسی و زمان-فرکانسی و استخراج مشخصه‌های حساس به بروز و گسترش کویتیشن می‌باشند. در ادامه به بررسی هر یک از موارد ذکر شده پرداخته می‌شود.

۳-۱- تحلیل در حوزه زمانی

تحلیل در حوزه زمانی به معنی بررسی رفتار مشخصه‌های سیگنال در حوزه زمان نسبت به بروز و گسترش کویتیشن می‌باشد. در این تحقیق رفتار پارامترهای زمانی مختلفی مورد

اگر $f(t)$ دارای انرژی محدود باشد، مقدار $F(\omega)$ متعلق به هر پایه متعامد سینوسی $e^{j\omega t}$ ، طبق رابطه (۷) محاسبه می شود:

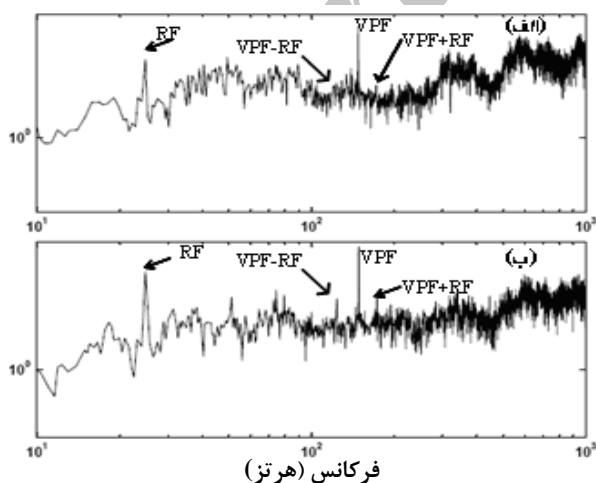
$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (7)$$

تبدیل فوری سریع معادل فرم گسسته زیر می باشد:

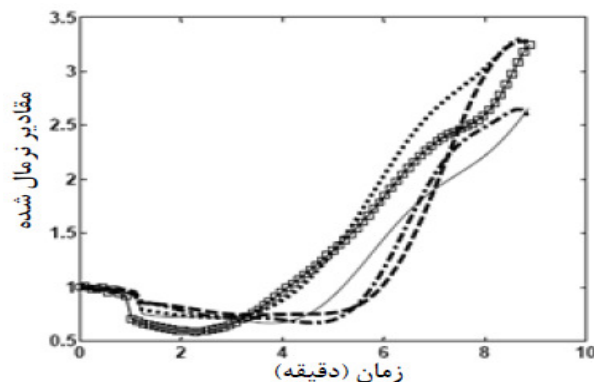
$$X[n] = \sum_{k=0}^{L-1} x[k] e^{-j(2\pi/N)kn}, \quad k = 0, \dots, L-1. \quad (8)$$

تبدیل سریع فوری، نمایش گسسته محدوده فرکانسی است که اجزاء فرکانسی سیگنال ارتعاشی با استفاده از این روش به راحتی نمایش داده می شود. بردن سیگنال ها به حوزه فرکانسی به متخصصین عیب یابی ماشین های دوار این اجازه را می دهد که با توجه به پیک های فرکانسی مرتبط با بروز و گسترش عیب خاص، به بررسی رفتار آن بپردازند. اما تاکنون پیک خاصی که بتواند آن را به طور مستقیم به بروز و گسترش کویتیشن مرتبط کرد به دست نیامده است. از این رو در این قسمت به بررسی تأثیر بروز و گسترش کویتیشن بر میزان انرژی سیگنال در فرکانس های اساسی پمپ های گریز از مرکز مانند فرکانس دوران، فرکانس عبور پره، مدوله شده فرکانس دوران بر فرکانس عبور پره و هارمونیک های آنها پرداخته می شود.

در شکل ۶ طیف فرکانسی سیگنال ارتعاشی در دو حالت پیش از وقوع کویتیشن و بعد از اینکه به طور کامل گسترش پیدا کرد نشان داده شده است (در شکل ۶ 'RF' فرکانس دوران پمپ، 'VPF' فرکانس عبور پره پمپ، 'VPF+RF' فرکانس مدوله شده جمعی فرکانس دوران و فرکانس عبور پره و 'VPF-RF' فرکانس مدوله شده تقاضی فرکانس دوران و فرکانس عبور پره پمپ است).



شکل (۶): طیف فرکانسی سیگنال های ارتعاشی به دست آمده از بدنه پمپ (الف) قبل از کویتیشن، (ب) بعد از گسترش کویتیشن.



شکل (۵): پارامتر نرمالیز شده انرژی استخراج شده از سیگنال ارتعاشی در حوزه زمانی (آزمون ۱ - □ -، آزمون ۲ - — -، آزمون ۳ - ... -، آزمون ۴ - - - -، آزمون ۵ - — -).

همان طور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، در یک دقیقه ابتدایی که هنوز پمپ خلاء روشن نیست، سطح انرژی سیگنال تقریباً ثابت است ولی با آغاز به کار پمپ های خلاء و همچنین آغاز افت هد و دبی، ابتدا سطح انرژی سیگنال اندکی کاهش می یابد، زیرا در این مرحله ترکیدن حباب های کویتیشن هنوز انرژی قابل ملاحظه ای را به بدنه پمپ وارد نکرده و همچنین دبی شروع به کاهش می کند. بنابراین، انرژی که از سیال به بدنه پمپ وارد می شود اندکی کاهش می یابد. اما با گسترش کویتیشن، میزان انرژی سیگنال به شدت افزایش می یابد، زیرا در این مرحله انرژی قالب سیگنال ناشی از ترکیدن حباب ها در کنار پره ها و بدنه پمپ می باشد.

۳-۲- تحلیل در حوزه فرکانسی

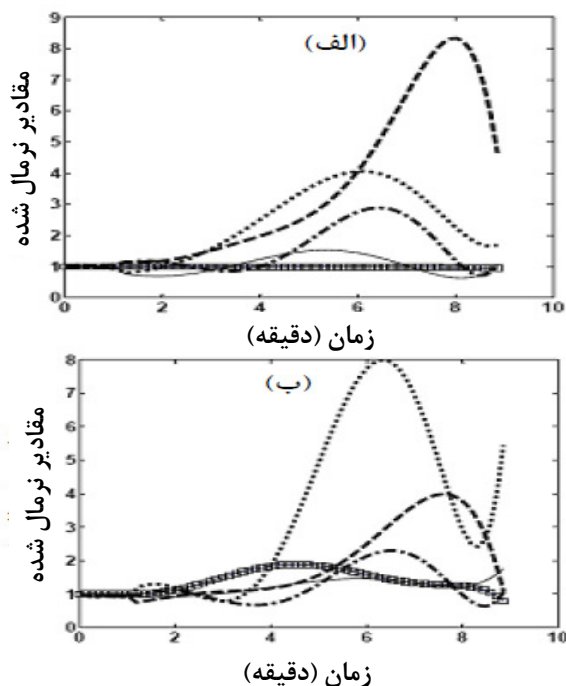
بر اساس تحقیقات و بررسی هایی که تاکنون صورت گرفته است حساسیت پارامترهای حوزه فرکانسی نسبت به بروز و گسترش کویتیشن بیش از سایر حوزه ها است. به منظور تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس، ابتدا سیگنال هایی را که در حوزه زمان از بدنه پمپ به دست آمده اند از یک فیلتر پایین گذر عبور داده، سپس بعد از ضرب سیگنال در یک تابع پنجره مانند تابع هنینگ با استفاده از روش FFT^۱ () به حوزه فرکانسی برده می شود. تحلیل فوری، یک سیگنال را طبق رابطه (۶) به مجموع پایه های متعامد سینوسی شامل فرکانس های مختلف بسط می دهد:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (6)$$

1 - Fast Fourier Transform

همان‌طور که در شکل ۷-الف قابل ملاحظه است، میزان پیک فرکانس دوران در مراحل اولیه کویتیشن حساسیت بالایی از خود نشان نمی‌دهد. اما با گسترش کویتیشن میزان آن به شدت افزایش یافته و به مقدار بیشینه خود رسیده سپس دوباره کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه پیک فوق تقریباً در حدود ۳٪ افت هد اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در شکل ۷-ب قابل ملاحظه است میزان پیک فرکانس عبور پره در مراحل اولیه کویتیشن حساسیت بالایی از خود نشان داده و به یک‌باره افزایش می‌یابد، اما با گسترش کویتیشن، میزان حساسیت آن کاهش یافته و با کمی نوسان افزایش می‌یابد. بنابراین، از پیک در فرکانس دوران پمپ می‌توان به‌منظور تشخیص آغاز کویتیشن استفاده نمود.

شکل ۸ مقادیر پیک‌ها در فرکانس‌های مدوله‌شده جمعی و تفاضلی فرکانس‌های دوران و فرکانس عبور پره را برحسب زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ قابل ملاحظه است، دامنه پیک در فرکانس‌های فوق به آغاز کویتیشن، حساسیت قابل ملاحظه‌ای نشان نداده و تنها در حالتی که کویتیشن در حالت گسترش یافته قرار گرفته است در دبی‌های پایین دامنه پیک افزایش یافته و سپس دوباره با گسترش بیشتر کویتیشن کاهش می‌یابد.

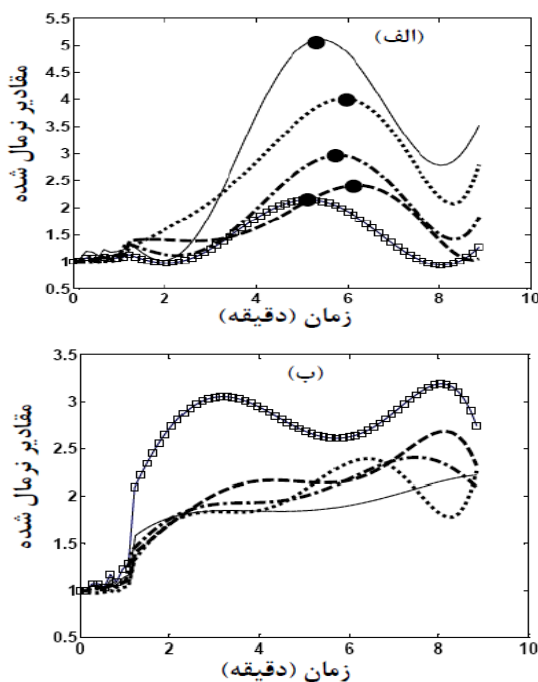


شکل (۸): مقادیر پیک‌ها در فرکانس‌های مدوله شده

الف) جمعی و ب) تفاضلی فرکانس دوران و فرکانس عبور پره پمپ (آزمون ۱ —□—، آزمون ۲ — —، آزمون ۳ —•••—، آزمون ۴ —••••—، آزمون ۵ — — —).

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با بروز و گسترش کویتیشن مقدار دامنه سیگنال در فرکانس‌هایی مانند فرکانس عبور پره و دوران پمپ افزایش یافته و در بعضی از هارمونیک‌های عبور پره مانند هارمونیک چهارم کاهش می‌یابد. اما همان‌طور که قابل انتظار است مقدار دامنه سیگنال در فرکانس‌های ذکر شده با گسترش مرحله به مرحله کویتیشن تغییر می‌کند. بنابراین، نیاز است رفتار هر یک از پیک‌های ذکر شده بر حسب زمان گسترش کویتیشن مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور نه دقیقه سیگنال را به سیگنال‌های با طول شش ثانیه تقسیم کرده و پس از انجام فیلترینگ و عبور از تابع پنجره با استفاده از تبدیل فوریه محتوای فرکانسی هر یک استخراج می‌گردد. سپس در اطراف هر یک از پیک‌های یک باند فرکانسی کوچک در نظر گرفته شده و بیشینه دامنه سیگنال در باند فوق را اندازه پیک ذکر شده در نظر گرفته می‌شود. این عملیات بدین منظور صورت می‌گیرد که با اندکی تغییر در جریان موتور، فرکانس دوران موتور کمی جابه‌جا شده و بر همین اساس بقیه فرکانس‌های ماشین دوار که وابسته به فرکانس دوران هستند نیز جابه‌جا می‌گردند.

شکل ۷ مقادیر نرمال شده پیک‌های فرکانس دوران و فرکانس عبور پره را برحسب زمان نشان می‌دهد.



شکل (۷): تغییرات پیک‌های فرکانسی در الف) فرکانس دوران و ب) در فرکانس عبور پره پمپ (آزمون ۱ —□—، آزمون ۲ — —، آزمون ۳ —•••—، آزمون ۴ —••••—، آزمون ۵ — — —).

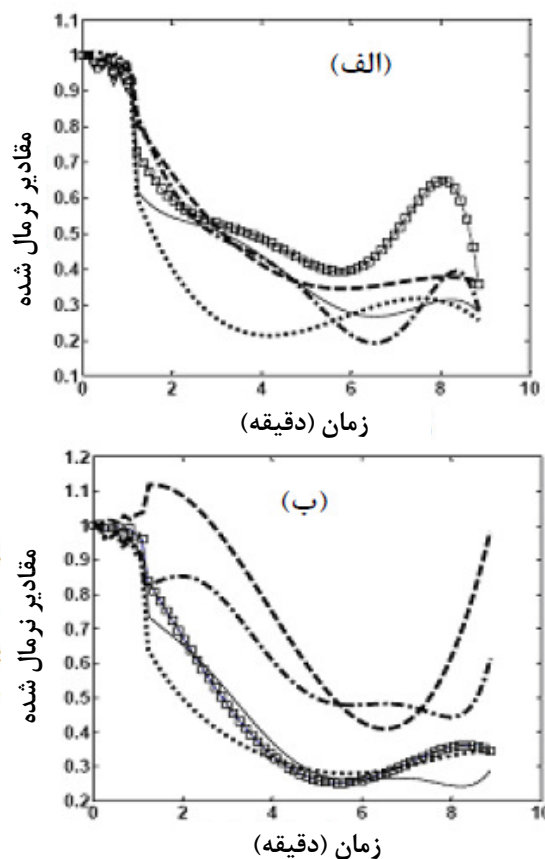
تاکنون تأثیر آغاز و گسترش کویتیشن بر پارامترهایی در حوزه‌های زمانی و فرکانسی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. اما عیوب دیگری که در پمپ‌های گریز از مرکز بروز و ظهور می‌کنند نیز ممکن است اثر مشابهی با کویتیشن بر پارامترهایی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفتند، بگذارند. به‌عنوان مثال اگر در محل اتصال پره‌ها بر روی محور پمپ لقی وجود داشته باشد، فرکانس مدوله‌شده دوران پمپ بر روی فرکانس عبور پره تحریک خواهد شد. در آنالانسی‌های هیدرودینامیکی و مکانیکی فرکانس عبور پره تحریک خواهد شد. در صورتی که پره پمپ به هنگام دوران به چیزی برخورد کند، فرکانس عبور پره تحریک خواهد شد به این دلیل که برخورد پره موجب ایجاد نیروی نامتوازنی بر روی محور پمپ شده و موجب آنالانسی و در نهایت تحریک فرکانس دوران پمپ نیز خواهد شد. در صورتی که سیال کاری به میزان کافی در اختیار پمپ قرار نگیرد، فرکانس دوران پمپ تحریک می‌شود، اما در یک دبی مشخص دامنه سیگنال در این فرکانس با کمی نوسان همراه است [۱۶]. توضیحاتی که در بالا داده شد نشان می‌دهد که به‌منظور پایش وضعیت کویتیشن در پمپ‌های گریز از مرکز، بررسی رفتار پارامترهای که تاکنون مورد بررسی قرار گرفتند کافی نیست. از این‌رو در ادامه با استفاده از تبدیل موجک، سیگنال ارتعاشی را به باندهای فرکانسی مختلف شکسته و در هر یک از باندهای فوق به بررسی تأثیر بروز و گسترش کویتیشن بر مشخصات کویتیشن پرداخته می‌شود.

۳-۳- تحلیل تبدیل موجک گسسته

فیلتر یکی از مهم‌ترین ابزار در تحلیل سیگنال و فیلترینگ باند گذر مهم‌ترین تحلیل در محیط فرکانسی می‌باشد. تبدیل موجک نیز چیزی جز شکستن سیگنال به باندهای فرکانسی با استفاده از فیلتر باند گذر نمی‌باشد. تبدیل موجک نیز عبارت از تجزیه سیگنال با استفاده از یک دسته توابع به باندهای فرکانسی مختلف می‌باشد.

تبدیل موجک حاصل ضرب داخلی بین سیگنال و یک موجک از خانواده موجک‌ها می‌باشد که از طریق اعمال جابه‌جایی زمانی و مقیاس‌دهی بر موجک مادر به‌دست آمده است. اگر $\psi(t)$ موجک مادر باشد، موجک‌های فرزند آن با تغییر ضرایب a و b (که a پارامتر مقیاس و b پارامتر جابه‌جایی زمانی می‌باشد) از رابطه (۹) به‌دست خواهند آمد:

شکل ۹ مقادیر پیک‌های فرکانس‌های هارمونی چهارم و پنجم عبور پره را برحسب زمان نشان می‌دهد.



شکل (۹): مقادیر پیک‌ها در فرکانس‌های هارمونی،

(الف) چهارم و (ب) پنجم عبور پره پمپ (آزمون ۱ \square ، آزمون ۲ $—$ ، آزمون ۳ \dots ، آزمون ۴ $---$ ، آزمون ۵ $---$).

همان‌طور که در شکل ۹-الف قابل ملاحظه است، دامنه پیک در فرکانس‌های هارمونی چهارم عبور پره به آغاز کویتیشن حساسیت قابل ملاحظه‌ای نشان داده و به‌شدت کاهش می‌یابد، اما با گسترش کویتیشن از میزان حساسیت آن کاهش یافته و با سرعت ملایم‌تری کاهش می‌یابد و با گسترش بیشتر کویتیشن در بعضی از دبی‌ها رفتار پیک تغییر کرده و دوباره اندکی افزایش می‌یابد. با مشاهده شکل ۹-ب می‌توان ملاحظه نمود که رفتار مربوط به هارمونی پنجم فرکانس عبور پره بسیار نزدیک به رفتار هارمونی چهارم است، البته با این تفاوت که در مراحل پایانی گسترش کویتیشن و در دبی‌های پایین، ناپایدار شده به‌شدت افزایش می‌یابد.

جدول (۲): محتوای فرکانسی هر یک از قسمت‌های سیگنال حاصل از تبدیل موجک.

Level	Frequency Range
cd1	5~10 kHz
cd2	2.5~5 kHz
cd3	1.25~2.5 kHz
cd4	0.625~1.25 kHz
cd5	0.3125~0.625 kHz
cd6	0.15625~781.25 Hz
cd7	0.078125~781.25 Hz
ca7	0~781.25 Hz

همانند تحلیلی که در حوزه زمانی صورت گرفت، نه دقیقه سیگنال استخراج شده به سیگنال‌های کوچک یک ثانیه‌ای تقسیم شده، سپس بر روی هر سیگنال کوچک تبدیل موجک صورت گرفته برای هر یک از قسمت‌های سیگنال حاصل از تبدیل موجک، متوسط انرژی مربوط به آن استخراج شده است. شکل ۱۱ مقادیر انرژی در قسمت‌های cd1، cd2 و cd3 حاصل از تبدیل موجک سیگنال را برحسب زمان نشان می‌دهد.

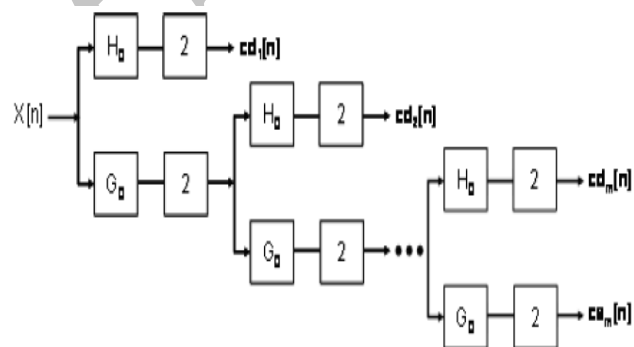
همان طور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است با آغاز به کار پمپ‌های خلاء و همچنین آغاز افت هد و دبی، ابتدا سطح انرژی سیگنال اندکی کاهش می‌یابد، زیرا در این مرحله ترکیب حباب‌ها کویتیشن هنوز انرژی قابل ملاحظه‌ای را به بدنه پمپ وارد نمی‌کند و همچنین دبی شروع به کاهش کرده، بنابراین انرژی که از سیال به بدنه پمپ وارد می‌شود اندکی کاهش می‌یابد. اما با گسترش کویتیشن میزان انرژی سیگنال به شدت افزایش یافته و در مقایسه با شکل ۵ می‌توان مشاهده نمود که میزان انرژی سیگنال افزایش می‌یابد، زیرا ترکیب حباب‌های کویتیشن، فرکانس‌های بالاتر را تحریک می‌کند، بنابراین اثر آن بر روی cd1 که فرکانس بالایی دارد بیشتر قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ ب و ج قابل مشاهده است، با کاهش باند فرکانسی، اثر ترکیب حباب‌های کویتیشن کاهش می‌یابد.

$$\psi_{ab}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left[\frac{t-b}{a}\right] \quad b \in R, a \in R^* \quad (9)$$

رابطه (۱۰) تبدیل موجک تابع زمانی $x(t)$ با استفاده از تابع موجک را نشان می‌دهد:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (10)$$

همان‌طور که در این رابطه قابل ملاحظه است، تبدیل موجک همان انتگرال کانولشن تابع $x(t)$ و تابع موجک می‌باشد. در رابطه فوق علامت "*" نشانگر مزدوج مختلط می‌باشد. تبدیل موجکی که در بالا شرح داده شد، تبدیل موجک پیوسته نیز نامیده می‌شود. اما برای انجام محاسبات در رایانه باید عمل گسسته‌سازی انجام شود. الگوریتم ملات^۱ یکی از مشهورترین آنهاست. تبدیل موجکی که بر مبنای این روش‌ها انجام می‌شود، تبدیل موجک گسسته خوانده می‌شود. شکل شماتیک تبدیل موجک گسسته چندمرحله‌ای در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

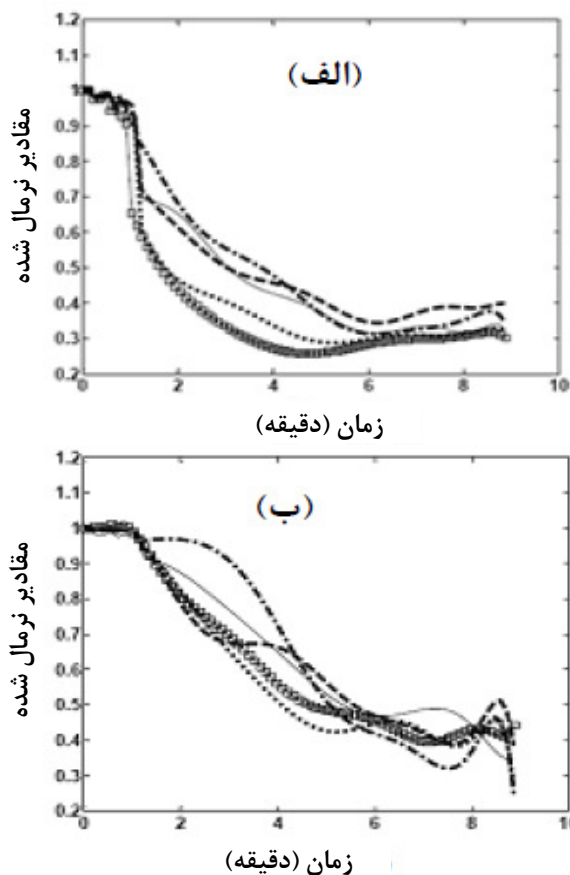


شکل (۱۰): شماتیک تبدیل موجک چندمرحله‌ای.

همان‌طور که در شکل ۱۰ قابل ملاحظه است، در هر مرحله سیگنال از یک فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر عبور داده شده، سپس ساب‌سامپلینگ^۲ صورت می‌گیرد. بدین ترتیب سیگنال به باندهای مختلف فرکانسی تجزیه می‌گردد. در این تحقیق از تبدیل موجک دوبچی مرتبه ده^۳ استفاده شده و تا هفت مرحله ادامه پیدا کرده است. محتوای فرکانسی هر یک از قسمت‌های حاصل از تبدیل موجک سیگنال در جدول ۲ نشان داده شده است (باندهای فرکانسی بستگی به فرکانس نمونه‌برداری دارد).

- 1- Mallat
- 2- Sub Sampling
- 3- Db10

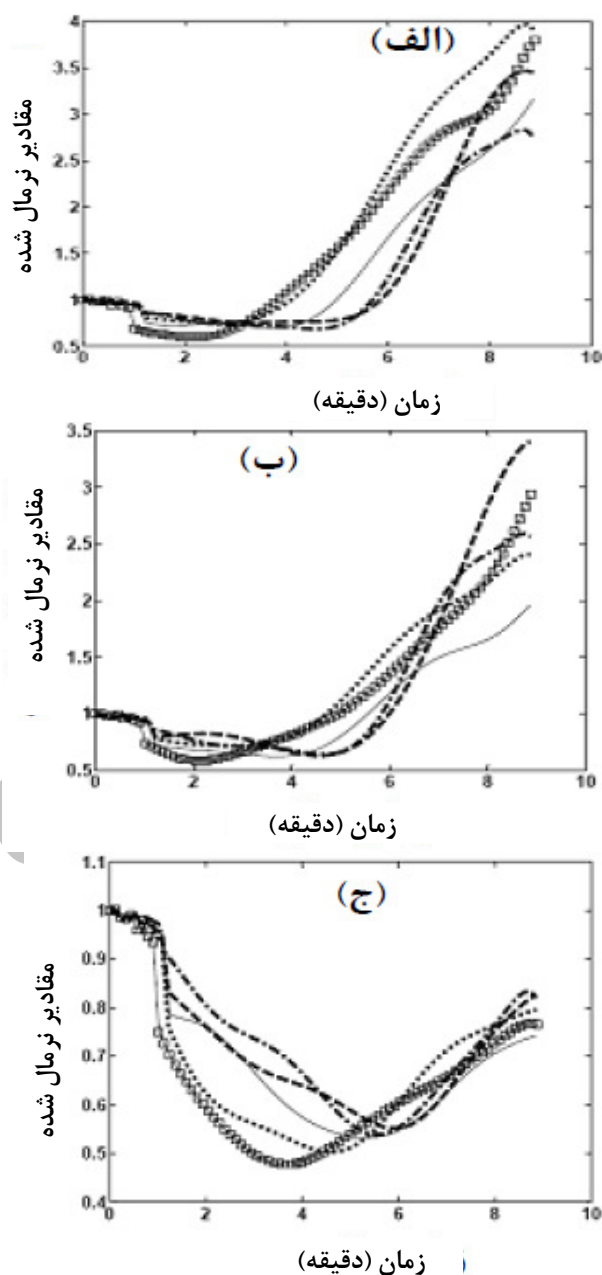
فرکانسی مربوط به cd4 و cd7 دارد اما افت دبی تأثیر خود را بر فرکانس های پایین نیز نشان داده و انرژی سیگنال کاهش قابل ملاحظه ای می یابد. بنابراین، با توجه به اینکه افت دبی یکی از اثرات بروز و گسترش کویتیشن در پمپ های گریز از مرکز بوده و تأثیر آن به خوبی در فرکانس های پایین قابل مشاهده است و می توان از آن به منظور پایش وضعیت کویتیشن استفاده نمود.



شکل (۱۲): پارامترهای انرژی استخراج شده از قسمت های (الف) cd4 و (ب) cd7 باقی مانده از تبدیل موجک سیگنال ارتعاشی پمپ (آزمون ۱ - □، آزمون ۲ - —، آزمون ۳ - •••، آزمون ۴ - - - -، آزمون ۵ - —).

۴- نتیجه گیری

مهم ترین عیبی که در پمپ های گریز از مرکز ظاهر گردیده و آسیب های جبران ناپذیر به آنها می زند کویتیشن می باشد. علاوه بر این، کویتیشن باعث افت هد، دبی و بازدهی پمپ نیز می گردد. بنابراین، طراحی سامانه احتیاطی برای آغاز و گسترش کویتیشن ضروری به نظر می رسد. با تحلیل سیگنال های ارتعاشی



شکل (۱۱): پارامترهای انرژی استخراج شده از قسمت های (الف) cd1، (ب) cd2 و (ج) cd3 باقی مانده از تبدیل موجک سیگنال ارتعاشی پمپ (آزمون ۱ - □، آزمون ۲ - —، آزمون ۳ - •••، آزمون ۴ - - - -، آزمون ۵ - —).

شکل ۱۲ مقادیر انرژی در قسمت های cd4 و cd7 حاصل از تبدیل موجک سیگنال را برحسب زمان نشان می دهد. همان طور که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است با بروز و گسترش کویتیشن، سطح انرژی سیگنال کاهش می یابد زیرا ترکیب اجزای فرکانس های بالا را تحریک کرده و تأثیر ناچیزی بر باندهای

5. Escaler, X., Egusquiza, E., Farhat, M., Avellan, F., and Coussirat, M. "Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines, J. Mech Syst Signal Proc. Vol. 20, No. 4, pp. 983-1007, 2006.
6. Sinha, J.K. and Rao, A.R. "Vibration Based Diagnosis of a Centrifugal Pump", Technical Note, Structural Health Monitoring, Vol. 5, No. 4, pp. 325-332, 2006.
7. Pasandideh Fard, M., Rashidi-Toroghi, I., and Tolami, M. "Numerical Simulation of 2-D Supercavitation and Partial Cavitation Using Boundary Element Method", J. Aero. Mech., Vol. 4, No. 2, pp. 15-28, 2008 (In Persian).
8. Jensen, J. and Dayton, K. "Detecting Cavitation in Centrifugal Pumps", Experimental Results of the Pump Laboratory, Jeremy Jensen Project Engineer, Bentley Rotor Dynamics Research, 2000.
9. Cudina, M. "Detection of Cavitation Phenomenon in a Centrifugal Pump Using Audible Sound", Mech. Systems and Signal Proc., Vol. 17, No. 6, pp. 1335-1347, 2003.
10. Alfayez, L., Mbab, D., and Dyson, G. "The Application of Acoustic Emission for Detecting Incipient Cavitation and the Best Efficiency Point of a 60 kW Centrifugal Pump: Case Study", NDT&E Int. Vol. 38, No. 5, pp. 354-358, 2005.
11. Chek Zin, T. and Salman, L.M. "An Experimental Study of Cavitation Detection in a Centrifugal Pump Using Envelope Analysis", J. System Design and Dynamics, 2008.
12. Cudina, M. and Prezelj, J. "Detection of Cavitation in Operation of Kinetic Pumps. Use of Discrete Frequency Tone in Audible Spectra", Applied Acoustics, Vol. 70, No. 4, pp. 540-546, 2009.
13. Cudina, M. "Noise as an Indicator of Cavitation in a Centrifugal Pump", Acoustical Physics, Vol. 49, No. 4, pp. 463-474, 2003.
14. "ISO 3555", Centrifugal, Mixed Flow and Axial Pumps – code for Acceptance Tests – Class B, 1977.
15. Karassik, I., Krutzsch, W., Fraser, W., and Messina, J. "Pump Handbook", Second Edition, McGraw-Hill, 1986.
16. Mechefske, C. K. "Vibration and Shock Handbook", CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2005.

پمپ نشان داده شد که با آغاز کویتیشن و افت هد و دبی، ابتدا سطح انرژی سیگنال اندکی کاهش می‌یابد، زیرا در این مرحله ترکیب حباب‌ها کویتیشن هنوز انرژی قابل ملاحظه‌ای را به بدنه پمپ وارد نمی‌کند و همچنین دبی شروع به کاهش کرده، بنابراین انرژی که از سیال به بدنه پمپ وارد می‌شود اندکی کاهش می‌یابد. اما با گسترش کویتیشن، میزان انرژی سیگنال به شدت افزایش می‌یابد، زیرا در این مرحله انرژی قالب سیگنال ناشی از ترکیب حباب‌ها در کنار پرها و بدنه پمپ می‌باشد. در مقاله حاضر نشان داده شد که تبدیل موجک، یک ابزار بسیار قوی برای پایش کویتیشن در پمپ‌ها است، زیرا ترکیب حباب‌های کویتیشن فرکانس‌های بالا را تحریک کرده و اثر آن در این فرکانس‌ها بیشتر قابل مشاهده است. اما افت دبی ناشی از گسترش کویتیشن فرکانس‌های پایین را تحریک می‌کند. بنابراین، از انرژی سیگنال در محدوده‌های فرکانسی ذکر شده می‌توان به منظور بررسی آغاز و گسترش کویتیشن استفاده نمود. همچنین بررسی‌هایی که در محیط فرکانسی صورت گرفت نشان می‌دهد که می‌توان از انرژی سیگنال در فرکانس‌های مشخصه ماشین دوار به منظور بررسی آغاز و گسترش کویتیشن استفاده نمود. با استفاده از مشخصاتی که از سیگنال‌های ارتعاشی به دست آمد، این قابلیت وجود دارد که با طراحی یک سامانه کنترلی، کویتیشن را در مراحل آغازین تشخیص داد و با خاموش کردن پمپ، از گسترش آن جلوگیری نمود.

۵- مراجع

1. Mechefske, C.K. "Machine Condition Monitoring and Fault Diagnostics", Queen's University, 2005.
2. Sedlář, M., Zima, P., Němec, T., and Maršík, F. "Analysis of Cavitation Phenomena in Water and Its Application to Prediction of Cavitation Erosion in Hydraulic Machinery", ICPWS XV, Berlin, 2008.
3. Mongeau, L., Thompson, D.E. and McLaughlin, D.K. "Sound Generation by Rotating Stall in Centrifugal Turbo Machines", J. Sound and Vibration, Vol. 163, pp. 1-30, 1993.
4. Greitzer, E.M. "The Stability of Pumping Systems", J. Fluids Eng., Vol. 103, No. 2, pp. 193-242, 1981.