استفاده از سیگنالهای ارتعاشی بهمنظور پایش کویتیشن

در پمپهای گریز از مرکز

میرسعید صفی زاده '، سعید محمدی'، نوروزمحمد نوری"

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران (تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱۴: تاریخ پذیرش:۲۰ /۹۳/۰۳)

چکیدہ

کویتیشن یکی از مهمترین عیوبی است که در پمپهای گریز از مرکز ظاهر گشته و موجب آسیبهای جبران ناپذیری می شود. همچنین باعث افت هد، دبی و بازدهی پمپهای گریز از مرکز و خوردگی و پیتینگ در سطوح پرهها می شود. در مقاله حاضر با استفاده از تحلیل سیگنالهای ارتعاشی اندازه گیری شده از روی یک پمپ گریز از مرکز، نحوه طراحی سیستمی برای پایش پدیده کویتیشن در پمپ ارائه می گردد. در این تحقیق با استفاده از یک سامانه آزمایشی ساخته شده، به شبیه سازی پدیده کویتیشن در پمپهای گریز از مرکز پرداخته و با استفاده از سنسور شتاب سنج، سیگنالهای ارتعاشی پمپ در حین بروز و گسترش کویتیشن اندازه گیری شده است. در نهایت با استفاده از روشهای متداول و نوین تحلیل سیگنال در حوزه های 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 مشخصه های حساس به پدیده کویتیشن در پمپ است که میتواند به منظور طراحی سیستمی برای پایش اتوماتی ک کویتیشن در پمپها با استفاده از سیگنال های 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

۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد ۳- دانشیار **www.SID.ir**

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

۱– مقدمه

کویتیشن مهم ترین عیبی است که در پمپهای گریز از مرکز ظاهر شده و به آنها آسیبهای جبران ناپذیر وارد می کند. با مکیده شدن سیال کاری به داخل پمپ و سرعت گرفتن آن فشارش کاهش می یابد (هنوز سیال از پرههای پمپ انرژی دریافت نکرده است) در صورتی که در نقاطی از جریان سیال هنگام برش خوردن و ورود آن به پره ها فشار به زیر فشار بخار اشباع افت کند، سیال به صورت موضعی بخار شده و حبابهایی در جریان آن به وجود می آیند. هنگامی که این حبابها به ناحیه پر فشار مجاور 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 نطح پرهها می شود [۱]. نمونه هایی از این نوع خرابی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): نمونههایی از خرابیهای بهوجود آمده در سطوح پرهها دراثر 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 تاکنون موضوع بسیاری از اختلاف فشار استاتیکی بین ورودی و خروجی پمپ بهمنظور 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 هیدروفنی که روی بدنه پمپ قرار داده شده بود، برای بررسی دینامیک کویتیشن آغاز و گسترش آن استفاده نمودند [۱] . در سال ۲۰۰۸ تان و سلمان⁴ با انجام تحلیل رویه بر روی سیگنال ارتعاشی بهدست 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

در ادامه این مقاله سامانه شبیهساز کویتیشن در پمپ گریز از مرکز شرح داده می شود. سپس با استفاده از سامانه موجود به ایجاد کویتیشن در پمپهای گریز از مرکز پرداخته و با استفاده از سنسور شتابسنج، سیگنالهای ارتعاشی اندازه گیری می شود. سپس با استفاده از روش های متداول و نوین تحلیل سیگنال به بررسی تأثیر بروز و گسترش کویتیشن بر پارامترهای مختلف ارتعاشی در حوزه های زمانی، فرکانسی و زمان – فرکانسی پرداخته شده است.

۲- سامانه آزمایشی

به منظ ور انجام آزمون های شبیه سازی پیدایش و گسترش کویتیشن و تهیه سیگنال های 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 موردنظر که بر اساس معیارهای استاندارد ISO ۳۵۵۵ طراحی و ساخته شده، در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۴ 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.

¹⁻ Jensen and Dayton

²⁻ Cudina

³⁻ Alfayeza

⁴⁻ Tan and Salman

موتور الکتریکی مورد استفاده از نوع AC سه فاز و دور آن برابر موتور الکتریکی مورد استفاده از نوع AC سه فاز و دور آن برابر ارتعاشی مجموعه توسط شتابسنج مدل 608A111 ساخت شرکت IMI Sensors و کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال مدل مدل NI-USB ۹۲۳۳ دکرشده دارای گستره فرکانسی ۵/۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز است. کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال نیز دارای چهار کانال دادهبرداری با ولتاژ ورودی ۵ ± ولت میباشد. کارت مبدل مذکور دارای فیلترهای آنتیالیاسینگ میباشد. نمایی از شتابسنج و کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال در شکل ۳ نشان داده شده است.



کویتیشن در پمپ گریز از مرکز.



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

شتابسنج بهوسیله یک پایه مغناطیسی، دائم به پوسته پمپ متصل می شود. خروجی شتابسنج به صورت سیگنال الکتریکی از www.SID.ir

طریق سیم و پورت مربوط به یکی از کانالهای کارت مبدل منتقل شده و پس از انجام عملیات گسستهسازی از طریق پورت USB وارد رایانه شده و با استفاده از نرمافزار LABVIEW به فرمت txt ذخیره شده است. عملیات پردازش و تحلیل سیگنالهای ذخیره شده توسط نرمافزار MATLAB انجام گرفت. انتخاب محل قرارگیری سنسور یکی از مهم ترین و مؤثرترین تصمیمها بر روی کیفیت انجام تحقیقات عیبیابی میباشد. نویزهای موجود کاهش مییابد. در مورد پمپ گریز از مرکز نویزهای موجود کاهش مییابد. در مورد پمپ گریز از مرکز موتور، انتخاب محل قرارگیری سنسور را مشکل میکند. 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 برجستهتر باشد، تعیین گردید. شکل ۴ این محل را نشان میدهد.



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

آزمونها برای پنج دبی اولیه مختلف، مطابق جدول ۱ صورت گرفت. دبی طراحی پمپ مورد آزمایش ۳۵٬۱ بوده و دبیهای ذکر شده در جدول ۱ براساس نسبت درصد دبی طراحی میباشند.

جدول (۱): دبی مربوط به آزمونهای مختلف.

شماره آزمون	١	٢	٣	۴	۵
دبی اولیه نسبت به دبی طراحی پمپ	7.11.	7.1•0	<u>/</u> .\	۵۹٪	%٩٠

در سامانه فوق با استفاده از یک پمپ خلاء فشار هوای مخزن بهندرت کاهش داده شده و در هر مرحله سیگنالهای ارتعاشی با

استفاده از یک سنسور شتابسنج که در خروجی پمپ نصب گردیده، استخراج شدهاند. سپس با استفاده از مقادیر مشخصه هایی که در محیط های زمانی، فرکانسی و زمان- فرکانس از سیگنال های جمع آوری شده به دست می آید به بررسی دینامیک- کویتیشن پرداخته شده است.

۳- تحلیل و بررسی سیگنالهای اندازه گیری شده

بر اساس استانداردهای موجود، هنگامی که اختلاف فشار ورودی و خروجی پمپ به حدود ۳ ٪ رسید کویتیشن در حال وقوع است [10]. اما كاملاً روشن است كه حتى قبل از اينكه افت هـد پمـپ به حدود سه درصد برسد کویتیشن آغاز شده و در حال گسترش می باشد، زیرا در دبی های مختلف که آزمون ها صورت گرفت بین پنج تا پانزده ثانیه پس از شروع به کار پمپ خلاء افت هـد و دبی پمپ آغاز می گردد و این هر دو از نشانه های بروز کویتیشن و گسترش آن میباشد. در این تحقیق با توجه به اینکه افت دبی اندکی قبل از افت هد پمپ بروز و ظهور می ابد بهعنوان آغاز كويتيشن و ٣٪ افت هد را بهعنوان حالت گسترش يافته كويتيشن درنظر گرفته شده است. هنگامی که کویتیشن گسترش یافته است، صدایی که از یمپ ساطع می شود 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 به خوبی 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، نمی توان 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 می شود مدت زیادی قبل از این آغاز می گردد. از این رو باید به دنبال روش هایی گشت که بتوان با تکیه بر آنها بروز و گسترش کویتیشن را در مراحل آغازی و بـ مصورت اتوماتیک پایش کرد. یکی از این روشها تحلیل سیگنالهای ارتعاشی پمپ در محیطهای زمانی و فرکانسی و زمان- فرکانسی و استخراج مشخصه های حساس به بروز و گسترش کویتیشن میباشند. در ادامه به بررسی هر یک از موارد ذکر شده پرداخته می شود.

۳-۱- تحلیل در حوزه زمانی
تحلیل در حوزه زمانی
به معنی بررسی رفتار مشخصه های
سیگنال در حوزه زمان نسبت به بروز و گسترش کویتیشن
میباشد. در این تحقیق رفتار پارامترهای زمانی مختلفی مورد

بررسی قرار گرفت که در زیر به تعریف تعـدادی از ایـن پارامترهـا پرداخته می شود. جذر میانگین مربع (RMS) برای یـک سـیگنال گسسته این شاخصه به صورت زیر تعریف می شود:

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

شاخص میانگین مقادیر مطلق از شاخص های مراکز آمار می باشد. شاخص میانگین مقدار مطلق مطابق رابطه (۲) تعریف می شود:

$$Mean\ absolute = \frac{\sum_{i=1}^{N} |x_i|}{N}.$$
 (7)

فاکتور واریانس شامل ممان دوم دادههای آماری حول میانگین دادهها می اشد. واریانس مطابق رابطه (۳) تعریف می گردد:

$$V ariance = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \overline{x})^2}{N - 1}.$$
 (7)

از تقسیم مقدار بیشینه مثبت پیک بر مقدار RMS سیگنال پارامتری بهدست میآید که اندازه دامنه نرمالیزه شده سیگنال را بهدست میآورد. پارامتر ذکر شده فاکتور کرست نام دارد. برای یک سیگنال گسسته این شاخصه بهصورت زیر تعریف میشود: CF = $\frac{Peak}{RMS}$.

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

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.



ارتعاشی در حوزه زمانی (آزمون ۱ ـــــ، آزمون ۲ ــــ، آزمون ۳ ۰۰۰ ، آزمون ۴ ۰۰۰ ، آزمون ۵ ـ ـــ).

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 پمپهای خلاء و همچنین آغاز افت هد و دبی، ابتدا سطح انرژی سیگنال اندکی کاهش می یابد، زیرا در این مرحله ترکیدن حبابهای کویتیشن هنوز انرژی قابل ملاحظهای را به بدنه پمپ وارد نکرده و همچنین دبی شروع به کاهش می کند. بنابراین، انرژی که از سیال به بدنه پمپ وارد میشود 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 حبابها در کنار پرهها و بدنه پمپ می باشد.

۲-۳- تحلیل در حوزه فرکانسی

بر اساس تحقیقات و بررسیهایی که تاکنون صورت گرفته است حساسیت پارامترهای حوزه فرکانسی نسبت به بروز و گسترش کویتیشن بیش از سایر حوزههاست. بهمنظور تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس، ابتدا سیگنالهایی را که در حوزه زمان از بدنه پمپ بهدست آمدهاند از یک فیلتر پایینگذر عبور داده، سپس بعد از ضرب سیگنال در یک تابع پنجره مانند تابع هنینگ با استفاده از روش ^{(۲}FT () به حوزه فرکانسی برده می شود. تحلیل فوریه، یک سیگنال را طبق رابطه (۶) به مجموع پایههای متعامد سینوسی شامل فرکانسهای مختلف بسط می دهد:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$
(9)

www.SID.ir

اگر
$$f(t)$$
 دارای انرژی محدود باشد، مقدار $F(\omega)$ متعلق به هـر
پایه متعامد سینوسی $e^{j\omega t}$ ، طبق رابطه (۲)محاسبه میشود:
 $F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt.$ (۲)

تبدیل فوریه سریع معادل فرم گسسته زیر میباشد: ۲-۱

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

تبدیل سریع فوریه، نمایش گسسته محدوده فرکانسی است که اجـزاء فرکانسـی سـیگنال ارتعاشـی بـا اسـتفاده از ایـن روش بهراحتی نمایش داده میشود. بردن سیگنالها به حوزه فرکانسـی به متخصصین عیبیابی ماشینهای دوار این اجازه را میدهد کـه با توجه به پیکهای فرکانسی مـرتبط بـا بـروز و گسترش عیب خاص، به بررسی رفتار آن بپردازند . اما تاکنون پیک خاصی کـه بتواند آن را به طور مستقیم به بروز و گسترش کویتیشـن مـرتبط بروز و گسترش کویتیشن بر میزان انرژی سیگنال در فرکانسهای بروز و گسترش کویتیشن بر میزان انرژی سیگنال در فرکانسهای عبور پـره، مدولـه ده فرکـانس دوران، فرکـانس هارمونیکهای آنها پرداخته میشود.

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



شکل (۴): طیف فرکانسی سیگنالهای ارتعاشی بهدست امده از بدنه پمپ الف) قبل از کویتیشن، ب) بعد از گسترش کویتیشن.

^{1 -} Fast Fourier Transform

همان طور که در این شکل دیده می شود با بروز و گسترش کویتیشن مقدار دامنه سیگنال در فرکانس هایی مانند فرکانس عبور پره و دوران پمپ افزایش یافته و در بعضی از هارمونیکهای عبور پره مانند هارمونیک چهارم کاهش می یابد. اما همان طور که قابل انتظار است مقدار دامنه سیگنال در فرکانسهای ذکر شده با گسترش مرحله به مرحله كويتيشن تغيير مىكند. بنابراين، نياز 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 می گردد. سپس در اطراف هر یک از پیکهای یک باند فرکانسی کوچک درنظر گرفته شده و بیشینه دامنه سیگنال در باند فوق را اندازه پیک ذکر شده درنظر گرفته می شود. این عملیات بدین منظور صورت می گیرد که با اندکی تغییر در جریان موتور، فرکانس دوران موتور کمی جابه جا شده و بر همین اساس بقیه فرکانس، ای ماشین دوار که وابسته به فركانس دوران هستند نيز جابهجا مي گردند.

شـکل ۷ مقـادیر نرمـال شـده پیـکهـای فرکـانس دوران و فرکانس عبور پره را برحسب زمان نشان میدهد.



شکل (۷): نغییرات پیکهای فرکانسی در الف) فرکانس دوران و
 ب) در فرکانس عبور پره پمپ (آزمون ۱ ^{-۱} ، آزمون ۲ -۰۰ ،
 آزمون ۳ ۰۰۰ ، آزمون ۴ ۰۰۰ ، آزمون ۵ – -۰).

همان طور که در شکل **۲ – الف** قابل ملاحظ و است، میزان پیک فرکانس دوران در مراحل اولیه کویتیشن حساسیت بالایی از خود نشان نمی دهد. 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 می افتد. همانطور که در شکل **۲ – ب** قابل ملاحظ و 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

شکل ۸ مقادیر پیکها در فرکانسهای مدولـهشـده جمعـی و تفاضلی فرکانسهای دوران و فرکانس عبور پره را برحسـب زمـان نشان میدهد. همانطور که در شکل ۸ قابل ملاحظه است، دامنه پیک در فرکانسهای فوق به آغاز کویتیشن، حساسیت قابل ملاحظـه ای نشان نداده و تنها در حالتی که کوتیشـن در حالـت گسـترش یافته قرار گرفته است در دبیهای پایین دامنه پیک افزایش یافتـه و سپس دوباره با گسترش بیشتر کویتیشن کاهش مییابند.



www.SID.ir

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 ^{سے}، آزمون ۲ — ، آزمون ۳ ۰۰۰ ، آزمون ۴ ۰۰۰ ، آزمون ۵ – –).

همان طور 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 به شدت که هش مییابد، اما با گسترش کویتیشن از میزان حساسیت آن کاهش یافته و با سرعت ملایم تری کاهش مییابد و با گسترش بیشتر کوتیشن در بعضی از دبی ها رفتار پیک تغییر کرده و دوباره اندکی افزایش مییابد.

با مشاهده شکل **۹ – ب** می توان ملاحظ ه 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 دبی های پایین، ناپایدار شده به شدت افزایش می یابد.

تاكنون تأثير أغاز و گسترش كويتيشن بر پارامترهايم، در حوزههای زمانی و فرکانسی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. اما عیوب دیگری که در یمپهای گریز از مرکز بروز و ظهور می کنند نیز ممکن است اثر مشابهی با کویتیشن بـر پارامترهـایی که تاکنون مورد بررسی قرار گرفتند، بگذارند. بهعنوان مشال اگر در محل اتصال پرهها بر روی محور پمپ لقی وجود داشته باشد، فرکانس مدوله شده دوران پمپ بر روی فرکانس عبور پره تحریک خواهد شد. در آنبالانسیهای هیدرودینامیکی و مکانیکی فرکانس عبور پره تحریک خواهد شد. در صورتی که پره پمپ به هنگام دوران به چیزی برخورد کند، فرکانس عبور یره تحریک خواهد شد به این دلیل که برخورد پره موجب ایجاد نیروی نامتوازنی بر روی محور یمپ شده و موجب آنبالانسی و در نهایت تحریک فرکانس دوران یمپ نیز خواهد شد. در صورتی که سیال کاری به میزان کافی در اختیار پمپ قرار نگیرد، فرکانس دوران پمپ تحریک می شود، 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 بانـدهای فـوق بـه بررسـی تـأثیر بـروز و گسترش کویتیشن بر مشخصات کویتیشن پرداخته می شود.

۳-۳- تحلیل تبدیل موجک گسسته

فیلتر یکی از مهم ترین ابزار در تحلیل سیگنال و فیلترینگ باند گذر مهم ترین 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 موجک ها میباشد که از طریق اعمال جابه جایی زمانی و مقیاس دهی بر موجک مادر به دست آمده است. اگر $\psi(t)$ موجک مادر باشد، موجک های فرزند آن با تغییر ضرایب a وb (که a پارامتر مقیاس و b پارامتر جابه جایی زمانی میباشد) از رابطه (۹) به دست خواهند آمد:

www.SID.ir

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

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

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

همان طور که در این رابطه قابل ملاحظه است، تبدیل موجک همان انتگرال کانولشن تابع x(t) و تابع موجک می باشد.

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 گسسته سازی انجام شود. الگوریتم ملات¹ یکی از مشهورترین آنهاست. تبدیل موجکی که برمبنای این روش ها انجام میشود، تبدیل موجک گسسته خوانده میشود. شکل شماتیک تبدیل موجک گسسته چندمر حله ای در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



همان طور که در شکل **۱۰** قابل ملاحظه است، در هر مرحله سیگنال از یک فیلتر بالاگذر و پایین گذر عبور داده شده، سپس ساب سمپلینگ^۲ صورت می گیرد. بدین ترتیب سیگنال به باندهای مختلف فرکانسی تجزیه می گردد. 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).

جدول (۲): محتوای فرکانسی هر یک از قسمتهای سیگنال حاصل از تبديل موجك. Level Frequency Range 5~10 kHz cd1 cd2 2.5~5 kHz cd3 1.25~2.5 kHz 0.625~1.25 kHz cd4 cd5 0.3125~0.625 kHz cd6 0.15625~781.25 Hz cd7 0.078125~781.25 Hz

0~781.25 Hz

همانند تحلیلی که در حوزه زمانی صورت گرفت، نه دقیقه سیگنال استخراج شده به سیگنالهای کوچک یک ثانیهای تقسیم شده، سـپس بـر روی هـر سـیگنال کوچـک تبـدیل موجـک صورت گرفته برای هر یک از قسمتهای سیگنال حاصل از تبـدیل موجک، متوسط انرژی مربوط به آن استخراج شده است. شـکل ۱۱ مقادیر انرژی در قسمت های cd2 ، cd1 و cd3 حاصـل از تبـدیل موجک سیگنال را برحسب زمان نشان میدهد.

ca7

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 می ابد، زیرا در این مرحله ترکیدن حبابها کویتیشن هنوز انرژی قابل ملاحظهای را به بدنه پمپ وارد نمی کند و همچنین دبی شروع به کاهش کرده، بنابراین انرژی که از سیال به بدنه پمپ وارد می شود اندکی کاهش می ابد. اما با گسترش مقایسه با شکل **۵** می توان مشاهده نمود که میزان انرژی سیگنال افزایش می ابد، زیرا ترکیدن حبابهای کویتیشن، فرکانس های بالاتر را تحریک می کند، بنابراین اثر آن بر روی coll که فرکانس بالایی دارد بیشتر قابل مشاهده است. همان طور که در شکل **۱۱ ب و ج** قابل مشاهده است، با کاهش باند فرکانسی، اثر ترکیدن حبابهای کویتیشن اثر

www.SID.ir

¹⁻ Mallat

²⁻ Sub Sampling

³⁻ Db10



شکل **۱۲** مقادیر انرژی در قسمتهای cd4 و cd7 حاصل از تبدیل موجک سیگنال را برحسب زمان نشان میدهد. همان طور که در شکل **۱۲** قابل مشاهده است با بروز و گسترش کویتیشن، سطح انرژی سیگنال کاهش مییابد زیرا ترکیدن حبابها، فرکانسهای بالا را تحریک کرده و تأثیر ناچیزی بر باندهای

فرکانسی مربوط به cd7 و cd4 دارد اما افت دبی تأثیر خود را بر فرکانسهای پایین نیز نشان داده و انرژی سیگنال کاهش قابل ملاحظهای مییابد. بنابراین، با توجه به اینکه افت دبی یکی از اثرات بروز و گسترش کویتیشن در پمپهای گریز از مرکز بوده و تأثیر آن بهخوبی در فرکانسهای پایین قابل مشاهده است و میتوان از آن بهمنظور پایش وضعیت کویتیشن استفاده نمود.



۴ – نتیجه گیری

مهمترین عیبی که در پمپهای گریز از مرکز ظاهر گردیده و آسیبهای جبرانناپذیر به آنها میزند کویتیشن میباشد. علاوه بر این، کویتیشن باعث افت هد، دبی و بازدهی پمپ نیز میگردد. بنابراین، طراحی سامانه اخطاری برای آغاز و گسترش کویتیشن ضروری بهنظر میرسد. با تحلیل سیگنالهای ارتعاشی

www.SID.ir

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Alfayeza, L., Mbab, D., and Dysonc, 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.
- 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.
- 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.
- Karassik, I., Krutzsch, W., Fraser, W., and Messina, J. "Pump Handbook", Second Edition, McGraw-Hill, 1986.
- Mechefske, C. K. "Vibration and Shock Handbook", CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, 2005.

یمپ نشان داده شد که با آغاز کویتیشن و افت هـد و دبـی، ابتـدا سطح انرژی سیگنال اندکی کاهش مے یابد، زیرا در این مرحله ترکیدن حبابها کویتیشن هنوز انرژی قابل ملاحظه ای را به بدنه یمپ وارد نمی کند و همچنین دبی شروع به کاهش کرده، بنابراین انرژی که از سیال به بدنه یمپ وارد میشود اندکی کاهش مى يابد. اما با گسترش كويتيشن، ميزان انرژى سيگنال بهشدت افزایش می یابد، زیرا در این مرحله انرژی قالب سیگنال ناشی از ترکیدن حبابها در کنار پرهها و بدنه یمپ میباشد. در مقاله حاضر نشان داده شد که تبدیل موجک، یک ابزار بسیار قوی برای یایش کوپتیشین در یمپها است، زیرا ترکیدن حبابهای کویتیشن فرکانس های بالا را تحریک کرده و اثر آن در این فرکانس ها بیشتر قابل مشاهده است. اما افت دبی ناشی از گسترش کویتیشن فرکانسهای پایین را تحریک میکند. بنابراین، از انرژی سیگنال در محدودههای فرکانسے ذکر شده مےتوان بهمنظور بررسی آغاز و گسترش کویتیشن استفاده نمود. همچنین بررسیهایی که در محیط فرکانسی صورت گرفت نشان میده.د که می توان از انرژی سیگنال در فرکانس های مشخصه ماشین دوار بهمنظور بررسی آغاز و گسترش کویتیشن استفاده نمود. با استفاده از مشخصاتی که از سیگنالهای ارتعاشی بهدست آمد، این قابلیت وجود دارد که با طراحی یک سامانه کنترلی، کویتیشن ۱٫ 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.
- Sedlář, M., Zima, P., Ně mec, 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.
- 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.
- Greitzer, E.M. "The Stability of Pumping Systems", J. Fluids Eng., Vol. 103, No .2, pp. 193–242, 1981.