

بررسی پارامترهای حساسیت برای تشخیص خلأزایی خودکار در توربین‌های آبی سد سفیدرود با در نظر گرفتن عمر مفید باقی‌مانده

سارا کهنسال¹ و علیرضا مردوخ پور^{2*}

1- کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران
2- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران

* alireza.mardookhpour@liau.ac.ir

(دریافت مقاله: 97/6/12؛ پذیرش مقاله: 97/11/20)

چکیده - در تحقیق حاضر، تشخیص آستانه خلأزایی و خودکارسازی تشخیص فرایند، با توجه به عمر مفید باقی‌مانده توربین نیروگاه سفیدرود بررسی شده است. ورودی مدل تولید شده در برنامه متلب، شامل داده‌های حاصل از هیدروتوربین کاپلان واقع در نیروگاه برق آبی تاریک می‌باشد. روش پیشنهادی بر مبنای 61 ویژگی حاصل از 6 پارامتر حساسیت خلأزایی و 17 شرایط عملیاتی می‌باشد. با هدف آموزش برنامه متلب، تعداد 12 مجموعه آموزش فردی و 4095 ترکیب منحصر به فرد ایجاد گردید و تعداد 408 داده جهت آزمون انتخاب شده است. داده‌های آموزشی با ترکیب نوع حسگر و ویژگی حساسیت خلأزایی، برای پیش‌بینی خلأزایی به خدمت گرفته شدند و بهترین دقت داده‌های آموزشی به 98 درصد رسید. نتایج نشان داد که استفاده از فرایند کاملاً خودکار برای تعیین حساسیت و طبقه‌بندی خلأزایی مناسبتر از یک فرایند مبتنی بر آستانه‌های انتخاب شده به روش دستی می‌باشد. علاوه بر این، خودکارسازی روند تعیین آستانه خلأزایی با در نظر گرفتن شرایط عملیاتی و عمر مفید باقی‌مانده، بدون دخالت انسانی با دقت بسیار زیادتری همراه بوده است.

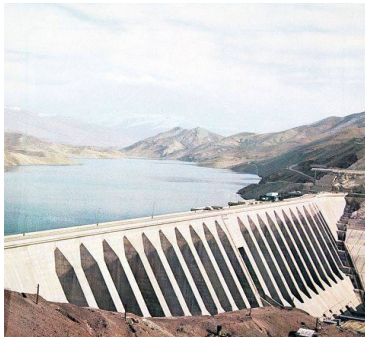
کلیدواژگان: نیروگاه برق آبی، تشخیص خلأزایی، عمر مفید باقی‌مانده، توربین کاپلان، برنامه متلب.

1- مقدمه

بررسی Francois (2012) نشان داد که هیچ مطالعه‌ای در برآورد میزان فرسایش هیدروتوربین‌ها منتشر نشده است. داده‌های مربوط به بازرسی‌های گردانه هیدروتوربین در تلاش برای ارائه یک مدل نرخ فرسایش بر اساس گزارش‌های بازرسی توسط Wolff et al. (2005) جمع‌آوری شد اما داده‌های گردآوری شده آنها کافی نبود. پیشنهاد محققان Cencic et al. و scaler et al. (2014) این بود که ویژگی‌های تشخیص خلأزایی و روش شناسایی آنها ممکن است برای برآورد فرسایش یا پیش‌بینی عمر مفید باقی‌مانده مورد استفاده قرار گیرد، اما

انرژی برق آبی 98/8 درصد از تولید ملی برق تجدیدپذیر و 13/8 درصد از مجموع الکتریسیته تولیدی در ایران را تشکیل می‌دهد. درحالی که هیدروالکتریسیته حدود 19 درصد از کل انرژی الکتریکی تولیدی جهان را پوشش می‌دهد. آسیب خلأزایی به گردانه‌های هیدروتوربین، مشکل گران‌قیمتی است که باعث کاهش تولید برق و کاهش عمر توربین می‌شود. تحقیق Bajic et al. (2003) صرفاً به مقایسه حسگرها، محل قرارگیری حسگرها یا پارامترهای حساسیت خلأزایی (CSP) پرداخته است.

جدول 1 محاسبات مورد استفاده برای مقادیر ویژگی پارامتر حساسیت خلأزایی را نشان می‌دهد.



شکل 1 نمایی از سد سفید رود

جدول 1 محاسبات مورد استفاده برای مقادیر ویژگی پارامتر حساسیت خلأزایی

فرمول	محاسبه
$f_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_1^N X_n^2}{N}}$	میانگین ریشه دوم
$f_{peak} = \max(x)$	اوج
$f_{CF} = \frac{f_{peak}}{f_{rms}}$	ضریب اوج
$f_{kurt} = \frac{\frac{1}{N} \sum_0^N [x_n - \hat{\mu}_x]^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_0^N [x_n - \hat{\mu}_x]^2\right)^2}$	کشیدگی

f_{rms} دامنه میانگین ریشه دوم و f_{peak} دامنه قله بیشینه در مورد یک کمیت متناوب است که نسبت به مقدار صفر آن اندازه‌گیری می‌شود و f_{CF} نسبت مقدار اوج به مقدار مؤثر دو کمیت متناوب است و f_{kurt} میزان تیزی اوج منحنی است که گستردگی و میزان فراوانی میانگین را نشان می‌دهد و درجه اوج در یک نمودار آماری می‌باشد. داده‌ها طی 3 مرحله آماده‌سازی شد. (1) پارامترهای حساسیت خلأزایی (CSP^4) مشخص گردید، داده‌ها از بررسی خلأزایی از جمله انواع حسگرها، محل قرارگیری حسگرها و شرایط عملیاتی، جمع‌آوری شد و مقادیر برای ورود به ماتریس توسعه‌یافته محاسبه شد. (2) پارامترهای حساسیت خلأزایی در ستون‌های یک ماتریس ویژگی سازماندهی شد. (3) ستون‌های ماتریس با استفاده از

تاکنون موفق به پیاده‌سازی آن در یک توربین آبی در نیروگاه برق آبی نشده‌اند. به نظر می‌رسد، هیچ مطالعه‌ای به طور عمومی در زمینه پیش بینی فرسایش هیدروتوربین یا روش پیش بینی عمر مفید باقی‌مانده انجام نشده است. علاوه بر این، هیچ تحقیقی در زمینه انتخاب ویژگی تشخیص خلأزایی انجام نشده است. تا به امروز، هیچ کس سعی در شناسایی ویژگی‌های تشخیص خلأزایی در یک رویکرد تکرارپذیر، مناسب برای هیدروتوربین‌ها نداشته است. علیرغم پیشرفت در طراحی توربین‌های آبی، آسیب ناشی از خلأزایی یکی از دلایل اصلی خرابی توربین است (Dorji and Ghomashchi, 2014). همین امر اهمیت توسعه روش‌های بهتر تشخیص خلأزایی فرسایشی در توربین‌های آبی را نشان می‌دهد. هدف از این تحقیق، تلاش برای دستیابی به توسعه مدل مبتنی بر داده برای تشخیص خلأزایی خودکار و تخمین نرخ فرسایش خلأزایی برای مدت زمان طولانی در یک مطالعه موردی و براساس داده‌های حاصل از توربین آبی سد سفیدرود با در نظر گرفتن عمر مفید باقی‌مانده (RUL^1) است.

2- مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه: نیروگاه برق آبی تاریک سد سفیدرود در 36 درجه و 58 دقیقه عرض جغرافیایی و 49 درجه و 35 دقیقه طول جغرافیایی و با فاصله تقریبی 35 کیلومتر در پایین دست سد مخزنی سفید رود در استان گیلان واقع شده است. سد انحرافی تاریک اولین نیروگاه با توربین کاپلان در کشور محسوب می‌شود و از آنجایی که این نوع توربین برای ارتفاع آب پایین و دبی بالا کاربرد دارد، می‌تواند در اکثر بندها و سدهای کوچک و نواحی کمتر کوهستانی و پر آب همانند نواحی شمالی کشور استفاده شود. شکل 1 نمایی از سد سفیدرود را نشان می‌دهد. مشخصات کلی تجهیزات نیروگاه تاریک شامل دو واحد توربین ژنراتور از نوع کاپلان² است. مطالعه موردی، بررسی خلأزایی واقعی روی توربین 1500 KW^2 کاپلان پیت است که در لبه تیز³ پره‌ها خلأزایی فرسایشی دارد.

¹ Remaining useful life

² Bulb Turbine

³ Leading edge

⁴ Cavitation Sensitivity Parameter

تبدیل z-score نرمال‌سازی شد. ارزش نرمال‌شده جدید هیچ واحدی ندارد و اندازه فاصله انحراف استاندارد از میانگین داده‌ها است. روش پیشنهادی با 61 ویژگی مشتق شده از 6 پارامتر حساسیت خلأزایی منحصر به فرد و 17 شرایط عملیاتی منحصر به فرد نشان داده شد. تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی در ماتریس همبستگی F انجام شد تا P بدست آید (Jolliffe, 2002). F با استفاده از P برای تولید یک نمای جدید از داده‌های اصلی تبدیل به ماتریس Y شد و هر بردار امتیاز مؤلفه اصلی در Y برای مشاهده یک واریانس برای هر مؤلفه اصلی مطابق معادله (1) رسم شد. تبدیل به صورت زیر محاسبه شد:

(1) $P * F = Y$

برای انتخاب ویژگی تشخیص خلأزایی، مؤلفه‌های اصلی که به خلأزایی فرسایشی وابسته نیستند باید حذف شوند. Bajic (2002) یک تکنیک چند بعدی که برای تمام انواع هیدوروتوبین‌ها موثر است، توسعه داد. تحقیقات Rus et al. (2007) و Escaler et al. (2014) نتایج تشخیص خلأزایی خوبی با اولین سیگنال‌ها ی حسگر فیلتر میان گذر نشان دادند. ارزیابی دامنه میانگین ریشه دوم (RMS^1) سیگنال‌های حسگر، روشی است که به طور گسترده برای تشخیص خلأزایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی RMS محاسبه شده از سیگنال‌های حسگر خام، حساس به حوادث خلأزایی است. در تحقیق Cencic et al. (2014) پنج محدوده فرکانس برای پاسخ به خلأزایی ارزیابی شد و در نهایت محدوده فرکانسی مشخص، به عنوان بهترین محدوده حساس به خلأزایی نشان داده شد.

(2) $I_{total} = \sum (X_{MD-cavitation})(t_{blok})$

$X_{MD-cavitation}$ فاصله ماهالانوبیس از هر پارامتر حساسیت خلأزایی شناسایی شده با رده بند به عنوان دسته خلأزایی و t_{blok} طول بلوک زمانی استفاده شده برای ایجاد پارامتر حساسیت خلأزایی می‌باشد.

دقت طبقه بندی خلأزایی به چهار روش محاسبه شد: (1) طبقه بندی خلأزایی با رده‌بند آستانه ساده و انتخاب آستانه دستی (2) رده‌بند آستانه ساده و یک الگوریتم یادگیری بدون نظارت (3) یک الگوریتم یادگیری تحت نظارت (ماشین بردار تکیه‌گاه) و داده‌های آموزشی که به صورت دستی برچسب‌گذاری شده‌اند (4) یک الگوریتم یادگیری تحت نظارت و داده‌های آموزشی که با اعمال یک الگوریتم یادگیری بدون نظارت (K-Means) با بهره‌گیری از برنامه متلب برچسب‌گذاری شده‌اند.

2-2- انتخاب ویژگی برای تشخیص خلأزایی

هدف از این فرایند، انتخاب بهترین ویژگی تشخیص خلأزایی بلند مدت برای یک هیدوروتوربین منحصر به فرد است. ضریب همبستگی بین نمرات مؤلفه اصلی و ویژگی نرمال محاسبه شد. برای مقایسه ضرایب همبستگی می‌توان به تحقیقات Holick (2013) اشاره کرد. در این تحقیق و بر اساس قانون مبتنی بر تجربه، درجه بسیار بالایی از وابستگی به نمرات مؤلفه اصلی، مربوط به خلأزایی فرسایشی انتخاب شد و موارد با مقدار مطلق کمتر از 0/9 حذف گردید. انحراف استاندارد برای هر ویژگی تحت شرایط عملیاتی هیدوروتوربین با حداقل خلأزایی ($S_{CSP-min}$) و حداکثر خلأزایی ($S_{CSP-max}$) محاسبه و پراکندگی ویژگی‌ها ارزیابی شد. معادله (3) جهت حذف ویژگی‌های اضافی و تعیین آستانه به کار گرفته شده است.

$$1 \text{ آستانه} = 2 \times S_{CSP} - \min \quad (3)$$

$$2 \text{ آستانه} = 2 \times S_{CSP} - \max$$

ویژگی‌های باقی‌مانده بر اساس ترکیبی از مقادیر انحراف

تبدیل z-score نرمال‌سازی شد. ارزش نرمال‌شده جدید هیچ واحدی ندارد و اندازه فاصله انحراف استاندارد از میانگین داده‌ها است. روش پیشنهادی با 61 ویژگی مشتق شده از 6 پارامتر حساسیت خلأزایی منحصر به فرد و 17 شرایط عملیاتی منحصر به فرد نشان داده شد. تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی در ماتریس همبستگی F انجام شد تا P بدست آید (Jolliffe, 2002). F با استفاده از P برای تولید یک نمای جدید از داده‌های اصلی تبدیل به ماتریس Y شد و هر بردار امتیاز مؤلفه اصلی در Y برای مشاهده یک واریانس برای هر مؤلفه اصلی مطابق معادله (1) رسم شد. تبدیل به صورت زیر محاسبه شد:

$$(1) P * F = Y$$

برای انتخاب ویژگی تشخیص خلأزایی، مؤلفه‌های اصلی که به خلأزایی فرسایشی وابسته نیستند باید حذف شوند. Bajic (2002) یک تکنیک چند بعدی که برای تمام انواع هیدوروتوبین‌ها موثر است، توسعه داد. تحقیقات Rus et al. (2007) و Escaler et al. (2014) نتایج تشخیص خلأزایی خوبی با اولین سیگنال‌ها ی حسگر فیلتر میان گذر نشان دادند. ارزیابی دامنه میانگین ریشه دوم (RMS^1) سیگنال‌های حسگر، روشی است که به طور گسترده برای تشخیص خلأزایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی RMS محاسبه شده از سیگنال‌های حسگر خام، حساس به حوادث خلأزایی است. در تحقیق Cencic et al. (2014) پنج محدوده فرکانس برای پاسخ به خلأزایی ارزیابی شد و در نهایت محدوده فرکانسی مشخص، به عنوان بهترین محدوده حساس به خلأزایی نشان داده شد.

2-1- شدت خلأزایی و اندازه گیری شدت

شدت خلأزایی را می‌توان از طریق حسگرهای لرزش، انتشار آکوستیک و مدت زمان قرار گرفتن در معرض خلأزایی برای تخمین تخریب خلأزایی و برآورد عمر مفید باقی‌مانده اندازه‌گیری نمود. مقیاس اندازه گیری یک پارامتر حساسیت خلأزایی وابسته به نوع حسگر است و مقدار اندازه‌گیری شده تحت تأثیر مکان حسگر می‌باشد

¹ Root mean square

خلأزایی با محاسبه مقادیر پارامتر حساسیت خلأزایی ذکر شده در جدول 2 برای سه حسگر انتشار آکوستیک، سه شتاب سنج، چهار پروب مجاورت و یک میدل فشار در بررسی خلأزایی با 61 ویژگی کلی ایجاد شد. 32 مقدار پارامتر حساسیت خلأزایی برای هر یک از 17 حالت عملیاتی و در نتیجه 544 مقدار پارامتر حساسیت خلأزایی برای هر ویژگی بدست آمد. نامگذاری ویژگی به صورت ترکیبی از اختصار نوع حسگر و شماره پارامتر حساسیت خلأزایی می باشد.

جدول 2 جزئیات پارامتر حساسیت خلأزایی برای هر نوع

نوع حسگر	پارامترهای حساسیت خلأزایی
شتاب‌سنج‌ها	1) دامنه میانگین ریشه دوم 1000 تا 20000 هرتز
	2) دامنه میانگین ریشه دوم 20000 تا 30000 هرتز
	3) دامنه میانگین ریشه دوم 30000 تا 100000 هرتز
	4) دامنه اوج 1000 تا 20000 هرتز
	5) ضریب اوج 1000 تا 20000 هرتز
	6) کشیدگی 1000 تا 20000 هرتز
حسگرهای هرتز	1) دامنه میانگین ریشه دوم 1000 تا 400000 هرتز
	2) دامنه میانگین ریشه دوم 50000 تا 400000 هرتز
	3) دامنه میانگین ریشه دوم 1000 تا 50000 هرتز
	4) دامنه اوج 1000 تا 400000 هرتز
	5) ضریب اوج 1000 تا 400000 هرتز
	6) کشیدگی 1000 تا 400000 هرتز
پروب‌های مجاورت	1) دامنه میانگین ریشه دوم 40 تا 1000 هرتز
	2) دامنه میانگین ریشه دوم 1 تا 40 هرتز
	3) دامنه اوج 40 تا 1000 هرتز
	4) ضریب اوج 40 تا 1000 هرتز
	5) کشیدگی 40 تا 1000 هرتز
تراگذار فشار ¹	1) دامنه میانگین ریشه دوم 40 تا 1000 هرتز
	2) دامنه میانگین ریشه دوم 1 تا 40 هرتز
	3) دامنه اوج 40 تا 1000 هرتز
	4) ضریب اوج 40 تا 1000 هرتز
	5) کشیدگی 40 تا 1000 هرتز

نرمال‌سازی ماتریس ویژگی و تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شد و منجر به ماتریس

استاندارد و طبق معادله (4) به منظور تعیین بهترین ویژگی‌ها برای نظارت بلند مدت رتبه‌بندی شدند.

(4) ترکیب $S_{CSP} = S_{CSP} - \min + S_{CSP} - \max$

بهترین ویژگی‌های خلأزایی، دارای پایین‌ترین مقادیر می‌باشد. در نهایت ویژگی‌ها براساس ارزیابی نهایی ذهنی و بر اساس ملاحظات عملی برای تشخیص خلأزایی طولانی مدت انتخاب شد. داده‌های رمپ پایین جمع‌آوری شد و به 1 بلوک ثانیه تقسیم شد و جریان مستقیم (فرکانس صفر) در هر بلوک حذف شد و تبدیل گسسته فوری به هر بلوک و واریانس نمونه هر مقدار فرکانس محاسبه شد. خروجی مدنظر یک پلات فرکانس در مقایسه با دامنه، تحت عنوان طیف فرکانس است.

2-3- انتخاب محدوده فرکانس پارامتر حساسیت خلأزایی

پارامتر حساسیت خلأزایی انتخاب شده از ریشه میانگین مربعی (RMS) در یک یا چند باند فرکانس براساس طیف فرکانس واریانس ایجاد شده، قابل محاسبه است. باند فرکانس مورد استفاده، برای محاسبات RMS براساس طیف فرکانس واریانس، ایجاد شده است.

2-4- ایجاد مجموعه‌های آموزشی

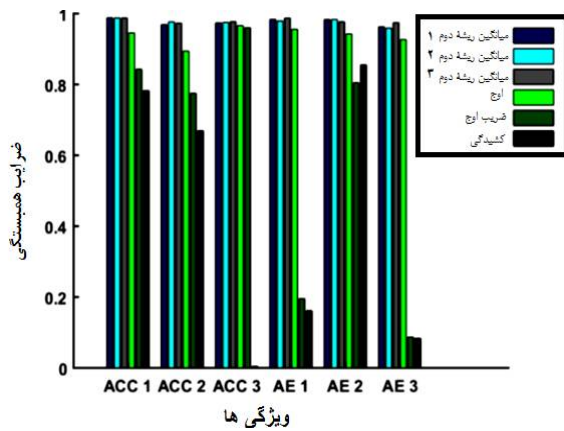
در روش پیشنهادی این تحقیق، شناسایی خلأزایی فرسایشی به عنوان یک مسئله طبقه‌بندی باینری با دو دسته: خلأزایی و بدون خلأزایی در نظر گرفته شد. داده‌های پایه $X_{baseline}$ مشخص و برای طبقه‌بندی داده‌ها به صورت خودکار، به جای انتخاب بصری، از یک الگوریتم یادگیری بدون نظارت استفاده شد. برای آموزش یک جدا کننده (رده‌بند)، با استفاده از الگوریتم طبقه‌بندی، خصوصیات جدید خلأزایی خودکارسازی شد تا تجربه خلأزایی فرسایشی هیدروتوربین پیش‌بینی شود.

3- نتایج و بحث

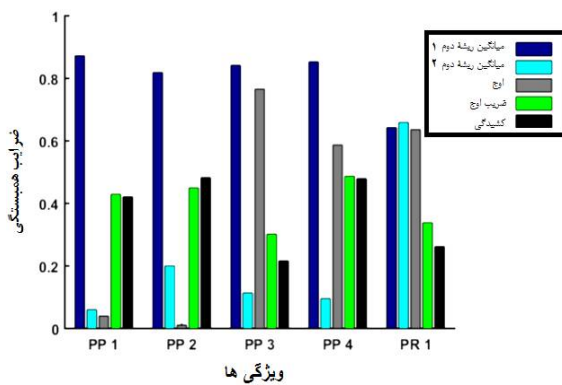
در مرحله اول فرایند انتخاب ویژگی، 6 مقدار پارامتر حساسیت خلأزایی برای هر حسگر که در آن داده‌های فرکانس بالا و 5 مقدار که در آن داده‌های فرکانس متوسط جمع‌آوری شده بود، محاسبه شد. ماتریس ویژگی

¹ Pressure Transducer

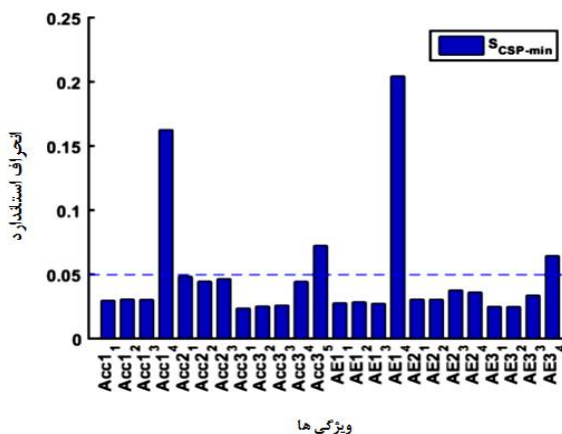
نشان داده شد.



شکل 3 ضریب همبستگی اولیه نمرات مؤلفه اصلی و ویژگی‌های شتاب‌سنج و حسگر انتشار آکوستیک



شکل 4 ضریب همبستگی اولیه نمرات مؤلفه اصلی و ویژگی‌های پروب مجاورت یا مبدل فشار

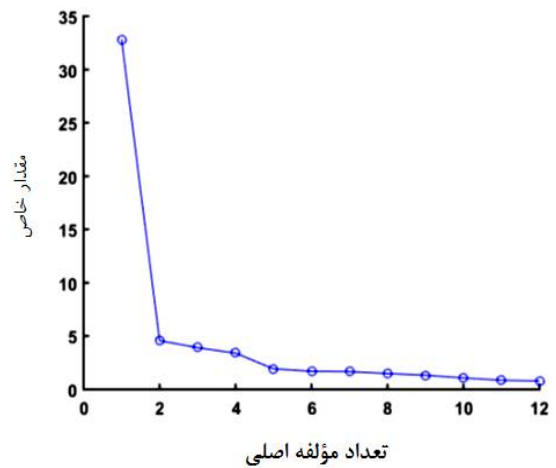


شکل 5 مقایسه انحراف استاندارد در دامنه ویژگی حداقل مقدار پارامتر حساسیت خلأزایی

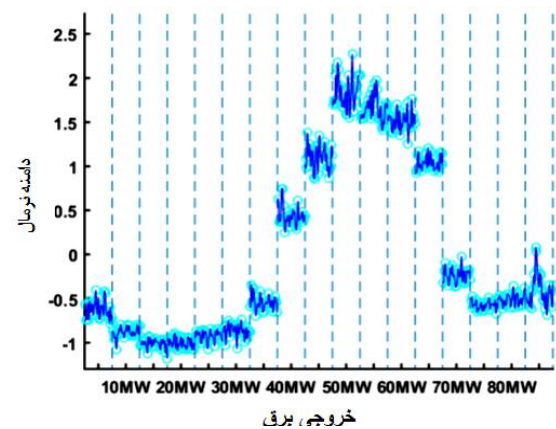
نمرات مؤلفه اصلی Y شد.

نمودار صخره ای شکل 1 نشان دهنده کاهش اندکی در واریانس پس از مولفه اصلی چهارم است.

بر اساس نمودار فوق، چهار امتیاز اول مؤلفه اصلی، برای تعیین واریانس حداکثر مورد بررسی قرار گرفت. در شکل 2 نمودار نمره اولین مؤلفه اصلی نشان داده شد که بیشترین انطباق را با شرایط عملیاتی و حالت واریانس مربوط به شرایط خلأزایی فرسایشی دارد. ضریب همبستگی در شکل‌های 3 و 4 و انحراف معیار حداقل و حداکثر مقادیر پارامتر حساسیت خلأزایی برای مقایسه پراکندگی در هر یک از ویژگی‌های باقی‌مانده در شکل 5 و 6 نشان داده شد.



شکل 1 نمودار صخره‌ای حاصل از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی روی خلأزایی

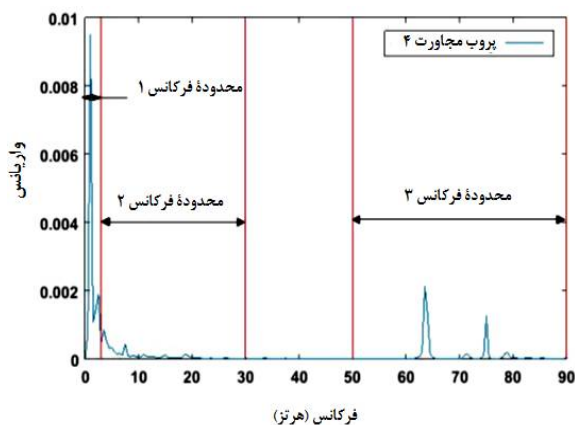


شکل 2 نمودار نمره اولین مؤلفه اصلی نشان دهنده یک حالت واریانس مربوط به شرایط خلأزایی فرسایشی ویژگی‌های باقیمانده به ترتیب مقادیر ترکیبی $S_{CSP-max}$ و $S_{CSP-min}$ مرتب شد و در شکل 7

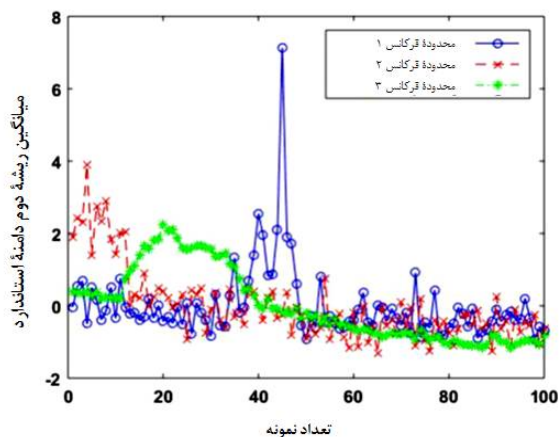
3 هرتز که از فرکانس‌های سرعت پایین در حال اجرا تشکیل شده است و محدوده فرکانس 2، فاصله 3 الی 30 هرتز که شامل فرکانس چرخش شفت و اولین‌ها رمونیک آن است و محدوده فرکانس 3، فاصله 50 الی 90 هرتز که شامل فرکانس تیغه گذر و پره گذر هیدروتوربین است.

3-1- ایجاد مجموعه‌های آموزشی

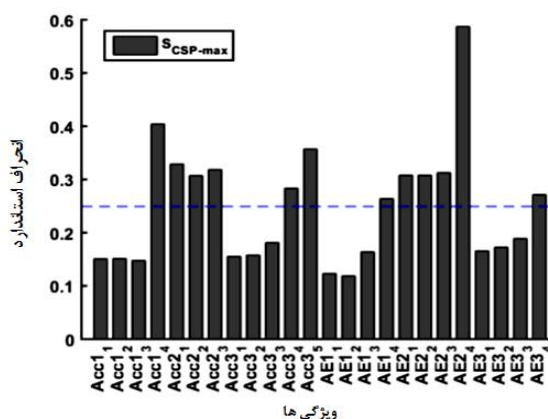
دامنه‌های پارامتر حساسیت خلأزایی از نمونه 55 الی 100 نسبتاً کم و ثابت هستند، بنابراین این محدوده نمونه برای $X_{baseline}$ انتخاب شده است. در شکل 10، آستانه خلأزایی دستی تک‌متغیره برای برچسب‌گذاری اطلاعات آموزشی انتخاب شد.



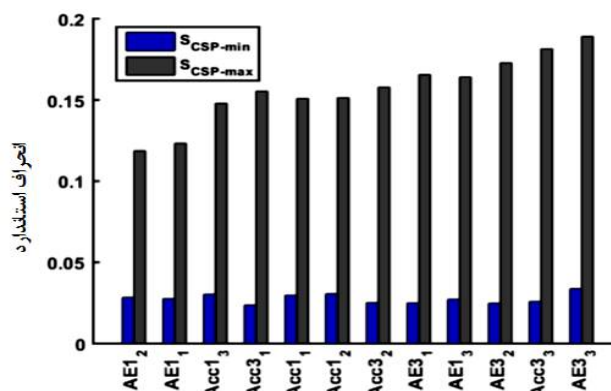
شکل 8 طیف واریانس محدوده فرکانس مورد استفاده برای محاسبه مقادیر پارامتر حساسیت خلأزایی



شکل 9 مقادیر پارامتر حساسیت خلأزایی در مقایسه با تعداد نمونه رمپ پایین



شکل 6 مقایسه انحراف استاندارد در دامنه ویژگی‌های حداکثر مقدار پارامتر حساسیت خلأزایی



شکل 7 رتبه‌بندی ویژگی‌های باقی‌مانده با انحراف استاندارد در دامنه حداقل و حداکثر مقادیر پارامتر حساسیت خلأزایی

از 12 ویژگی باقی‌مانده، تعداد 6 ویژگی مربوط به حسگرهای شفت می‌باشد که برای نصب و نگهداری، نیازمند هزینه و پیچیدگی بیشتری هستند و 6 ویژگی دیگر، حاصل حسگرهای نصب‌شده روی یاتاقان‌ها دی پایینی هیدروتوربین‌ها هستند که با توجه به هزینه کم، جهت نصب و نگهداری، هر یک از 6 ویژگی باقی‌مانده برای نظارت خلأزایی فرسایشی مناسب می‌باشد. بهترین ویژگی‌ها برای نظارت بلند مدت خلأزایی فرسایشی AE12 و AE11 بدست آمد. با بررسی طیف واریانس برای تعیین فرکانس‌های ارتعاشی در طول رمپ پایین هیدروتوربین پروب مجاورت 4، انتخاب و در شکل 8 نمایش داده شد. بر اساس طیف واریانس، سه دامنه فرکانس در شکل 9 به عنوان ویژگی‌هایی برای محاسبه پارامتر حساسیت خلأزایی تعریف شده‌اند: محدوده فرکانس 1، فاصله 1 الی

10 مقدار دقت به دست آمد. یک ماشین بردار تکیه گاه برای هر پروب مجاورت منحصر بفرد و پارامتر حساسیت خلأزایی تمرین و ترکیبات با بالاترین دقت، مقایسه شد. 4 پروب مجاورت و 3 پارامتر حساسیت خلأزایی برای هر یک از پروبها ی مجاورت وجود دارد، به این معنی که 12 مجموعه آموزش فردی و 4095 ترکیب منحصر به فرد از این 12 مجموعه آموزشی وجود دارد. برای آزمون این فرضیه، مدل ماشین بردار تکیه گاه (SVM)¹ با هسته های چند جمله ای با مرتبه های 1 تا 7 آموزش داده شد.

3-3- نتایج آزمون طبقه بندی

با در نظر گرفتن 17 سرعت منحصر به فرد و 24 ثانیه داده برای هر نرخ جریان، 408 بلوک از داده های ارتعاشی برای ایجاد داده های آزمون مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم های رده بند ساده و ماشین بردار تکیه گاه به داده های تست اعمال شده و نتایج پیش بینی های دسته با برچسب های دسته مناسب برای تعیین دقت، مقایسه شدند. برای محاسبه دقت از معادله (5) استفاده شد.

$$(5) \quad \text{دقت} = \frac{\text{برچسب ی دسته ها درست} \# \text{کل}}{\text{برچسب ی دسته ها} \# \text{کل}} \times 100$$

شدت خلأزایی انباشته در کل مجموعه داده ها در جدول 4 نشان داده شده است. برای نتایج ماشین بردار تکیه گاه، جفت های پروب / پارامتر حساسیت خلأزایی با اولین عدد پروب مجاورت خلاصه شدند، به عنوان مثال، یک مجموعه آموزشی ایجاد شده با داده های جمع آوری شده از پروب مجاورت 1 که از محدوده فرکانس 1 برای محاسبه پارامتر حساسیت خلأزایی استفاده شده است، به اختصار به صورت "PPI - CSP1" نشان داده شد.

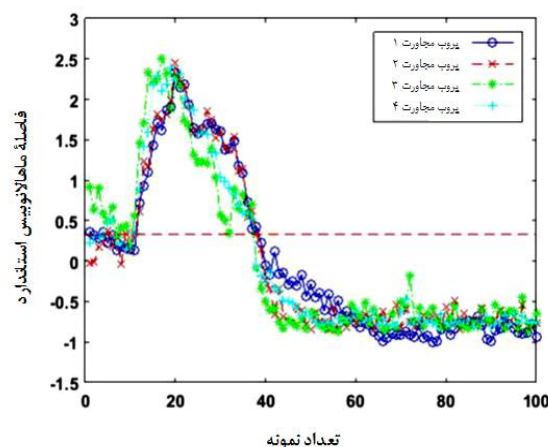
نتایج دقت رده بند مرتبه دوم تا هفتم بر اساس آستانه های چند متغیره در جدول 5 نشان داده شده است.

صورت گرافیکی برچسب های طبقه بندی درست، برای داده های آزمون، در شکل 11 به روش دستی و در شکل 12 به روش خوشه بندی k-means و در شکل های 13 و 14 توسط طبقه بندی ماشین بردار تکیه گاه نشان داده شده است.

طبقه بندی برچسب های ایجاد شده با اعمال آستانه به داده های پروب مجاورت 2 در جدول 3 نشان داده شد و از نتایج آن برای برچسب گذاری مجموعه های آموزشی استفاده شد.

جدول 3 آستانه خلأزایی برای برچسب گذاری آموزشی

آستانه های تک متغیره	
0/018	دستی 1
-0/011	دستی 2
-0/386	دستی 3
-0/392	دستی 4
0/338	K-means 1
0/162	K-means 2
0/494	K-means 3
0/622	K-means 4
آستانه های چند متغیره	
0/474	دستی
0/380	K-means



شکل 10 آستانه خلأزایی دستی تک متغیره

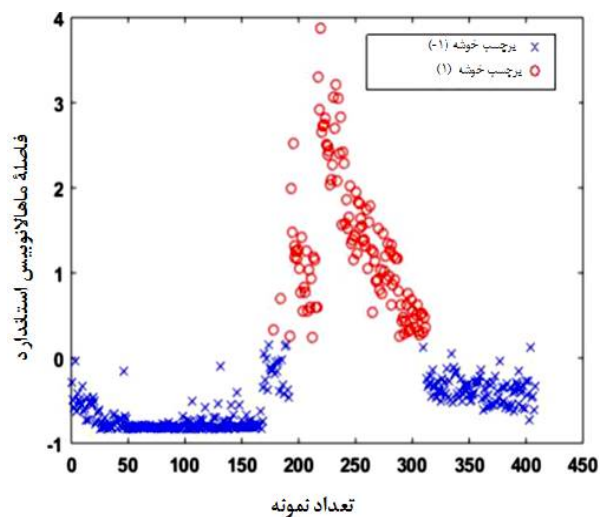
3-2- آموزش رده بندها

تست دقت برای رده بند ساده، شامل یک آزمون برای هر پروب مجاورت، و یکی برای آستانه چند متغیره انجام شد و با هر دو آستانه انتخابی به صورت دستی و K-Means.

¹ Support Vector Machine

جدول 5 نتایج آزمون‌های رده‌بند برای آستانه‌های چندمتغیره

رده‌بند	مجموعه آموزشی و تست	نتایج	Total
		دقت %	
ماشین بردار	مرتبه دوم، CSP2، CSP3	94/1	2711
تکیه‌گاه	مرتبه سوم، CSP1، CSP2، CSP3	94/4	2720
غیرخطی با آستانه	مرتبه چهارم، CSP1، CSP2، CSP3	96/8	2829
چندمتغیره	مرتبه پنجم، CSP1، CSP2، CSP3	97/8	2866
به‌روش دستی انتخاب شده	مرتبه ششم، CSP1، CSP2، CSP3	97/3	2833
ماشین بردار	مرتبه دوم، CSP3	93/6	2777
تکیه‌گاه	مرتبه سوم، CSP3	94/0	2696
غیرخطی با آستانه	مرتبه چهارم، CSP1، CSP2، CSP3	95/1	2916
چندمتغیره	مرتبه پنجم، CSP1، CSP2، CSP3	97/5	2891
به‌روش K-Means	مرتبه ششم، CSP1، CSP2، CSP3	97/3	2891
ساده، با آستانه چند متغیره انتخاب شده به روش دستی، با آستانه چندمتغیره انتخاب شده به روش K-Means (نتایج یکسان)			
	CSP3	94/1	2711



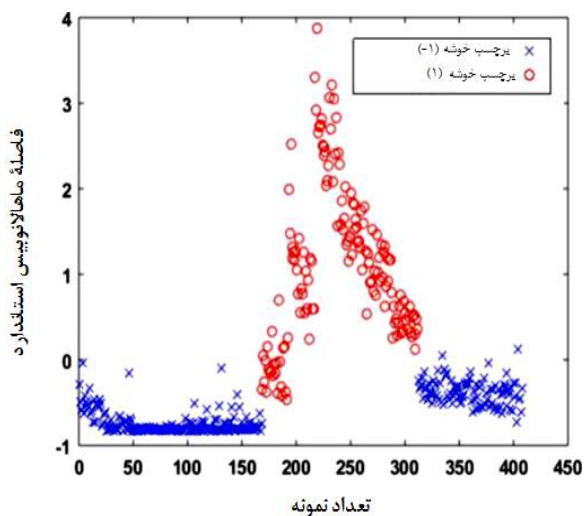
شکل 12 داده خلأزایی با برچسب رده بند ساده با آستانه انتخاب شده از خوشه بندی k-means

4- نتیجه گیری

فرایند انتخاب ویژگی‌های توصیف شده در این تحقیق بر روی داده‌های مطالعات خلأزایی در یک هیدروتوربین کاپلان انجام شد.

جدول 4 نتایج تست رده‌بند برای آستانه تک متغیره

رده بند	مجموعه آموزشی و تست	نتایج	I_{total}
		دقت %	
ساده، با آستانه انتخاب شده به روش دستی	پروب مجاورت 1	95/3	2457
	پروب مجاورت 2	95/3	2473
	پروب مجاورت 3	93/6	2696
	پروب مجاورت 4	92/2	2395
ساده، با آستانه انتخاب شده به روش K-Means	پروب مجاورت 1	91/2	2433
	پروب مجاورت 2	94/6	2473
	پروب مجاورت 3	89/0	2661
	پروب مجاورت 4	85/1	2395
ماشین بردار تکیه‌گاه، با آستانه انتخاب شده به روش دستی	PP2-CSP1, PP2-CSP3, PP3-CSP3, PP2-CSP2	95/6	2446
ماشین بردار تکیه‌گاه، با آستانه انتخاب شده به روش دستی	PP2-CSP1, PP2-CSP3, PP3-CSP3, PP2-CSP2, PP3-CSP2	95/3	2433
ماشین بردار تکیه‌گاه، با آستانه انتخاب شده به روش K-Means	PP1-CSP3, PP2-CSP3, PP3-CSP3, PP2-PP1-CSP2, CSP2	95/1	2520
ماشین بردار تکیه‌گاه، با آستانه انتخاب شده به روش K-Means	PP3-CSP1, PP4-CSP1, PP1-CSP3, PP4-CSP3, PP3-CSP2	99/0	2638
ماشین بردار تکیه‌گاه، با آستانه انتخاب شده به روش K-Means	PP3-CSP1, PP4-CSP1, PP1-CSP3, PP2-CSP3, PP4-CSP3, PP4-CSP2	98/7	2633
ماشین بردار تکیه‌گاه، با آستانه انتخاب شده به روش K-Means	PP3-CSP1, PP4-CSP1, PP1-CSP3, PP2-CSP3, PP4-CSP3, PP1-CSP2, PP4-CSP2	98/7	2640
ماشین بردار تکیه‌گاه، با آستانه انتخاب شده به روش K-Means	PP3-CSP1, PP4-CSP1, PP1-CSP3	98/5	2625



شکل 11 داده خلأزایی با برچسب صحیح با روش دستی

CSP3 در چندین نتیجه برتر نشان داده شد و دقت این ترکیب در پیش بینی خلأزایی بیش از 98 درصد است. از منابع آشکارتر اضافه کردن داده‌ها، انتخاب یک مرتبه چندجمله‌ای برای آستانه‌های غیرخطی است. دقیق‌ترین نتایج آستانه غیرخطی، حاصل از به‌کارگیری یک چندجمله‌ای مرتبه پنجم است. در فرایند شناسایی مبتنی بر آستانه‌های انتخاب شده دستی، دقت 95 درصد و در فرایند کاملاً خودکار که با استفاده از خوشه‌بندی K-Means و ماشین بردار تکیه‌گاه برای شناسایی خلأزایی استفاده شد، دقت بالای 98 درصد به‌دست آمد که با در نظرگرفتن زمان لازم برای تجزیه و تحلیل، نشان دهنده مفید بودن چارچوب یادگیری ماشینی در مقایسه با روش دستی است. این روش برای شناسایی پارامتر حساسیت خلأزایی، خودکارسازی روند آموزش و طبقه‌بندی درست و همچنین برای تعیین آستانه‌ای که به راحتی با تغییر شرایط هیدروتوربین سازگار باشد، با حداقل اختلال در تولید برق و بدون دخالت انسانی قابل استفاده است.

5- تقدیر و تشکر

مؤلفان این مقاله از دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان برای ایجاد زمینه انجام تحقیق، کمال تشکر را می‌نمایند.

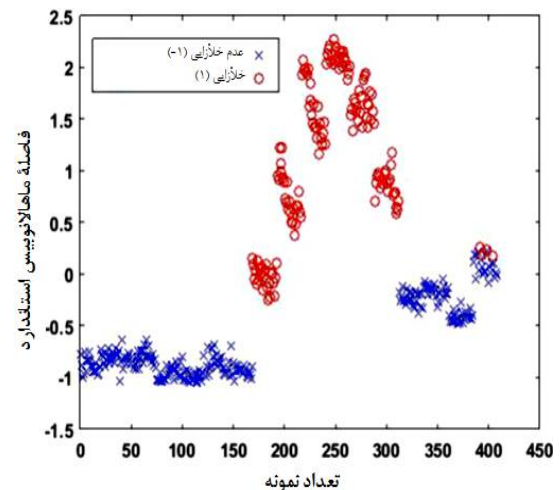
6- منابع

Bajc, B. (2002). "Multidimensional diagnostics of turbine cavitation", *Journal of Fluids Engineering*, 124(4), pp. 943-950.

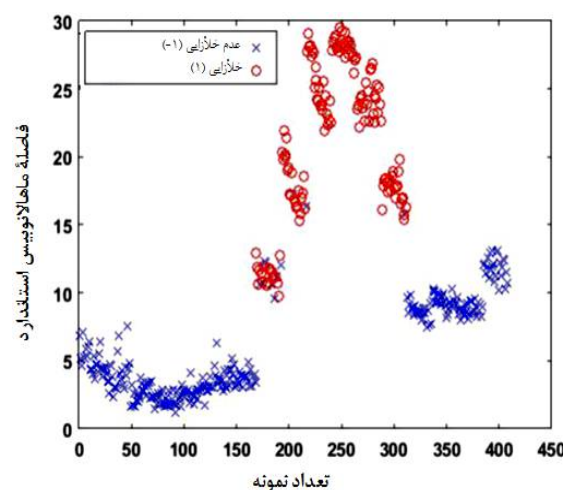
Bajic, B., Korto, C. (2003). "Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation Méthodes pour le diagnostic vibro-acoustique de la cavitation de turbine", *Journal of Hydraulic Research*, 3(41), pp. 87-96.

Cencic, T., Hocevar, M., Sirok, B. (2014). "Study of erosive cavitation detection in pump mode of pump-storage hydropower plant prototype", *ASME, Journal of Fluids Engineering*, 136(5), pp. 1-11.

Dorji, U., Ghomashchi, R. (2014). Hydro turbine failure mechanism: *An overview, Engineering Failure Analysis*, (44), pp. 136-147.



شکل 13 داده خلأزایی با برچسب یک مدل ماشین بردار تکیه‌گاه انتخاب شده دستی، آستانه تک متغیره و مجموعه آموزشی PP4-CSP3، PP1-CSP3، PP4-CSP1، PP3-CSP1، PP3-CSP2



شکل 14 داده خلأزایی با برچسب ماشین بردار تکیه‌گاه (مرتبه پنجم) با آستانه انتخاب شده چند متغیره از خوشه‌بندی K-Means

این تحقیق ابزار لازم برای جمع‌آوری خودکار داده‌های شدت خلأزایی را فراهم می‌کند و گام مهمی در ایجاد یک مدل نرخ فرسایش در تولید هیدروتوربین‌ها است. 4095 ترکیب از 12 حسگر و پارامترهای حساسیت خلأزایی مختلف، آزمایش شد. 408 بلوک از داده‌های ارتعاشی برای ایجاد داده‌های آزمون مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب PP4-، PP1-CSP3، PP4-CSP1، PP3-CSP1

Jolliffe, T. (2002). *Principal Component Analysis, Second Edition*, Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science, University of Aberdeen, UK

Rus, T., Dular, M., Marko, H. (2007). "An investigation of relationship between acoustic emission, vibration, noise and cavitation structures on Kaplan turbine", *Journal of Fluids Engineering*, 129(9), pp. 1112-1122.

Wolff, P. (2013). "Evaluation of results from acoustic emission-based cavitation monitor", Grand Coulee Project, Technical report, Hydro Performance Processes, Incpp. 89-99.

Dular, M. Stofefel, B., Sirok, B. (2006). "Development of cavitation erosion model", *Wear*, 261(5-6), pp. 642-655.

Escaler, X., Viktor, E. Franke, H. (2014). "Detection of draft tube surge and erosive blade cavitation in a full-scale Francis turbine", *Journal of Fluids Engineering*, 137(1), pp. 103-115.

Francois, L. (2012). "Vibratory detection system of cavitation erosion: Historic and algorithm validation", *Proceedings of the 8th international symposium on cavitation*, pp. 44-65, Singapore.

Holick, M. (2013). *Introduction to probability and statistics for engineers*, University of California, Berkeley.

Examination of the sensitivity parameters to detect automatic cavitation in Hydro-turbines of the SefidRood dam considering remaining useful life

Sara Kohansal¹ and Alireza Mardookhpour^{2*}

1-MSc., Hydraulic Structure, Islamic Azad University, Lahijan branch, Lahijan, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineer, Islamic Azad University, Lahijan Branch, Lahijan, Iran

* alireza.mardookhpour@yahoo.com

Abstract

In this research, the evaluation of cavitation threshold detection and the automation of the detection process with regard to the Remaining Useful Life (RUL) of the Sefidrood power plant turbine, has been studied. The input of generated model by MATLAB program includes data driven from Kaplan hydro turbine located on Tarik hydro power plant. The proposed model is based on 61 features resulting from 6 cavitation sensitivity parameters and 17 operational conditions. For training in MATLAB program, 12 individual data sets and 4095 unique combinations were created and 408 data were selected for examination. The training data combined with sensor rating and cavitation sensitivity feature were employed to predict the cavitation and the best training data set with 98% accuracy. The results showed that the use of a fully automated process for sensitivity determination and cavitation classification was more suitable than the use of a process based on manually selected thresholds. Furthermore, considering the operational conditions and RUL, the automation of determination of cavitation threshold without human intervention was much more accurate.

Keywords: Hydro power plant, Cavitation detection, Remaining useful life (RUL), Kaplan turbine, MATLAB program.