



# ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات  
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



## بررسی تاثیرات هوادهی در جریان خروجی توربین بر کنترل پدیده طناب-گردابی در نیروگاه سد مسجدسلیمان با کمک داده‌های ارتعاشی و صوتی

قاسم خواجه<sup>۱</sup>، رضا پول‌تنگری<sup>۲\*</sup>، افشین قلی‌پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> ایران، لیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لیگودرز، دانشکده مهندسی مکانیک، ۶۸۶۱۸۸۵۹۱۴، دانشجوی دکتری

<sup>۲</sup> ایران، دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دانشکده فنی و مهندسی، ۶۴۶۱۶۴۶۴۱۱، استادیار

<sup>۳</sup> ایران، مسجد سلیمان، شرکت مدیریت تولید و بهره برداری سد و نیروگاه مسجدسلیمان، ۶۴۹۸۱۹۸۵۱۱، کارشناسی ارشد

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [reza.poultangari@gmail.com](mailto:reza.poultangari@gmail.com)

### چکیده

در این تحقیق به بررسی تاثیرات هوادهی به زیر رانر توربین فرانسسیس واحد سوم نیروگاه برق-آبی سد مسجدسلیمان به منظور مهار پدیده تشدیدزا و مخرب طناب گردابی با کمک داده‌های حاصل از حسگرهای ارتعاشی و صدا، پرداخته شده است. در اجرای سامانه هوادهی از یک سامانه هوادهی آزاد با دو مسیر ورودی هوا به یک لوله قائم با سر و ته باز استفاده شده است. لوله قائم دارای سوراخهایی با قطر مشخص بوده و دقیقاً در زیر رانر توربین قرار می‌گیرد. برای سنجش دامنه ارتعاشات توربین تحت تاثیر سامانه هوادهی، نصب شده در محل یاتاقان های محیطی آن از حسگرهای ارتعاشی مدل بنتلی-نوادا با حساسیت ۲ میلی ولت استفاده شد. همچنین به منظور سنجش تاثیر سامانه هوادهی بر شدت صدا استخراج شده در محل توربین نیروگاه، از حسگرهای شدت صدا مدل کیمو DS۳۰۰ با قابلیت سنجش شدت صدا تا ۱۴۰ دسی بل که در محل درب بازدید توربین فرانسسیس نصب شده بودند، استفاده شد این نتایج در توانهای ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات، به صورت پلکانی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از استفاده از سامانه هوادهی در پدیده نامطلوب طناب گردابی جریان خروجی توربین فرانسسیس سراسر نشانه بهبود و کاهش این پدیده نامطلوب بود. اما در مقایسه نتایج بدست آمده از سنجش دامنه ارتعاشات و همچنین شدت صدا رصد شده از پدیده طناب گردابی به وضوح می‌توان به این نتیجه رسید که روش سنجش دامنه ارتعاشات توربین حساسیت بالاتری نسبت به تغییرات دارد و به عنوان یک روش ارجح برای تشخیص فرآیند طناب گردابی توصیه می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** طناب گردابی؛ نیروگاه برق-آبی؛ حسگر ارتعاشی؛ حسگر صوتی؛ هوادهی؛ سد مسجدسلیمان.

## ۱- مقدمه

با توجه به شرایط آب و هوایی و اقلیمی کشور، در سالهای اخیر نوسانات بزرگی در میزان بارشها و شرایط رطوبتی و دمایی در سطح کشور و بخصوص در استان خوزستان پدیدار شد. از طرفی نیاز روز افزون به تولید محصولات کشاورزی و کشت‌های آبی در کشور و استان، سبب گردید تا نوسانات بسیار زیادی در تراز سدهای استان در طول فصول آبی مختلف در سنوات گذشته پدید آید و این مهم منجر شد تا امکان توان‌گیری از این ظرفیت الهی با چالشهای بزرگی روبرو گردد. این در شرایطی رخ داد که نیاز به مصرف برق و انرژی، بصورت روز افزون در حال افزایش بوده و هر کمکی به افزایش تولید انرژی برق-آبی در کشور می‌تواند، ضمن رفع نیاز به انرژی خانوار، حیات بسیاری از صنایع و کشاورزی کشور را بخصوص در فصول گرم و پرمصرف انرژی، تضمین نماید. از این رو، رفع موانع موجود در تولید برق با وجود نوسانات تراز آب دریاچه سدهای کشور از اهمیت دوچندان برخوردار است. توربین آبی فرانسسیس قلب تولید انرژی برق-آبی است که می‌تواند انرژی بالقوه رودخانه را به انرژی مکانیکی دوار تبدیل کرده و در نتیجه ژنراتور را برای تولید برق به حرکت درآورد. این وسیله، نوعی توربین با قابلیت تولید توان در دور ثابت است، بدین صورت که با تغییرات دبی جریان با سرعت چرخش ثابت، انرژی الکتریکی تولید می‌کند. یکی از چالشهای مهم در تولید انرژی به این سبک، مساله محدودیت و وابستگی تولید انرژی به دبی آب ورودی به نیروگاه می‌باشد. به این صورت که با کاهش تراز دریاچه و یا به فراخور نیاز به توان کمتر تولید برق، اصطلاحاً شرایط "میان باری" و "کم باری"، مساله افت فشار بصورت موضعی یا کلی در جریان آب درون تجهیزات ورودی به نیروگاه رخ داده و پدیده کاویتاسیون<sup>۱</sup> [۱ و ۲] و طناب‌گردایی<sup>۲</sup> جریان، منجر به ارتعاشات ناخواسته و بروز پدیده تشدید و در نتیجه آسیب-های جدی به اجزاء ثابت و متحرک نیروگاه می‌شود [۳ تا ۵]. برای مبارزه با این پدیده‌ها، تحقیقات گسترده‌ای از گذشته تا به حال در جریان است. در این راستا تحقیقات عددی و تجربی بسیاری در موضوع مدل سازی پدیده طناب‌گردایی انجام شده است [۶ تا ۱۳]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، در مجموع دو روش عمده برای مبارزه با این پدیده در تحقیقات آمده است. روش اول روشهای مبتنی بر سیالات بوده [۶ تا ۱۳] و دیگری روشهای مبتنی بر ایجاد تغییرات هندسی است [۱۴ تا ۱۶]. یکی از موثرترین و در عین حال اقتصادی‌ترین روش‌های ممکن در این رابطه، روش هوادهی<sup>۳</sup> به ناحیه زیر مخروط خروجی توربین و ابتدای لوله خروجی آب از توربین با کمک لوله کشی است [۱۷ و ۱۸].

نیروگاه سد مسجد سلیمان در هر واحد نیروگاهی، دارای ظرفیت نامی تولید برق ۲۵۰ مگاوات می‌باشد. این در شرایطی است که به فراخور نیاز فرکانس، ولتاژ و بار شبکه توسط واحد توزیع<sup>۴</sup> برق کشور و یا محدودیت های تراز آب پشت سد در شرایط میانباری یا کم باری، این توان تولیدی تا کمتر از یک ششم توان نامی، یعنی حدود ۴۰ مگاوات، می‌تواند کاهش داشته باشد. لذا با کاهش فشار جریان ورودی به نیروگاه عملاً زمینه پدیده های مخربی چون وقوع طناب‌گردایی در قسمت مخروطی لوله خروجی نیروگاه فراهم شده و بخاطر آسیب‌های متعدد ناشی از ارتعاشات ناخواسته و تشدید، دست اندرکاران بهره برداری را با چالش در ادامه فرآیند تولید برق در این شرایط مواجه می‌کند. برای رفع این مشکل، پس از انجام مطالعات و تحقیقات لازم، روش هوادهی بصورت مستقیم به قسمت مخروط لوله خروجی در دستور کار قرار گرفت. برای این منظور، واحد ۳ نیروگاه به صورت پایلوت برای اجرای این طرح در نظر گرفته شد. بر مبنای مهندسی معکوس صورت گرفته از نتایج تحقیقات بین المللی و همچنین تجربیات مشابه مورد استفاده در سایر نیروگاههای برف-آبی کشور، سامانه هوادهی با هندسه مشخص و با در نظر گرفتن تکیه‌گاههای لازم برای مقاومت سامانه در شرایط جریان مغشوش و چرخشی آب در خروجی توربین طراحی و اجرا شد. نتایج بدست آمده از اجرای این طرح نشان از موفقیت چشم‌گیر آن داشته به گونه‌ای که بر مبنای سنجش پارامترهایی مانند: دامنه ارتعاشات تکیه‌گاه توربین و شدت صدا در جریان خروجی توربین، اثر مخرب طناب‌گردایی در توانهای بسیار پایین‌تر از ظرفیت نامی نیروگاه، کاملاً برطرف گردید و بهره بردار پس از اجرای این طرح موفق گردید حتی تا کمتر ۵۰ درصد ظرفیت نامی نیروگاه بدون بروز مشکلات معمول تولید توان نماید. لازم به ذکر است که برای

<sup>1</sup> Cavitation

<sup>2</sup> Vortex Rope

<sup>3</sup> Air Admission

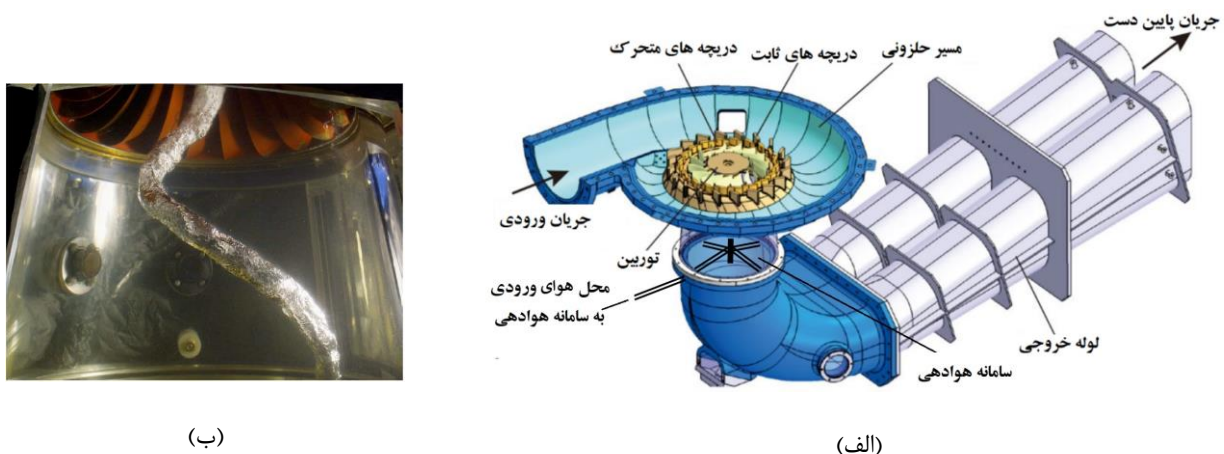
<sup>4</sup> Discharge Unit

سنجش دامنه ارتعاشات توربین، از حسگرهای ارتعاشی مدل بنتلی-نوادا با حساسیت ۲ میلی ولت استفاده شد که در محل یاتاقان‌های محیطی آن نصب شده بودند. همچنین به منظور سنجش شدت صدا، از حسگرهای شدت صدا مدل کیمو DS300 با قابلیت سنجش شدت صدا تا ۱۴۰ دسی بل که در محل درب بازدید توربین فرانسیس نصب شده بودند، استفاده شد.

## ۲- تشریح مکانیزم طناب گردابی در شرایط میانباری یا کم باری نیروگاه

به فراخور نیاز بهره برداری از انرژی برق-آبی و یا محدودیت های تراز سد دریاچه این نیروگاهها، در برخی مواقع نیاز به توان-گیری از این نیروگاهها در مقادیری کمتر از توان نامی آنها می‌باشد. بسته به فاصله میان توان مورد نیاز با توان نامی نیروگاه، میانباری و یا کم باری در نیروگاه رخ داده و در چنین شرایطی این فرآیند بهره برداران نیروگاه را با چالش روبرو می‌کند. در شکل (۱) الف اجزای اصلی مکانیکی یک نیروگاه برق-آبی متداول در کشور نمایش داده شده است. در این تصویر محل نصب سامانه هوادهی مشخص شده و به یکی از مسیرهای ورودی هوا به این سامانه نیز اشاره شده است.

به منظور شناخت هرچه بیشتر پدیده طناب گردابی تحقیقات بسیار گسترده‌ای بصورت تجربی و عددی از دیرباز تا کنون در جریان است [۱۷ و ۲۰]. در شکل (۱) ب، تصویر واضحی از شکل طناب گرداب در یک نمونه نیروگاه آزمایشگاهی نمایش داده شده است. بر این اساس، طناب گرداب، از نزدیکی مرکز مخروط خروجی توربین آغاز شده و بصورتی مارپیچ در محدوده مخروط لوله خروجی و حتی در قسمت های پایین تر و در زانویی لوله خروجی ادامه می‌یابد. با کمک تحلیل عددی این فرآیند، شکل (۱) ب، شناخت کاملتر و دقیقتری از ماهیت تشکیل و تداوم این پدیده در تحقیقات حاصل شده است.



(ب)

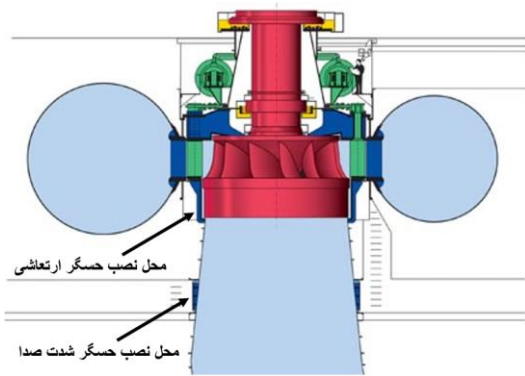
(الف)

شکل ۱. الف) اجزاء یک نیروگاه برق-آبی متداول در کشور و محل نصب سامانه هوادهی [۱۳] و ب) قوع پدیده طناب گردابی در محدوده خروجی توربین و بعد از آن [۲۰]

از آنجایی که تمامی این فرآیندها با منشاء فشار پایین جریان در ناحیه خروجی توربین رخ خواهند داد، برای مبارزه با این پدیده، رویکردهای مختلفی اتخاذ و پیش نهاد می‌شود [۶، ۸، ۱۳ و ۱۹]. از میان تمامی روشهای ممکن، بهترین روش از نظر اثر پذیری و از منظر اقتصادی، روش هوادهی به قسمت خروجی توربین در شرایط میانباری و کم باری می‌باشد [۱۹].

## ۳- جزئیات طرح اجرایی هوادهی و سنجش اطلاعات

با توجه به پیش‌بینی محل وقوع افت فشار و خلاء در جریان خروجی از رانر توربین، با کمک مقیاس مناسب از مراجع معتبر [۱۰ و ۱۹]، محل دقیق ارسال هوا به این جریان مشخص گردید. ضمناً متناسب با توان نیروگاه و ابعاد آن در مقایسه با تحقیقات تجربی مشابه، قطر لوله هوای ورودی و همچنین تعداد لوله‌های لازم برای انتقال هوا محاسبه گردید.



(ب)



(الف)

شکل ۲. الف) محل نصب سامانه هوارسانی در خروجی توربین (ب) موقعیت نصب حسگرهای ارتعاشی و صوتی نسبت به موقعیت توربین

در شکل (۲) الف تصاویر سامانه هوادهی اجرا شده در واحد ۳ نیروگاه برق آبی سد مسجد سلیمان نمایش داده شده است. همچنین در شکل (۲) ب محل شماتیک نصب حسگرهای ارتعاشی و صوتی در محل نیروگاه و نسبت به موقعیت توپین نشان داده شده است. بر اساس شکل (۱) الف و همچنین شکل (۲) الف، در فاصله ۵۴ سانتی متر زیر دماغه خروجی توربین، دو مسیر ورودی هوا با قطر اولیه ۴ اینچ و قطر تبدیل ۶ اینچ طراحی اولیه شد. این لوله‌ها هوا را از محیط نیروگاه به سمت محل مذکور هدایت کرده و در نهایت به یک لوله قائم سرو ته باز به طول ۱۲۰۰ میلیمتر و به قطر ۸ اینچ هدایت می‌کنند. این لوله دارای شبکه‌ای از سوراخهای با قطر ۵۰ میلی متر و به تعداد ۶۰ عدد، که در طرفین این لوله بطور مساوی تقسیم شده‌اند، می‌باشد. این طراحی به این دلیل اتخاذ گردیده تا هوا در هنگام تشکیل طناب‌گردابی، بصورت محوری و شعاعی توانایی انتقال به قسمت‌های کم فشار مربوطه را داشته باشد و به این ترتیب با تشکیل این پدیده مبارزه کند.

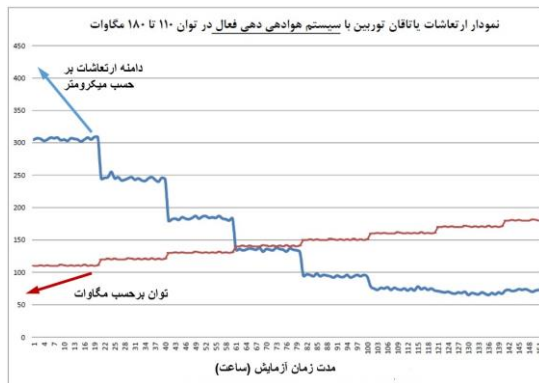
#### ۴- نتایج و نمودارها

در این بخش، به بررسی نتایج حاصل از اجرای سامانه هوادهی در واحد ۳ نیروگاه سد مسجد سلیمان خواهیم پرداخت. برای این منظور بر اساس برداشت اطلاعات تغییرات انجام شده از دو روش استفاده شد. این روشها عبارتند از: الف) روش پایش وضعیت دامنه نوسانات تکیه‌گاه توربین با کمک سیستم استاندارد شتاب سنج قرار گرفته در محل تکیه‌گاه و ب) روش صدا برداری و تعیین شدت صدا از تغییرات با کمک حسگرهای صدا تعبیه شده در دیواره بیرونی دریاچه بازدید توربین.

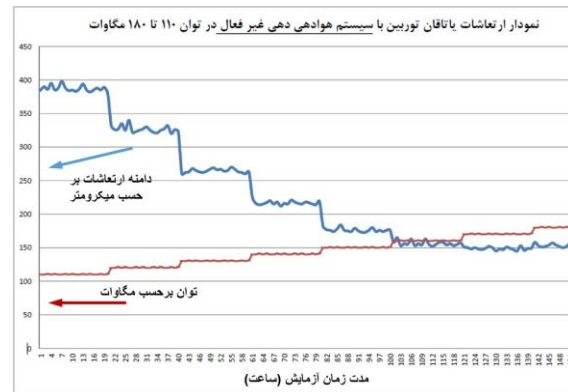
نتایج این داده برداری در شکل‌های (۳) و (۴) و همچنین بصورت پردازش شده در شکل‌های (۵) الف و ب منعکس شده است. در شکل‌های (۳) و (۴)، تغییرات دامنه ارتعاشات تکیه‌گاه (شکل (۳))، شدت صدا برداشت شده (شکل (۴))، با کمک تجهیزات استاندارد مربوطه، به ازای توان‌گیری مختلف از نیروگاه در بازه ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات در حالت الف) بدون ب) با کمک سامانه هوادهی نمایش داده شده است. همزمان در شکل‌های (۵) الف و ب، تغییرات بوجود آمده در هر توان خروجی نیروگاه، که بصورت نوسانی و در یک بازه زمانی در شکل‌های (۳) و (۴) منعکس شده بود، بصورت مقادیر متوسط یا بیشینه و در قالب نقاطی برای هر توان خروجی نیروگاه ترسیم کرده است.

در این شکل‌ها، میزان درصد تغییرات بوجود آمده ناشی از پدیده هوادهی، بر هر دو روش سنجش، یعنی الف) دامنه ارتعاشات و ب) شدت صدا را به ازای توان‌های مختلف خروجی نیروگاه ترسیم کرده است. همانگونه که از شکل (۳) الف و همچنین شکل (۵) الف بر می‌آید، دامنه ارتعاشات شعاعی توربین به وضوح با کاهش توان‌گیری از نیروگاه افزایش یافته و به سمت شرایط بحرانی حرکت می‌کند. بدیهی است که یکی از مهمترین علل وقوع این مساله، همانا پدیده طناب‌گردابی می‌باشد که رفته رفته با کاهش توان خروجی نیروگاه بحرانی‌تر شده و رژیم‌های مختلف جریانهای ایستا و برگشتی مطابق شکل (۳) در آن رخ می‌دهد. نکته مهمی که در نمودار

(۳) الف می‌توان مشاهده کرد، رشد دامنه نوسانات در هر توان همگام با کاهش توان خروجی بوده که می‌توان مشکلات و صدمات این افزایش دامنه نوسانات رو دوچندان کند. در این میان تاثیر شگرف و بی بدیل هوادهی در شکل (۳) ب و همچنین نمودار (۵) الف منعکس شده است. در این شکل‌ها به وضوح ضمن کاهش متوسط دامنه نوسانات تکیه‌گاه، شکل (۵) الف، نوسانات این تغییرات هم در هر توان، شکل (۳) ب، به شدت کاهش یافته است. در شکل (۵) الف، میزان اثرگذاری روش هوادهی در این کاهش دامنه بین ۵۵ درصد در توان ۱۸۰ کیلووات، تا ۲۵ درصد در توان ۱۱۰ کیلووات در نوسان است. این مساله نشان دهنده کاهش فزاینده اثر هوادهی در توان‌های پایین‌تر بر کاهش دامنه نوسانات توربین می‌باشد.

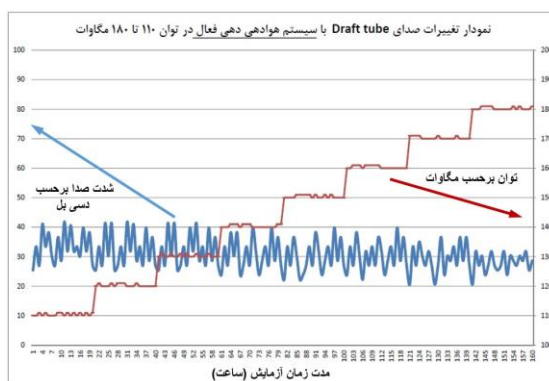


(ب)

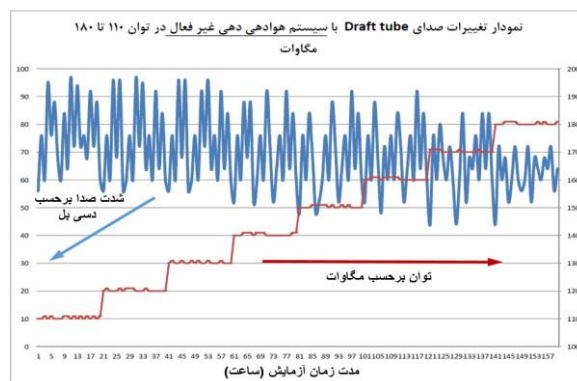


(الف)

شکل ۳. تغییرات دامنه ارتعاشات تکیه‌گاه توربین حسگرهای ارتعاشی مدل بنتلی-نوادا با حساسیت ۲ میلی‌ولت به ازای توان گیری مختلف از نیروگاه در بازه ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات در حالت الف) بدون ب) با کمک سامانه هوادهی



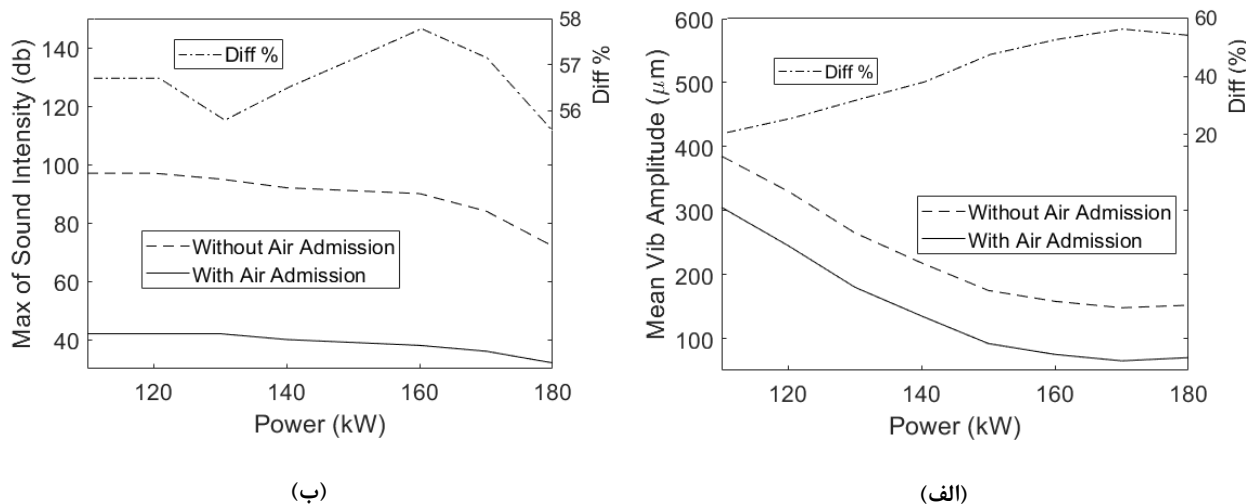
(ب)



(الف)

شکل ۴. تغییرات شدت صدا برداشت شده از مجاورت خروجی توربین با کمک حسگرهای شدت صدا مدل کیمو  $DS300$  به ازای توان گیری مختلف از نیروگاه در بازه ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات در حالت الف) بدون ب) با کمک سامانه هوادهی

شکل ۸ الف و ب و همچنین شکل (۵) ب، تغییرات شدت صدا برداشت شده از نزدیک ترین نقطه به خروجی جریان توربین در توان‌های مختلف خروجی از نیروگاه، را نمایش می‌دهد. از مقایسه شکل‌های (۴) الف و ب به وضوح می‌توان کاهش مقدار متوسط و دامنه نوسانات شدت صدا مشاهده نمود. دامنه نوسانات از حدود ۴۵ دسی‌بل به کمتر از ۱۵ دسی‌بل، یعنی حدود ۶۶٫۷ درصد، کاهش یافته و همزمان در شکل (۵) ب مقدار ماکسیمم این شدت نیز حدود ۵۷ درصد کاهش نشان می‌دهد.



شکل ۵. تغییرات الف) متوسط دامنه ارتعاشات تکیه گاه توربین و ب) بیشینه شدت صدا ثبت شده در مجاورت دریچه بازدید توربین، به ازای توان‌گیری مختلف از نیروگاه در حالات بدون (-) و با کمک سامانه (—) هوادهی و همچنین درصد اختلاف تغییرات (-).

## ۵- نتیجه‌گیری و پیش‌نهادات

در این تحقیق مساله تاثیرات هوادهی به زیر رانر توربین فرانسسیس و در محدوده مخروط لوله خروجی واحد ۳ نیروگاه برق آبی سد مسجدسلیمان به ظرفیت نامی هر واحد برابر ۲۵۰ مگاوات به روش تجربی بررسی شد. این اقدام به منظور مبارزه با اثر مخرب طناب گردابی پدید آمده در شرایط توان‌گیری از نیروگاه در ترازهای میانه یا کم آب دیاچه سد و در شرایط کارکرد میانبار و کم باری انجام می‌شود. در این پژوهش، بر اساس نتایج تحقیقات بدست آمده، بصورت تجربی از یک سامانه هوادهی مستقل با دو مسیر ورودی هوا به یک لوله قائم سر و ته باز و با شبکه‌ای از سوراخهای با قطر و تعداد مشخص و در موقعیتی دقیقاً در زیر مخروط تحتانی توربین و با فاصله معین استفاده گردید. ورودی هوای این مجموعه از هوای آزاد محیط نیروگاه تامین شد.

برای بررسی تاثیر هوادهی بر عملکرد نیروگاه در توانهای ۱۱۰، ۱۲۰ تا ۱۸۰ مگاوات که محدوده بحرانی توان‌گیری از نیروگاه بود، از دو روش برداشت اطلاعات استفاده شد که عبارتند از: الف) اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات یاتاقان توربین با کمک حسگرهای ارتعاشی مدل بنتلی-نوادا و ب) اندازه‌گیری شدت صدا با کمک حسگر شدت صدا مدل کیمو DS300 که در محل مناسب برای سنجش اطلاعات بدست آمده نصب شده بودند. نتایج بدست آمده، در هر کدام از شرایط دامنه ارتعاشات یا شدت صدا، را می‌توان برای مقایسه بهتر عملکرد سامانه هوادهی در مقایسه با شرایط معمول و بدون هوادهی نیروگاه به دو دسته عمده تقسیم بندی کرد که عبارتند از: دسته الف) نوسانات پارامترهای بدست آمده در هر توان و دسته ب) تغییرات متوسط این پارامترها در بازه توانی مختلف. بر اساس اطلاعات بدست آمده و در خصوص دسته الف، بطور کلی نوسانات اطلاعات کسب شده در شرایط هوادهی برای همه مقادیر بدست آمده (دامنه ارتعاشات، شدت صدا و فشار جریان) کاهش یافته و نشان از بهبود قابل توجه شرایط بحرانی توان‌گیری از نیروگاه است. این کاهش بخصوص در مورد شدت صدا بدست آمده بسیار چشم‌گیر بوده، طوری که در آن کاهش تا ۶۶٫۷ درصد را در بحرانی ترین شرایط نیروگاه (۱۱۰ مگاوات تولید توان) شاهد هستیم. اما نتایج بسیار جالبی از ارزیابی دسته ب نیز حاصل شد که در ادامه به آن اشاره می‌گردد. عموماً همه شاخص‌های دوگانه ارتعاشی و صدا نشان از بهبود دارند. اما میزان این بهبود اساساً با هم متفاوتند. در خصوص دامنه ارتعاشات شاهد بهبود حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد، دامنه ارتعاشات یاتاقان توربین به ترتیب از ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات هستیم. در حالی که در مورد شدت صدا ثبت شده تغییرات کاهش متوسط این پارامتر بصورت تقریباً ثابت و حدود ۵۷ درصد بوده است. از آنجایی که شدت صدا اندازه‌گیری شده بدون تفکیک و فیلتر انجام شده است، می‌تواند تحت تاثیرات نویز و فرکانسهای صدا تجهیزات اطراف و یا تحت تاثیر کابیناسیون احتمالی پدید آمده در پره‌های توربین قرار داشته باشد. به عنوان یکی دیگر از نتایج بدست آمده از

تحلیل اطلاعات کسب شده، می‌توان به این نکته مهم توجه کرد که روند اثر بخشی سامانه هوادهی، تقریباً در همه محدوده‌های داده برداری و در هر دو شاخص ارتعاشی و صدا، کاهش یافته و لذا این مهم می‌تواند دلالت بر نیاز نیروگاه به تزریق هوای بیشتر برای دستیابی به شرایط توان گیری پایین‌تر از محدوده ۱۱۰ مگاوات خواهد داشت که به عنوان یک پیشنهاد می‌توان پیش‌بینی سامانه تزریق هوا بجای سامانه هوادهی فعلی را ارائه کرد. همچنین به منظور کاهش هزینه های پایش وضعیت، از میان روشهای به کار رفته جهت ارزیابی میزان تاثیرات هوادهی بر پدیده طناب گردابی، توصیه می‌شود تا از روش سنجش دامنه ارتعاشات یاتاقان توربین به عنوان حساس‌ترین روش بهره گرفته شود.

## ۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از شرکت مدیریت تولید و بهره برداری سد و نیروگاه مسجدسلیمان و همچنین آقایان مهندس درخشان و یزدانیان و مهندس خدادادی به واسطه همکاری و مشاوره قدردانی می‌نمایند. همچنین نویسندگان از دکتر مهدی هودگر به عنوان رئیس مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق خوزستان به واسطه برقراری ارتباط موثر میان صنعت و دانشگاه کمال تشکر را دارند.

## مراجع

1. L. Sun, H. Xu, Ch. Li, P. Guo, Zh. Xu, "Unsteady assessment and alleviation of inter-blade vortex in Francis turbine", *Applied Energy*, 358, 122616 (2024).
2. X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, M. Coussirat, "Detection of cavitation in hydraulic turbines", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 983–1007 (2006).
3. P. Kumar, S. K. Singal, P. P. Gohil, "A technical review on combined effect of cavitation and silt erosion on Francis turbine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 190, 114096 (2024).
4. A. Amini, E. Vagnoni, A. Favrel, K. Yamaishi, A. Müller, F. Avellan, "Upper part-load instability in a reduced-scale Francis turbine: an experimental study", *Experiments in Fluids*, 64:110, 1-21 (2023).
5. T. Zhang, G. He, W. Guang, J. Lu, X. Song, D. Zhu, Zh. Wang, "Investigation of the internal flow in a Francis turbine for comparing the flow noise of different operation conditions", *Water*, 15, 3461 (2023).
6. M. Mohammadi, E. Hajidavalloo, M. Behbahani-Nejad, "Investigation on combined air and water injection in Francis turbine draft tube to reduce vortex rope effects", *Journal of Fluids Engineering*, 141, 051301-1 (2019).
7. L. Sun, L. Liu, Zh. Xu, P. Guo, "Numerical investigation of no-load startup in a high-head Francis turbine: Insights into flow instabilities and energy dissipation", *Physics of Fluids*, 36, 035142 (2024).
8. M. Shafa, E. Hajidavalloo, A. Riasi, A. H. Sajadinia, "Optimal condition of simultaneous water and air injection in a Francis turbine in order to reduce vortices using experimental and numerical methods", *Energy Conversion and Management*, 291, 117305 (2023).
9. S. Kumar, M. J. Cervantes, B. K. Gandhi, "Rotating vortex rope formation and mitigation in draft tube of hydroturbines – A review from experimental perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110354 (2021).
10. S. Muntean, R. F. Susan-Resiga, V. C. Campian, C. Dumbrava, A. Cuzmos, "In situ unsteady pressure measurements on the draft tube cone of the Francis turbine with air injection over an



- extended operating range", *Conference Paper in UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, (2013).
11. S. Kumara, B. K. Gandhi, "Effect of water jet area on mitigation of vortex rope in a Francis turbine", *Physics of Fluids*, 35, 105146 (2023).
  12. Y. Xiao, Z. Wang, Z. Yan, J. Zhang, "Experimental and numerical analysis of pressure pulses characteristics in a Francis turbine with partial load", *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*, 12, 012023 (2010).
  13. L. Wang, J. Cui, Shu, D. Jiang, Ch. Xiang, L. Li, P. Zhou, "Research on the vortex rope control techniques in draft tube of Francis turbines", *Energies*, 15, 9280 (2022).
  14. S. Khullar, K. M. Singh, M. J. Cervantes, B. K. Gandhi, "Influence of runner cone profile and axial water jet injection in a low head Francis turbine at part load", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101810 (2022).
  15. Sh. Pang, B. Zhu, Y. Shen, Zh. Chen, "Study on suppression of cavitating vortex rope on pump-turbines by J-groove", *Applied Energy*, 360, 122843 (2024).
  16. S.-J. Kim, Y.-S. Choi, Y. Cho, J.-W. Choi, J.-J. Hyun, W.-G. Joo, J.-H. Kim, "Effect of fins on the internal flow characteristics in the draft tube of a Francis turbine model", *Energies*, 13, 2806 (2020).
  17. L. Sun, Y. Li, P. Guo, Zh. Xu, "Numerical investigation of air admission influence on the precessing vortex rope in a Francis turbine", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 17:1, 2164619 (2023).
  18. J. Unterluggauer, A. Maly, E. Doujak, "Investigation on the impact of air admission in a prototype Francis turbine at low-load operation", *Energies*, 12, 2893 (2019).
  19. S. Shtork, D. Suslov, S. Skripkin, I. Litvinov, E. Gorelikov, "An overview of active control techniques for vortex rope mitigation in hydraulic turbines", *Energies*, 16, 5131 (2023).
  20. M. S. Iliescu, G. D. Ciocan, F. Avellan, "Analysis of the cavitating draft tube vortex in a Francis turbine using particle image velocimetry measurements in two-phase flow", *Journal of Fluids Engineering*, 130, 021105-1(2008).