



تجزیه و تحلیل ارتعاشات پمپ گریز از مرکز با هدف تشخیص زودهنگام پدیده کاویتاسیون

خالد نعیم حسن العابدی^۱ - احمد سهیلی مهدی زاده^۲ *

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۳۱

چکیده:

کاویتاسیون یکی از مهمترین موضوعاتی است که علاوه بر وارد کردن آسیب مکانیکی به پمپ سبب ایجاد اختلال در فرایند پمپاژ شده و در صورت رخ دادن آن فرایند پمپاژ متوقف خواهد شد. در این تحقیق با استفاده از روش‌های مبتنی بر آنالیز ارتعاشات پدیده کاویتاسیون بررسی شد. سیگنال‌های ارتعاشی در سه موقعیت نصب حسگر در راستای افقی، عمودی و جانبی بر روی یاتاقان حامل شفت پمپ اندازه‌گیری شدند. دو حالت سالم و حالت کاویتاسیون بررسی شد. برای هر حالت ۵۰ سیگنال ارتعاشی ثبت شد. هر سیگنال با روش‌های تبدیل فوریه سریع، تبدیل موجک و تجزیه مدهای ذاتی پردازش و به سیگنال‌هایی با اطلاعات جزئی‌تر خرد شد. سپس از هر سیگنال خرد شده ۱۰ مشخصه آماری مانند میانگین، انحراف معیار، چولگی، کورتوسیس و ... استخراج شد و از این مشخصه‌ها جهت ایجاد مدل پیش بینی کاویتاسیون استفاده گردید. نتایج نشان دادند با پیدایش کاویتاسیون رفتار ارتعاشی پمپ تغییر کرد. همچنین تغییر راستای حسگر نیز سبب تغییر میزان ارتعاشات ثبت شده شد. در مجموع بررسی نتایج نشان داد که روش تجزیه مدهای ذاتی و موقعیت نصب حسگر در راستای عمودی دارای بیشترین دقت در تشخیص کاویتاسیون است. بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای حساسیت ۹۸٪ در تشخیص کاویتاسیون بود.

کلمات کلیدی: پمپ، کاویتاسیون، ارتعاشات، یادگیری ماشین

مقدمه

زیادی در این حوزه انجام شده است که رصد و تحلیل ارتعاش رایج‌ترین و مناسب‌ترین روش در دستگاه‌های چرخان است [Zhang et al., 2014]. دروچرو^۵ فیلدمی^۵ بر [Dong et al., 2014] از جریان‌های [Cudina & Prezelj, 2009] استاتور برای آشکارسازی وضعیت کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز استفاده کردند. هراندز^۶ - سولیس و کارلسون^۶ [Hernandez & Carlsson, 2010] جریان و ولتاژ موتور را در شرایط مختلف کاری پمپ اندازه گرفتند و همبستگی بین کاویتاسیون و توان موتور را مطالعه کردند.

باتوجه به اهمیت فراوان دستگاه‌های چرخان و استفاده گسترده از آنها در تصفیه‌خانه‌ها، مدیریت فاضلاب‌ها، کشاورزی، زهکشی و تولید محصولات غذایی استفاده از این ادوات در صنایع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [Flint & Suslick, 1991]. کاویتاسیون یا حفره‌زایی بر عملکرد کاری سامانه پمپاژ و وقوع بسیاری از مشکلات نظیر تخریب ماده، ارتعاش واحد و سر و صدای هیدرولیک^۳ تأثیر زیادی دارد [Koivula et al., 2000]. بنابراین، آشکارسازی کاویتاسیون در مراحل اولیه، از جمله الزامات مهم نگهداشت پیشگیرانه این تجهیزات است. تحقیقات

^۱ - گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران
*Soheili2008@gmail.com نویسنده مسوول

^۲ rotating machines^۳ hydraulic noise^۴ Durocher^۵ Feldmeier^۶ Hernandez-Solis - Carlsson



همراه با تبدیل موجک‌های پیوسته برای تحلیل قاب ارتعاشات طی آغاز بکار پمپ استفاده شده است. در مرجع [Zhang et al., 2014]، پژوهشگران به‌طور عددی عملکرد کاویتاسیون پمپ گریز از مرکز^۸ را بررسی کردند. در مرجع [AL Tobi et al., 2018] پژوهشگران از تبدیل سریع فوری^۹ در مورد علائم ارتعاش استفاده کردند تا خرابی پمپ را شناسایی کنند. در مرجع [Ince et al., 2016]، رصد وضعیت موتور و سامانه عیب‌یاب اولیه‌ای پیشنهاد می‌شود که از شبکه‌های عصبی پیچشی^{۱۰} استفاده می‌کند. با توجه به مطالب ارائه شده در فوق با ترکیب روش‌های پردازش سیگنال و هوش مصنوعی می‌توان پدیده کاویتاسیون را تشخیص داد. بنابراین در این تحقیق مدلی برای تشخیص زود هنگام پدیده کاویتاسیون ارائه شد.

جدول ۱- مشخصات فنی پمپ گریز از مرکز چند مرحله‌ای

WKL 32/3	نوع	
۵/۵	kW	توان مورد نیاز
۱۴۸۰	rpm	سرعت دورانی نقطه بهینه کارکرد
۱۶۵	m	ارتفاع پمپاژ
۱۰۰	m ³ /h	ظرفیت آبدی

شرایط ایجاد کاویتاسیون

برای مشخص کردن قابلیت کاویتاسیون سیستم در سیال در حال جریان از پارامتر کاویتاسیون استفاده شد. این پارامتر به صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$\Delta = \frac{P - P_v}{\rho V^2} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در رابطه فوق P برابر با فشار مطلق، P_v فشار بخار مایع، ρ چگالی مایع و V سرعت سیال است. وقتی در رابطه ۱ دلتا برابر با صفر است، فشار مایع به فشار بخار رسیده و جوشیدن اتفاق می‌افتد. ضریب دلتا مشخص کننده ظرفیت مکش در نقطه بهره برداری است. شکل دیگر ضریب کاویتاسیون به فرم رابطه ۲ است:

چودینا [Chudina, 2003] از طیف نویز کاویتاسیون داخلی برای آشکارسازی آغاز کاویتاسیون در پمپ گریز از مرکز بهره گرفت.

سرنتیچ^۸ و همکارانش [Cerentic et al., 2008] با استفاده از علائم ارتعاش و بررسی نوع سروصدا^{۱۱} کاویتاسیون را در پمپ آشکار نمودند. وانگ و همکارانش [Wang et al., 2013] با استفاده از تجزیه بسته موجک کاویتاسیون را ارزیابی کردند و ویژگی‌های منحصربه‌فرد نویز کاویتاسیون را با استفاده از دامنه‌های بیشینه در بازه تبدیل شده توصیف نمودند. همچنین در پژوهش‌های اخیر، انواع روش‌های یادگیری ماشین^{۱۲} و شیوه‌های هوش مصنوعی^{۱۳} را برای دسته‌بندی داده‌های گردآوری شده درباره تجهیزات بررسی شده است. از ماشین بردار پشتیبانی^{۱۴} همراه با تبدیل موجک‌های پیوسته برای تحلیل قاب ارتعاشات طی آغاز بکار پمپ استفاده شده است. در مرجع [Zhang et al., 2014]، پژوهشگران به‌طور عددی عملکرد کاویتاسیون پمپ گریز از مرکز^{۱۵} را بررسی کردند. در مرجع [AL Tobi et al., 2018] پژوهشگران از تبدیل سریع فوری^۹ در مورد علائم ارتعاش استفاده کردند تا خرابی پمپ را شناسایی کنند. در مرجع [Ince et al., 2016]، رصد وضعیت موتور و سامانه عیب‌یاب اولیه‌ای پیشنهاد می‌شود که از شبکه‌های عصبی پیچشی^{۱۰} استفاده می‌کند. با توجه به مطالب ارائه شده در فوق با ترکیب روش‌های پردازش سیگنال و هوش مصنوعی می‌توان پدیده کاویتاسیون را تشخیص داد. بنابراین در این تحقیق مدلی برای تشخیص زود هنگام پدیده کاویتاسیون ارائه شد.

مواد و روش‌ها

مجموعه آزمایشی مورد بررسی

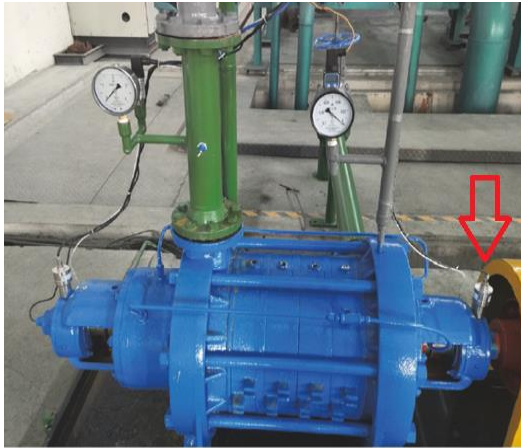
در این تحقیق از یک پمپ چندطبقه گریز از مرکز برای شبیه سازی پدیده کاویتاسیون استفاده شد. این پمپ از مدل ۵ طبقه بود که دارای ۵ پروانه بود. پروانه طبقه اول دارای شش پره و پروانه طبقات دوم تا پنجم دارای هفت پره بودند. پروانه‌های از نوع بسته بودند. پمپ گریز از مرکز بررسی شده دارای هد بیشینه ۱۶۵ متر و دبی ۱۰۰ پشتیبانی^{۱۷}

¹ centrifugal pump
¹ Fast Fourier Transform (FFT)
¹ Convolutional neural networks
¹ support vector machine
¹ centrifugal pump
¹ Fast Fourier Transform (FFT)
² Convolutional neural networks

⁷ Chudina
⁸ Cernetic
⁹ noise
¹ wavelet packet decomposition (WPD)
¹ machine learning
¹ artificial intelligence
¹ support vector machine



شکل ۱- محل نصب حسگر ارتعاش سنج



فرایند پردازش سیگنال و استخراج ویژگی

در این تحقیق هر سیگنال ارتعاشی توسط روش تبدیل فوریه سریع، تبدیل موجک و تجزیه مدهای تجربی تبدیل و تجزیه شد. برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص تبدیل فوریه، تبدیل موجک و تجزیه مدهای تجربی به ترتیب مراجع [Betta et al., 2002]، [Al-Badour et al., 2011] و [Tang et al., 2011] بررسی شوند. بعد از فرایند پردازش سیگنال، از هر سیگنال تجزیه شده ویژگی‌های جدول ۲ استخراج شد.

$$\Delta = \frac{(H_a - H_i)H_v}{H} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه فوق H_a فشار هوا، H_v فشار بخار آب و H هد کل تامینی توسط پمپ. NPSH هد خالص مثبت در دهانه مکش است که بیان کننده میزان هد (Head) یا تراز انرژی است که سیال باید داشته باشد تا در فاز مایع (تک فاز) باقی بماند و به طور مستقیم بر ایجاد کاویتاسیون تاثیر گذار است. با توجه شرایطی که پمپ در آن کار می کند برای جلوگیری از پدیده کاویتاسیون باید فشار مکش مثبت خالص موجود از فشار مکش مثبت خالص مورد نیاز بیشتر باشد. در این تحقیق برای ایجاد پدیده کاویتاسیون سه عمل به طور همزمان انجام شد.

۱- محدود کردن جریان ورودی به پمپ

۲- استفاده از سیال با دمایی نزدیک به ۷۰ درجه سلسیوس

۳- پایین تر قرار دادن لوله مکش از سطح پمپ

جمع آوری داده‌های ارتعاشی

در شکل ۱ محل نصب حسگر ارتعاش سنج نشان داده شده است. حسگر ارتعاش سنج از نوع پیزوالکتریک مدل INV9832 بود که سیگنال‌های ارتعاشی ثبت شده توسط آن در یک مجموعه دیتالاگر با عنوان ایزی وایبر ذخیره شد. فرکانس نمونه برداری دستگاه دیتالاگر ۲۵۰ هرتز بود.

جدول ۲- ویژگی‌های آماری و روابط ریاضی آنها

نام ویژگی	رابطه ریاضی
میانگین	$F_1 = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)}{N}$
انحراف معیار	$F_2 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - F_1)^2}{N}}$
جزر میانگین مربعات	$F_3 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n))^2}{N}}$
مقدار دامنه قله سیگنال	$F_4 = \max(x(n))$
ضریب تیزی	$F_5 = \frac{F_4}{F_3}$
واریانس	$F_6 = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - F_1)^2}{N}$
ضریب پراکندگی	$F_7 = \frac{F_2}{F_1} \times 100$
لغزش	$F_8 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - F_1)^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - F_1)^2}\right)^3}$
چولگی	$F_9 = \sqrt{\frac{N-1}{N}} \times \frac{1}{(N-2) \cdot F_6^{1.5}} \times \sum_{n=1}^N (x(n) - F_1)^3$
کورتوسیس	$F_{10} = \frac{(N-1) \times (N+1)}{(N-3) \times (N-2) \times N \times F_6^2} \times \sum_{n=1}^N (x(n) - F_1)^4 - \frac{3 \times (N-1)^2}{(N-2)(N-3)} + 3$



مجله مهندسی زیست سامانه

پمپ در حالت سالم یک رفتار سینوسی است که دامنه تغییرات و نوسان ارتعاشات در رابطه ۵- تا ۵+ تغییر می کند. این سیگنال فاقد هر گونه نبض ارتعاشی است. در حالت سالم پمپ هیچ گونه مولفه یا رفتار ارتعاشی نامتعارف و بر هم زننده طیف ارتعاشی مشاهده نشد و طیف ارتعاشی کاملاً متقارن است. بررسی رفتار ارتعاشی پمپ در حالت رخ داد کاویتاسیون نشان داد که دامنه ارتعاشات پمپ در حدود ۴۰٪ افزایش یافت به طوری که دامنه تغییرات آن بین ۵- تا ۷/۵+ میلیمتر بر ثانیه در نوسان است و دارای ظاهر نامتقارن است. در شکل ۴ و ۵ سیگنال ارتعاشی پمپ گریز از مرکز در حالت سلامت و کاویتاسیون در شرایط نصب افقی حسگر نشان داده شده است. برای سیگنال حالت سالم

مطابق شکل ۲ سیگنال متقارن و دامنه تغییرات آن در بازه ۵- تا ۵+ میلیمتر بر ثانیه در حال نوسان است و سیگنال فاقد هر گونه نوسان غیر متعارف است. در حالت رخ داد کاویتاسیون دامنه ارتعاشات به مقدار ۵۰٪ افزایش یافت اما در موقعیت افقی نصب حسگر شکل ظاهری سیگنال ارتعاشی پمپ متقارن بود. در شکل ۶ و ۷ نیز رفتار ارتعاشی پمپ در حالت سالم و حالت رخ دادن کاویتاسیون در موقعیت جانبی نصب حسگر نشان داده شده است. رفتار ارتعاشی پمپ در حالت سالم مشابه حالت‌های قبلی فاقد هر گونه نبض و یا رفتار ارتعاشی موقتی یا گذرا است اما با ایجاد کاویتاسیون دامنه ارتعاشات افزایش یافت. شکل و رفتار سیگنال ارتعاشی در حالت کاویتاسیون در این حالت تا حدودی نامتقارن است می توان گفت شکل نامتقارن در این حالت حد وسط حالت عمودی و افقی است.

شبکه عصبی مصنوعی^۱ (ANN)

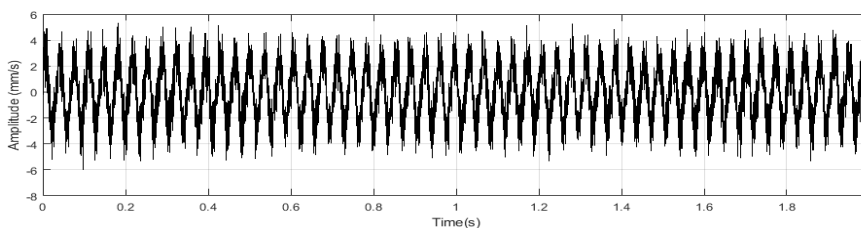
ANN یک سیستم پردازش اطلاعات توزیع شده به شدت موازی متشکل از نورون‌های مصنوعی است که از خصوصیات عملکردی خاصی شبیه به سلول‌های عصبی زیستی مغز انسان برخوردارند. یک شبکه عصبی با معماری توصیف می شود که الگوی اتصال بین گره‌ها و روش مورد استفاده برای تعیین وزن اتصال و تابع فعال سازی را نشان می دهد. متداول ترین معماری شبکه عصبی مصنوعی، معماری سلسله مراتبی پیش خور است. شبکه عصبی پیش خور سه لایه معمولی از تعدادی عنصر به نام گره و مسیرهای اتصالی تشکیل شده که آنها را به متصل می سازد. نورون هنگام دریافت سیگنال ورودی، آن را پردازش کرده و سیگنال خروجی را به سایر نورون‌های متصل به هم ارسال می کند. ANN برای تحلیل مسائل پیچیده مناسب است. با این حال، معایبی هم دارد از جمله نیاز به مجموعه آموزشی بزرگ و زمان بر بودن. شبکه ANN برای مجموعه آموزشی صحت بالایی ارائه می دهد، اما درون یابی ارائه شده برای داده های آزمایشی کافی نیست [Atmaca et al., 2001].

بحث و نتایج

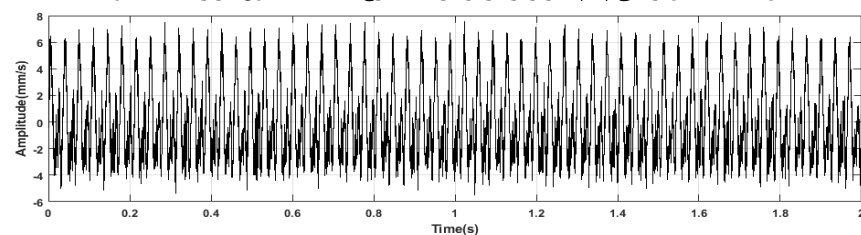
تحلیل سیگنال های ارتعاشی

رفتار ارتعاشی سیگنال ارتعاشی در حوزه زمان برای دو حالت سلامت پمپ و کاویتاسیون و در سه راستای عمودی، افقی و جانبی قرار گیری حسگر آورده شده است. در شکل ۲ رفتار ارتعاشی پمپ در حالت سلامت و در شکل ۳ رفتار ارتعاشی پمپ در حالت رخ دادن کاویتاسیون برای موقعیت عمودی نصب حسگر نشان داده شده است. رفتار ارتعاشی

شکل ۲- سیگنال زمانی پمپ گریز از مرکز در حالت سلامت پمپ در راستای عمودی

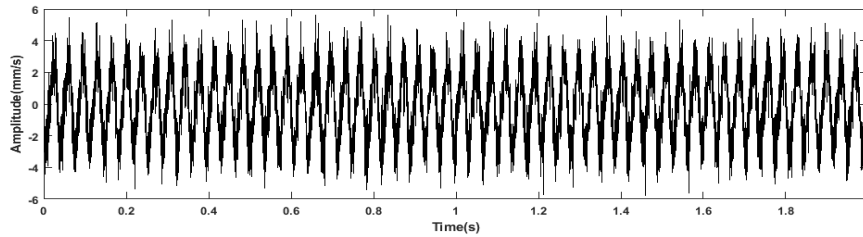


شکل ۳- سیگنال زمانی پمپ گریز از مرکز در حالت رخ داد کاویتاسیون در راستای عمودی

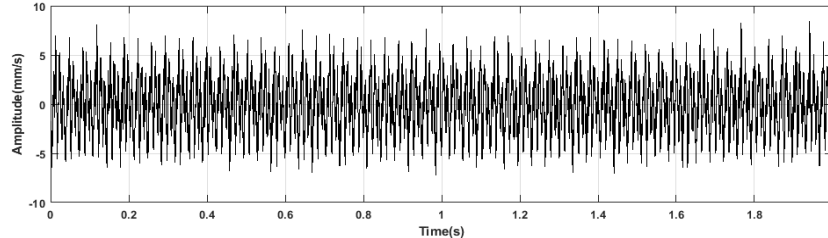


¹ Artificial Neural Network

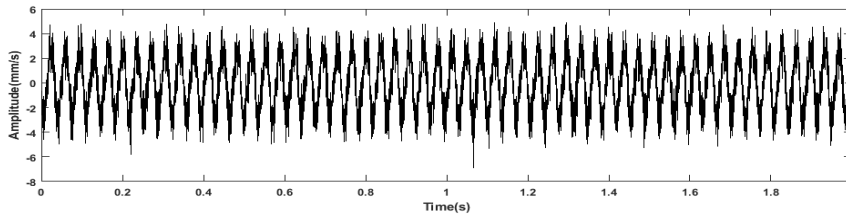
شکل ۴- سیگنال زمانی پمپ گریز از مرکز در حالت سلامت پمپ در راستای افقی



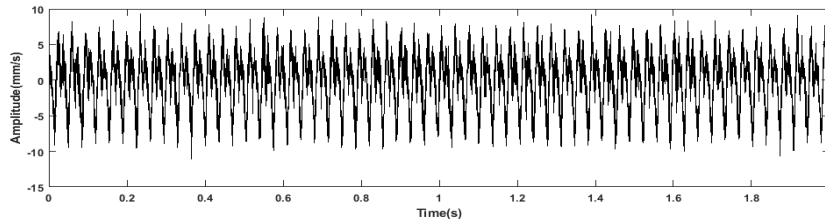
شکل ۵- سیگنال زمانی پمپ گریز از مرکز در حالت رخ داد کاپیتاسیون در راستای افقی



شکل ۶- سیگنال زمانی پمپ گریز از مرکز در حالت سلامت پمپ در راستای جانبی



شکل ۷- سیگنال زمانی پمپ گریز از مرکز در حالت رخ داد کاپیتاسیون در راستای جانبی

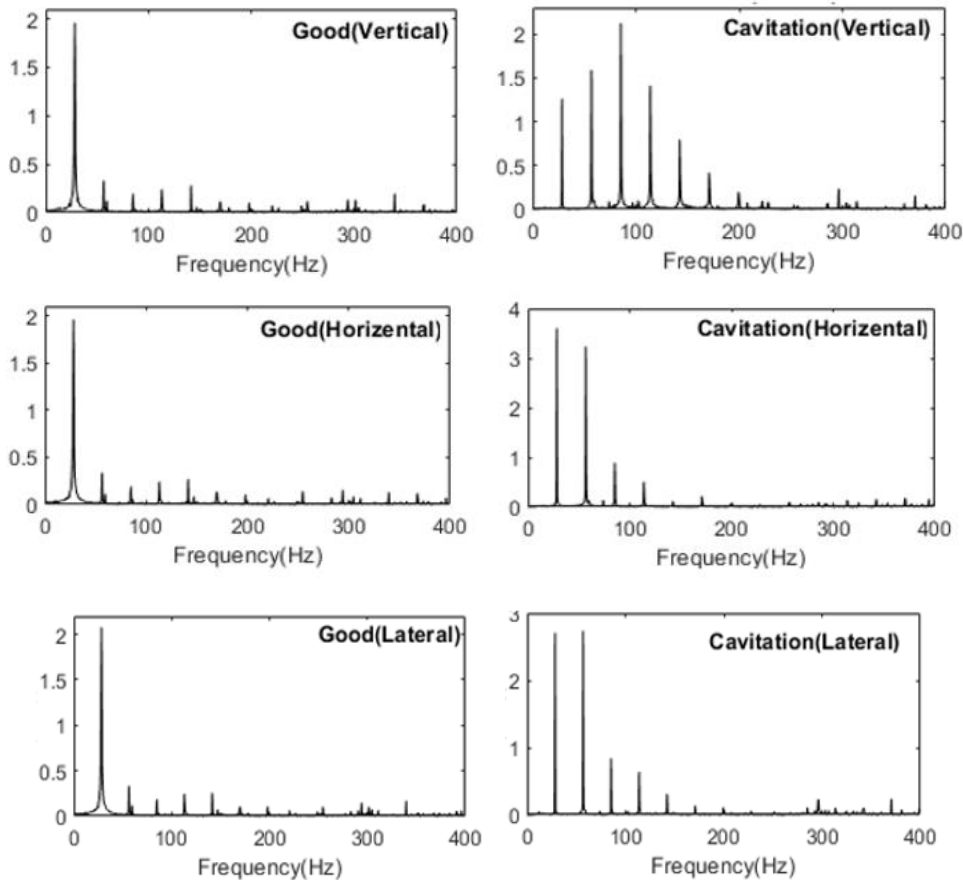


در مجموع بررسی رفتار ارتعاشی در حوزه زمان نشان داد که با ایجاد کاپیتاسیون هم دامنه ارتعاشات افزایش یافت و هم شکل متقارن سیگنال تغییر کرد. در حالت سالم پمپ، تغییر موقعیت نصب حسگر تغییری در رفتار ارتعاشی پمپ ایجاد نکرد اما در حالت کاپیتاسیون با تغییر موقعیت حسگر، شکل متقارن و توزیع رفتار ارتعاشی پمپ تغییر کرد.

در شکل ۸ طیف فرکانسی پمپ در حالت سلامت و حالت کاپیتاسیون و در موقعیت‌های مختلف نصب حسگر نشان داده شده است. در حالت سلامت یک مولفه فرکانسی غالب در فرکانس $۲۸/۵$ هرتز در هر سه راستای افقی، عمودی و جانبی نشان داده شده است. در هر سه موقعیت نصب حسگر رفتار طیف فرکانسی کاملاً مشابه هم هستند. قله‌های فرکانسی دیگری در طیف فرکانسی وجود دارد که دامنه این قله‌ها بسیار کم است. در حالت رخ دادن کاپیتاسیون تعداد فرکانس‌های غالب افزایش یافتند. در حالت رخ دادن کاپیتاسیون فرکانس‌های غالب $۲۸/۵$ ، ۵۷

در شکل ۸ طیف فرکانسی پمپ در حالت سلامت و حالت کاپیتاسیون و در موقعیت‌های مختلف نصب حسگر نشان داده شده است. در حالت سلامت یک مولفه فرکانسی غالب در فرکانس $۲۸/۵$ هرتز در هر سه راستای افقی، عمودی و جانبی نشان داده شده است. در هر سه موقعیت نصب حسگر رفتار طیف فرکانسی کاملاً مشابه هم هستند. قله‌های فرکانسی دیگری در طیف فرکانسی وجود دارد که دامنه این قله‌ها بسیار کم است. در حالت رخ دادن کاپیتاسیون تعداد فرکانس‌های غالب افزایش یافتند. در حالت رخ دادن کاپیتاسیون فرکانس‌های غالب $۲۸/۵$ ، ۵۷

شکل ۸- طیف فرکانسی سیگنال‌های ارتعاشی پمپ در حالت سلامت و کاویتاسیون و در راستاهای مختلف نصب حسگر



سلامت و حالت کاویتاسیون می‌توان به اختلاف آنها پی برد و علائم یافتن و آشکارسازی کاویتاسیون را تشخیص داد. برای سایر موقعیت‌های حسگرها نیز محدوده فرکانسی سیگنال‌های تجزیه شده مشابه جدول ۳ است. در مجموع بررسی سیگنال‌ها نشان داد بیشترین اختلاف بین حالت سلامت پمپ و حالت کاویتاسیون در سیگنال تقریب ۸، سیگنال جزئیات ۷، جزئیات ۴، جزئیات ۳، جزئیات ۲ و جزئیات ۱ مشاهده شد. البته این موضوع به صورت بررسی ظاهری نتیجه گرفته شد که در ادامه برای انتخاب بخش تجزیه شده حاوی اطلاعات کاویتاسیون از روش انتخاب ویژگی استفاده خواهد شد. با توجه به اینکه ضرایب جزئیات ۱ تا ۴ اجزای فرکانس بالا هستند می‌توان چنین گفت که بیشتر تفاوت‌ها بین سیگنال‌های ارتعاشی حالت سالم و کاویتاسیون در اجزای فرکانسی بالا مشاهده شد.

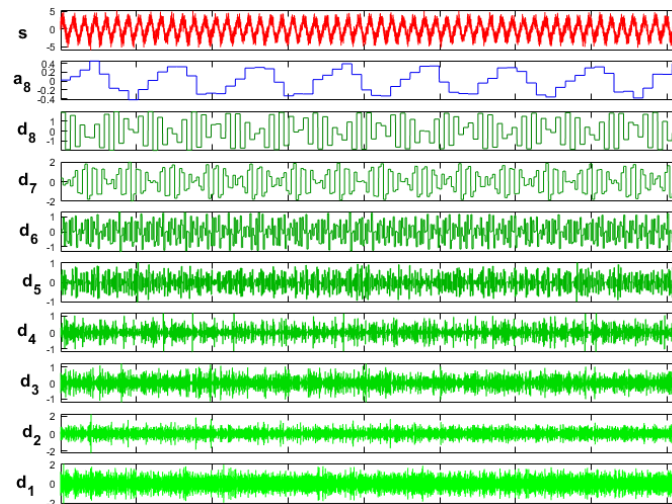
پردازش سیگنال

سیگنال‌های ارتعاشی توسط دو روش تبدیل موجک و تجزیه مدهای تجربی تجزیه شدند. برای تجزیه موجک از موجک مادر دویشی ۱ و هشت سطح تجزیه استفاده شد. تجزیه مدهای تجربی هم براساس کمترین زیرباند یا IMF استخراجی از سیگنال بررسی و پردازش شدند.

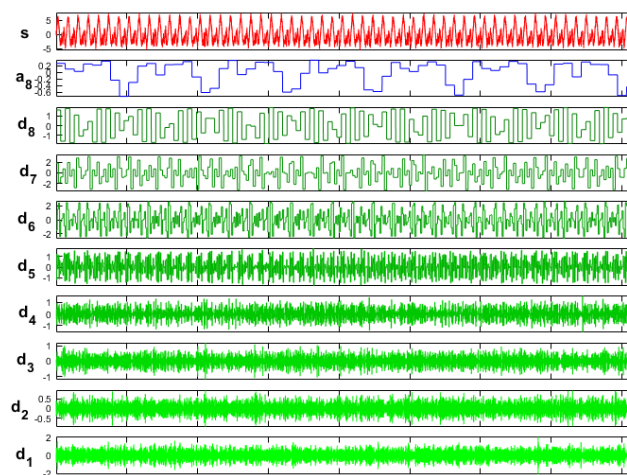
تبدیل موجک

در شکل‌های ۹ و ۱۰ تجزیه سیگنال توسط تبدیل موجک برای حالت سلامت و حالت کاویتاسیون نشان داده شده است. در بخش تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس مشخص شد که بالاترین مولفه فرکانسی موجود در سیگنال‌های ارتعاشی ۳۷۰ هرتز است. با توجه به خاصیت تبدیل موجک و تفکیک سیگنال به اجزای فرکانس بالا و پایین، هر سیگنال به هشت سیگنال جزئیات و یک سیگنال تقریب دسته بندی شد که در جدول ۳ محدوده فرکانسی هر سیگنال تفکیک شده نشان داده شده است. همانطور که مشخص است هر بخش از سیگنال تجزیه شده رفتار و تغییرات زمانی محدوده فرکانسی خاصی را نشان می‌دهد که با بررسی و مقایسه این بخش‌ها با هم برای حالت

شکل ۹- تبدیل موجک سطح هشت (سیگنال حالت سلامت پمپ)



شکل ۱۰- تبدیل موجک سطح هشت (سیگنال حالت رخ دادن کاویتاسیون)



جدول ۳- محدوده فرکانسی سیگنال های تجزیه شده توسط تبدیل موجک

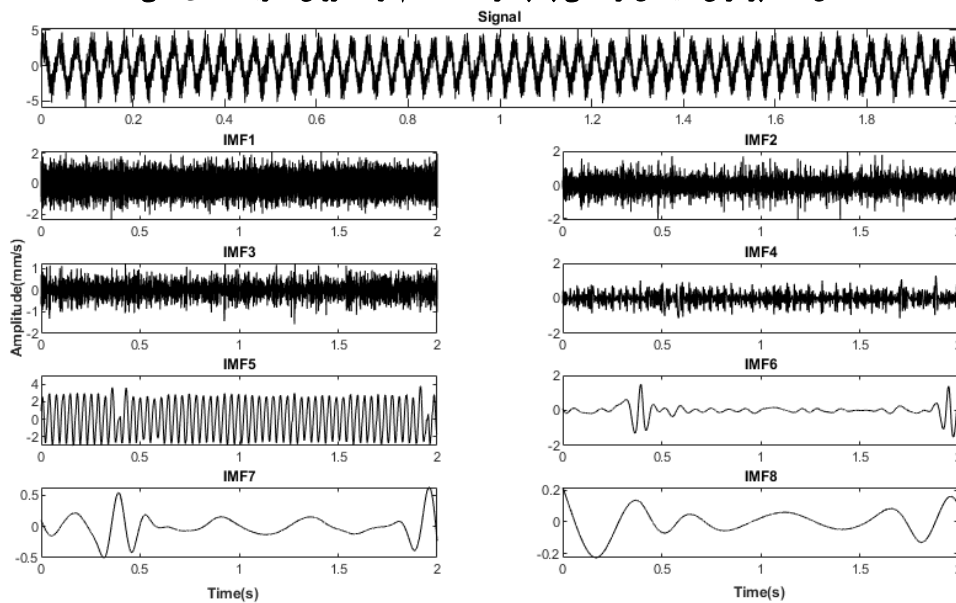
محدوده فرکانسی (هرتز)	خروجی تبدیل موجک
۳۸۴ تا ۱۹۲	جزئیات ۱ (d1)
۱۹۲ تا ۹۶	جزئیات ۲ (d2)
۹۶ تا ۴۸	جزئیات ۳ (d3)
۴۸ تا ۲۴	جزئیات ۴ (d4)
۲۴ تا ۱۲	جزئیات ۵ (d5)
۱۲ تا ۶	جزئیات ۶ (d6)
۶ تا ۳	جزئیات ۷ (d7)
۳ تا ۱/۵	جزئیات ۸ (d8)
۱/۵ تا ۰/۷۵	تقریب ۸ (a8)

خوبی این روش این است که فرض می‌کند هر سیگنال فقط از زیرباند هایش تشکیل شده و فرکانس‌های اضافی و گذرا را از سیگنال حذف می‌کند. در شکل ۱۲ تجزیه سیگنال به زیر باندهایش در حالت کاویتاسیون نشان داده شده است. با مقایسه تک تک زیر باندها با هم و مقایسه حالت سلامت و حالت کاویتاسیون می‌توان علائم و نشانه‌هایی از کاویتاسیون را در سیگنال‌های پردازش شده پیدا کرد که به واسطه آن می‌توان یک روش برای تشخیص هوشمند کاویتاسیون ارائه کرد.

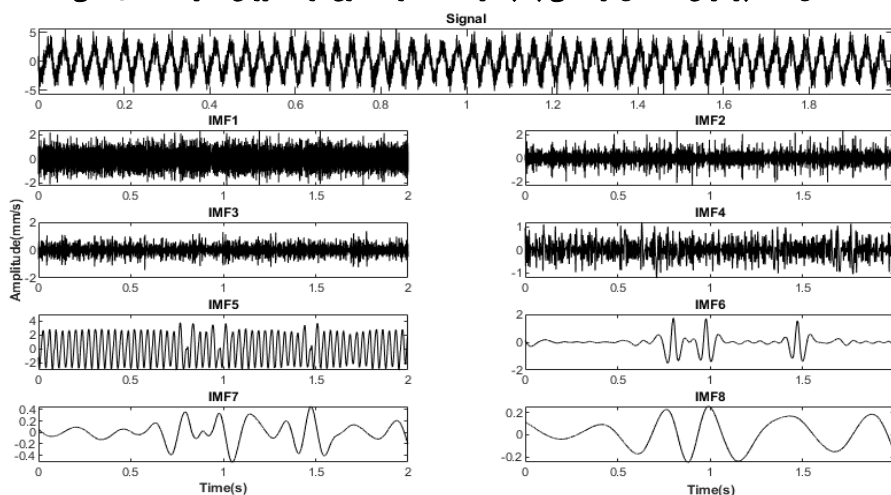
تجزیه مدهای تجربی

در شکل ۱۱ خروجی تجزیه مدهای ذاتی سیگنال ارتعاشی پمپ در حالت سلامت نشان داده شده است. در این روش سیگنال ارتعاشی به هشت زیر باند یا هشت مولفه ذاتی تجزیه شده است. هر زیر باند یا هر IMF رفتار تعداد خاصی از مولفه‌های فرکانسی را نشان می‌دهد. همانند تبدیل موجک که هر سیگنال تجزیه شده حاوی اطلاعات طیفی خاص از فرکانس‌ها است در این روش هم هر زیر باند رفتار فرکانس خاصی را در سیگنال اصلی نشان می‌دهد.

شکل ۱۱- پردازش سیگنال ارتعاشی پمپ در حالت سالم توسط روش تجزیه مدهای ذاتی



شکل ۱۲- پردازش سیگنال ارتعاشی پمپ در حالت کاویتاسیون توسط روش تجزیه مدهای ذاتی



شد. از این ویژگی‌ها جهت پیاده‌سازی مدل تشخیص کاویتاسیون استفاده شد.

تشخیص پدیده کاویتاسیون

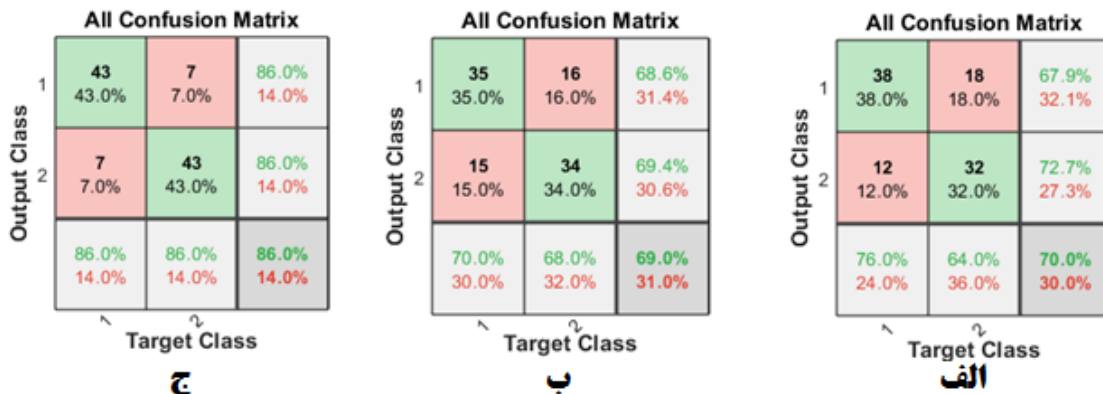
در شکل ۱۳ نتایج تشخیص پدیده کاویتاسیون با استفاده

استخراج و انتخاب ویژگی

همانطور که قبلاً هم بیان شد از هر سیگنال پردازش شده ۱۰ ویژگی استخراج شد. در روش تبدیل موجک ۹۰ ویژگی و در روش تجزیه مدهای ذاتی ۸۰ ویژگی استخراج

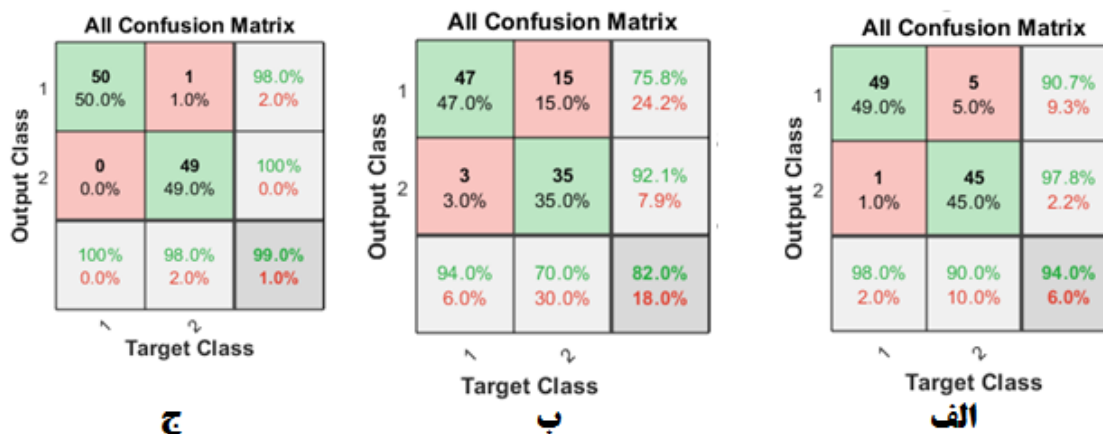
عصبی در حالت قرارگیری جانبی، افقی و عمودی حسگر برای تشخیص کاویتاسیون به ترتیب ۶۴٪، ۶۸٪ و ۸۶٪ به دست آمد که بالاترین حساسیت شبکه عصبی در موقعیت نصب حسگر به طور عمودی به دست آمد. نتایج مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص کاویتاسیون با استفاده از داده های پردازش شده توسط تبدیل موجک نشان داد که نصب حسگر در راستای عمودی بهترین روش برای ضبط ارتعاشات است.

شکل ۱۳- نتایج تشخیص کاویتاسیون با استفاده از سیگنال های پردازشی توسط تبدیل موجک (راستای نصب حسگر الف: جانبی، ب: افقی، ج: عمودی)



با ۸۲٪، ۹۴٪ و ۹۹٪ بود. در مجموع بررسی نتایج نشان داد که روش تجزیه مدهای ذاتی و موقعیت نصب حسگر در راستای عمودی دارای بیشترین دقت در تشخیص کاویتاسیون است. بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای حساسیت ۹۸٪ در تشخیص کاویتاسیون بود. مناسبترین راستا نیز برای نصب حسگر، راستای عمودی نصب حسگر بود.

شکل ۱۴- نتایج تشخیص کاویتاسیون با استفاده از سیگنال های پردازشی توسط تجزیه مدهای ذاتی (راستای نصب حسگر الف: جانبی، ب: افقی، ج: عمودی)



نشان دهنده تغییرات در ارتعاشات است. در حالت سالم پمپ طیف ارتعاشی کاملاً متقارن است. بررسی رفتار ارتعاشی پمپ در حالت رخ داد کاویتاسیون نشان داد که دامنه

نتیجه گیری
رفتار ارتعاشی پمپ در حالت سالم یک رفتار سینوسی است که این سیگنال فاقد هر گونه نبض ارتعاشی بود که



Chudina, M., Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump. *Acoustical physics*, 2003. 49(4): p. 463-474.

Černetič, J., J. Prezelj, and M. Čudina, Use of noise and vibration signal for detection and monitoring of cavitation in kinetic pumps. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008. 123(5): p. 3316-3316.

Wang, J., L. Pan, and S. Cao, Wavelet transforms applied to cavitation noise analysis for hydro-turbine. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013. 32(4): p. 215-220.

ALTobi, M.A.S., et al. Centrifugal pump condition monitoring and diagnosis using frequency domain analysis. in *International Conference on Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operation*. 2018. Springer.

Ince, T., et al., Real-time motor fault detection by 1-D convolutional neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016. 63(11): p. 7067-7075.

Betta, G., et al., A DSP-based FFT-analyzer for the fault diagnosis of rotating machine based on vibration analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002. 51(6): p. 1316-1322.

Al-Badour, F., M. Sunar, and L. Cheded, Vibration analysis of rotating machinery using time-frequency analysis and wavelet techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011. 25(6): p. 2083-2101.

Tang, J., et al., Vibration analysis based on empirical mode decomposition and partial least square. *Procedia Engineering*, 2011. 16: p. 646-652.

Atmaca, H., B. Cetisli, and H.S. Yavuz. The comparison of fuzzy inference systems and neural network approaches with ANFIS method for fuel consumption data. in *Second international conference on electrical and electronics engineering papers ELECO.2001.Citeseer*.

ارتعاشات پمپ در حدود ۴۰٪ افزایش یافت. اما بررسی طیف فرکانسی نشان داد که در حالت سلامت پمپ یک مولفه فرکانسی غالب در فرکانس ۲۸/۵ هرتز در هر سه راستای افقی، عمودی و جانبی وجود دارد. در هر سه موقعیت نصب حسگر رفتار طیف فرکانسی کاملاً مشابه هم هستند. قله‌های فرکانسی دیگری در طیف فرکانسی وجود دارند که دامنه این قله‌ها بسیار کم است اما در حالت رخ دادن کاویتاسیون تعداد فرکانس‌های غالب افزایش یافتند. دقت کلی مدل در تشخیص حالت پمپ برای سیگنال‌های پردازش شده توسط تبدیل موجک با تغییر محل حسگر، مقدار آن نیز تغییر کرد به طوری که دقت شبکه عصبی در حالت قرارگیری جانبی، افقی و عمودی حسگر به ترتیب ۷۰٪، ۶۹٪ و ۸۶٪ به دست آمد. نتایج نشان داد که روش پردازش سیگنال با استفاده از تجزیه مدهای ذاتی بیشتر از روش تبدیل موجک بود. دقت کلی مدل‌های مختلف شبکه عصبی پیاده سازی شده با حسگرهای نصب شده در موقعیت‌های افقی، عمودی و جانبی به ترتیب برابر با ۸۲٪، ۹۴٪ و ۹۹٪ بود. در مجموع بررسی نتایج نشان داد که روش تجزیه مدهای ذاتی و موقعیت نصب حسگر در راستای عمودی دارای بیشترین دقت در تشخیص کاویتاسیون است.

References

- Flint, E.B. and K.S. Suslick, The temperature of cavitation. *Science*, 1991. 253(5026): p. 1397-1399.
- Koivula, T., A. Ellman, and M. Vilenius, Experiences on cavitation detection methods. *Tampere University of Technology, Institute of Hydraulics and Automation, Tampere*, 2000.
- Zhang, Y., et al. Numerical investigation of the effects of splitter blades on the cavitation performance of a centrifugal pump. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2014. IOP Publishing.
- Dong, L., et al., Cavitation detection in centrifugal pump based on interior flow-borne noise using WPD-PCA-RBF. *Shock and Vibration*, 2019. 2019.
- Čudina, M. and J. Prezelj, Detection of cavitation in operation of kinetic pumps. Use of discrete frequency tone in audible spectra. *Applied Acoustics*, 2009. 70(4): p. 540-546.
- Hernandez-Solis, A. and F. Carlsson, Diagnosis of submersible centrifugal pumps: a motor current and power signature approaches. *EPE Journal*, 2010. 20(1): p. 58-64.

Centrifugal pump vibration analysis with the aim of early detection of cavitation phenomenon

Khalid Naeem Hassan Al-Abidi¹, Ahmad Soheili Mehdizadeh^{2*}

1-2- Department of Mechanical Engineering, Technical and Engineering Faculty, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

* Corresponding author: Soheili2008@gmail.com

Received: 06 Aug 2022

Accept: 26 Sep 2022

Abstract

Cavitation is one of the most important issues that, in addition to causing mechanical damage to the pump, causes disturbances in the pumping process, and if it occurs, the pumping process will be stopped. In this research, the cavitation phenomenon was investigated using methods based on vibration analysis. The vibration signals were measured in three sensor installation positions in horizontal, vertical and lateral directions on the pump shaft carrier bearing. Two healthy states and cavitation state were investigated. 50 vibration signals were recorded for each mode. Each signal was processed with the methods of fast Fourier transform (FFT), wavelet transform (WT) and empirical mode decomposition (EMD) and was broken into signals with more detailed information. After each broken signal, 10 statistical characteristics such as mean, standard deviation, skewness, kurtosis, etc. were extracted. And these characteristics were used to create a cavitation prediction model. The results showed that the vibration behavior of the pump changed with the occurrence of cavitation. Also, changing the direction of the sensor caused a change in the amount of recorded vibrations. In general, the analysis of the results showed that the EMD method and the sensor installation position in the vertical direction have the highest accuracy in detecting cavitation. The best artificial neural network model had a sensitivity of 98% in cavitation detection.

Keywords: Pump, Cavitation, Vibrations, Machine learning