J. Energy Conversion
Volume: 11, Issue: 2, 2024: 103-118

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۱، شماره ۲، تابستان۱۴۰۳، ص: ۱۰۳-۱۱۸

کنترل پدیده طناب‌گردابی با کمک نصب سامانه هوادهی در محل جریان خروجی توربین نیروگاه سد مسجدسلیمان

قاسم خواجه[۱]، رضا پول‌تنگری [۲و*]، افشین قلی‌پور[۳]

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز، الیگودرز، ایران gkhajeh@gmail.com

*۲- استادیار، مهندسی مکانیک طراحی جامدات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران reza.poultangari@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد، مهندسی برق الکترونیک، شرکت مدیریت تولید و بهره برداری سد و نیروگاه مسجدسلیمان، مسجدسلیمان، ایران Gholipour16@gmail.com.

دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱۵، بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۹

چکیده

در این تحقیق به بررسی تاثیرات هوادهی بصورت مستقیم و آزاد در ناحیه جریان خروجی توربین فرانسیس واحد سوم نیروگاه برق-آبی سد مسجدسلیمان به ظرفیت نامی هر واحد برابر ۲۵۰ مگاوات در شرایط کارکرد میانبار و کم باری، پرداخته شده است. این اقدام به منظور کاهش یا حذف اثر مخرب طناب گردابی، پدید آمده در شرایط توان‌گیری از نیروگاه، در ترازهای میانه یا کم آب دریاچه سد، انجام می‌شود. اهمیت این مساله در آنجاست که درصورت موفقیت طرح، به مجموعه نیروگاه برق آبی مربوطه، اجازه بهره‌برداری از نیروگاه در محدوده وسیع‌تری از توان نامی آن را خواهد داد. در این پژوهش، بر اساس نتایج تحقیقات بدست آمده، بصورت تجربی از یک سامانه هوادهی با دو مسیر ورودی هوا با قطر اولیه ۴ اینچ و قطر تبدیل ۶ اینچ به یک لوله قائم به طول ۱۲۰۰ میلیمتر، با قطر ۸ اینچ با سر و ته باز استفاده شده است. لوله قائم دارای ۶۰ عدد سوراخ با قطر ۵۰ میلیمتر بوده و در موقعیتی دقیقا در زیر مخروط تحتانی توربین و با فاصله ۵۴ سانتیمتر از آن، قرار می‌گیرد. ورودی هوای این مجموعه از هوای آزاد محیط نیروگاه تامین شد و این مسیر دارای شیرآلات لازم برای قطع یا وصل یا یک طرفه کردن جریان هوا در مواقع لازم بود. به علت وجود جریانهای شدید گردابه‌ای در محل نصب سیستم هوادهی، از دو لوله ۶ اینچی، اضافه بر لوله‌های هوادهی سامانه، به منظور استحکام هرچه بهتر این سامانه استفاده شد. برای ارزیابی اثر هوادهی، از سه روش مختلف برای برداشت اطلاعات نیروگاه استفاده شد که شامل اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات توربین، اندازه‌گیری شدت صوت از بدنه توربین و در نهایت فشار هیدرولیکی جریان خروجی توربین بود. نتایج بدست آمده، در بارهای نیروگاهی به میزان ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات، به‌صورت پلکانی اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده نشان‌دهنده موفقیت کامل طرح در هرسه شاخص اندازه‌گیری شده است.

***عهده‌دار مکاتبات :** reza.poultangari@gmail.com

کلمات کلیدی: طناب گرداب، توربین فرانسیس، سامانه هوادهی، ارتعاشات، شدت صوت، فشار هیدرولیکی.

نحوه استناد به این مقاله قاسم خواجه، رضا پول‌تنگری ، افشین قلی‌پور. کنترل پدیده طناب‌گردابی با کمک نصب سامانه هوادهی در محل جریان خروجی توربین نیروگاه سد مسجدسلیمان. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۳; ۱۱ (۲) : ۱۰۳-۱۱۸.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

برای بهبود ساختارهای انرژی و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی در تولید انرژی الکتریکی، توجه به توسعه و استفاده از انرژی‌های نو در سال‌های اخیر دوچندان شده است. از این رو همگام با بحرانی‌تر شدن شرایط محیط زیستی و کمبود منابع انرژی فسیلی و آلودگی‌های نیروگاههای هسته‌ای و اتمی، منابع انرژی برق-آبی، در تحلیل کلان انرژی، روز به روز ارزشمندتر می‌گردد. نیروگاه آبی به عنوان نوعی منبع انرژی فراوان، پایدار، کارآمد، پاک و تجدیدپذیر، به دلیل پاسخ سریع به سیستم کلان تولید انرژی، یکی از بهترین‌هاست. اما در شرایط عملیاتی و میدانی، امکان استفاده از این منبع ارزشمند بصورت پایدار و دائم با چالشها و موانعی روبرو است. در نتیجه رفع یا تضعیف این موانع می‌تواند سهم تولید انرژی حاصل از منابع برق-آبی را تقویت نماید. توربین آبی فرانسیس 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 ثاب، 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، اصطلاحا 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[۱] [۱ و ۲] و طناب گردابی[۲] جریان، منجر به آسیب‌های جدی به اجزاء ثابت و متحرک نیروگاه می‌شود. برخی از این آسیب‌ها عبارتند از: ۱- بار خستگی و سایش و ترک خوردگی پره‌های توربین فرانسیس یا رانر[۳] و همچنین پره‌های ثابت و متحرک[۴] شیر تنظیم ویکت[۵] (شیر تنظیم کننده دبی جریان ورودی آب به توربین متناسب با دور ثابت مورد نیاز توربین) و سایر اجزا و ملحقات توربین مانند جعبه هوادهی[۶]، دریچه های بازدید توربین و ... [۳] ۲- بروز ارتعاشات خطرناک و امکان پدیده تشدید در اجزاء متحرک نیروگاه و بالارفتن دمای معمول کارکرد آنها (با توجه به تلرانس‌های بسیار حساس و کوچک در نظر گرفته شده در طراحی قسمت‌های متحرک و دوار نیروگاه و اندازه حرکت زاویه ای عظیم مجموعه نیروگاهی، پدیده تشدید و بروز دامنه نوسانات خارج از طراحی می‌تواند فاجعه بار باشد) [۴ و ۵].

برای مبارزه با پدیده‌های نامطلوبی مثل طناب‌گردابی، تحقیقات گسترده‌ای از گذشته تا به حال در جریان است. در این راستا تحقیقات عددی و تجربی بسیاری در موضوع مدل سازی پدیده طناب‌گردابی انجام شده است [۶ تا ۱۳]. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، بصورت معمول، جریان در لوله ورودی[۷]، تیغه و رانر نسبتا پایدار است، در حالی که جریان در مخروط لوله خروجی[۸] نسبتا پیچیده همراه با آشفتگی و چرخش است[۱۲ و ۱۳]. در بهترین نقطه بازده[۹] (بهترین بازده) جریان اساساً در خروجی

[1] Cavitation
[2] Vortex Rope
[3] Runner
[4] Stay and Guide Vanes
[5] Wicket Gate
[6] Air Box
[7] Penstock
[8] Draft Tube Cone
[9] Best Efficiency Point (BEP)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

بصورت گردابه‌ای[1] بوده و نسبتاً پایدار است، بنابراین ضربان فشار در لوله خروجی کمینه و نامحسوس می‌باشد[۱۴]. هنگام انحراف از بهترین بازده، جریان با مولفه سرعت محیطی بالا از حالت گردابی و پایدار خارج می‌شود. با توجه به عمل نیروی گریز از مرکز، فشار استاتیک جریان در مرکز لوله خروجی کاهش می‌یابد و می‌تواند به خلاء لازم برای نقطه تبخیر آب در دماهای بسیار کم (کمتر از ۱۵ درجه سانتی گراد) نزدیک شده و با بروز این اتفاق جریان در لوله خروجی را دو فازی مایع‌بخار نماید[۱۵]. این پدیده را جریان ورتکس[2] می‌نامند و از آنجایی که بصورت طنابی کشیده در امتداد محور جریان در لوله خروجی ظاهر می‌شود و در ادامه همگام با اغتشاش جریان، بصورت طنابی درهم تنیده و چرخشی بروز می‌نماید به این پدیده نامطلوب، طناب‌گردابی چرخشی[3] جریان گویند[۱۶ و ۱۷]. در ادامه افت فشار در مسیر جریان خروجی توربین و در حضور طناب‌گردابی، استراتژی‌های مختلفی از جریان برگشتی، اغتشاشی و ترکیبی از اغتشاش و برگشت جریان می‌تواند در خلال وقوع طناب‌گردابی رخ دهد که نتیجه‌ای جز اختلال در مسیر جریان خروجی، افت راندمان تولید انرژی، ارتعاشات مخرب و ناخواسته، تخریب تجهیزات ثابت و دوار و .... نخواهد داشت [۱۵ و ۱۸]. در تشریح مکانیزم عملکرد پدیده مخرب طناب‌گردابی، همانطور که در شکل۱ نشان داده شده است، سرعت چرخش طناب‌گردابی حدود ۳/۱-۴ برابر سرعت جریان چرخشی معمول گردابه‌ای است[۱۹]. تولید طناب‌گردابی، اساساً به دلیل چرخش جریان در ورودی لوله خروجی و وقوع جریان برگشتی در مرکز این ناحیه دورانی است. تشکیل این طناب در گردابه جریان باید دو شرط را برآورده کند. اولاً، مولفه محیطی سرعت مطلق در بیشترین شعاع گردابه به مقدار معینی برسد. ثانیا، هسته گردابه در ابتدای مخروط خروجی توربین، باید یک خروج از مرکزیت خاص از خود نمایش دهد[۱۵].

بر اساس تحقیقات صورت گرفته، در مجموع دو روش عمده برای مبارزه با این پدیده در تحقیقات آمده است. روش اول روشهای مبتی بر سیالات بوده [۶ تا ۱۳] و دیگری روشهای مبتنی بر ایجاد تغییرات هندسی است[۱۹ تا ۲۱]. یکی از موثرترین و در عین حال اقتصادی‌ترین روش‌های ممکن در این رابطه، روش هوادهی[4] به ناحیه زیر مخروط خروجی توربین و ابتدای لوله خروجی آب از توربین با کمک لوله کشی است [۲۲ و ۲۳]. از آنجایی که در این روش، هوا بصورت آزاد و بدون نیاز به کمپرسور در هنگام وقوع پدیده طناب‌گردابی به محل مربوطه مکیده می‌شود، در مقایسه با روشهای تزریق هوا با کمپرسور، بسیار اقتصادی‌تر می‌باشد. ضمنا با توجه به طرح ساده لوله‌کشی آن، برای هوارسانی در مجموع حداقل هزینه لازم را در بر خواهد داشت. از سوی دیگر محل هوا رسانی این سامانه، دقیقا قلب پدیده نامطلوب طناب گردابی را هدف قرارداده و به موثر ترین شکل ممکن می‌توان این پدیده را تضعیف یا کاملا حذف نماید. 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 گشته است. 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

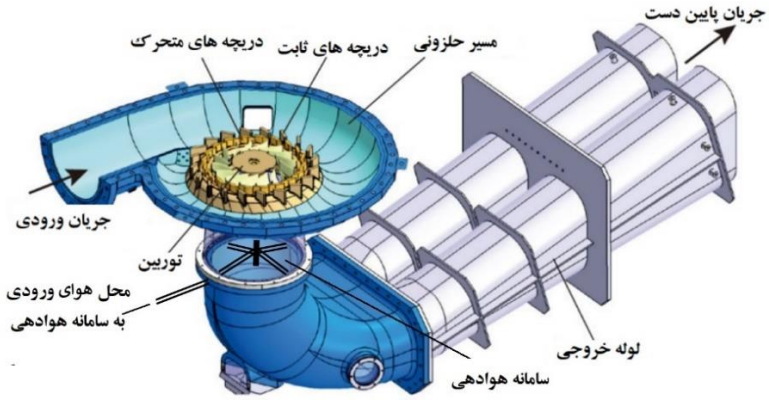
[1] Eddy Current
[2] Vortex Flow
[3] Spiral Vortex Rope
[4] Air Admission

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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. بر اساس این رویکرد، 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[1] 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 حلزونی[2] و دریچه‌های تنظیم متحرک و ثابت، عملا زمینه وقوع کاویتاسیون در این دریچه‌ها و در ادامه مسیر در پره‌های توربین فرانسیس و وقوع طناب‌گردابی در قسمت مخروطی لوله خروجی نیروگاه فراهم شده و بخاطر آسیب‌های متعدد فوق الذکر، 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 پارامترهای مختلف مانند: دامنه ارتعاشات تکیه‌گاه توربین، شدت صوت و همچنین فشار هیدرولیکی در جریان خروجی توربین، اثر مخرب طناب گردابی در توانهای بسیار پایین تر از ظرفیت نامی نیروگاه، کاملا 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.

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 توان‌گیری 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 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.

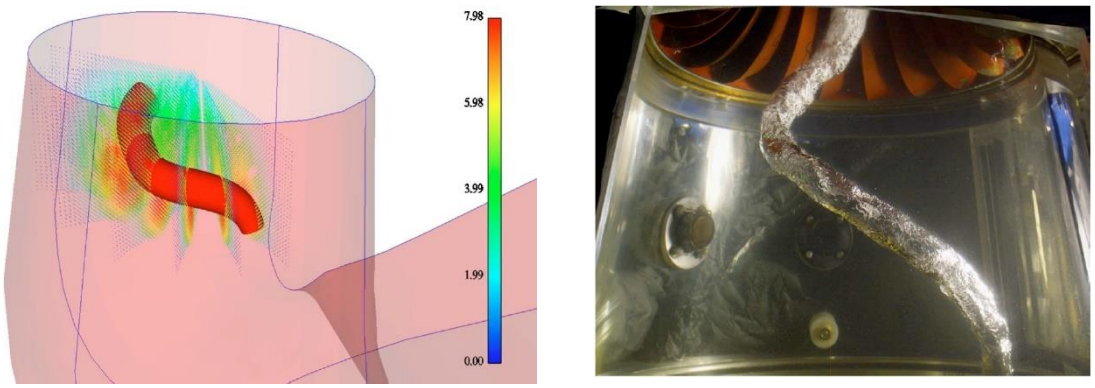


[1] Dispatching Unit
[2] Spiral Casing

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

شکل ۱: اجزاء یک نیروگاه برق-آبی متداول در کشور و محل نصب سامانه هوادهی [۱۳]

به منظور شناخت هرچه بیشتر پدیده طناب گردابی تحقیقات بسیار گسترده‌ای بصورت تجربی و عددی از دیرباز تا کنون درجریان است [۱۶ و ۱۷]. در شکل ۲ قسمت الف، تصویر واضحی از شکل طناب‌گرداب در یک نمونه نیروگاه آزمایشگاهی نمایش داده شده است. بر این اساس، طناب‌گرداب، از نزدیکی مرکز مخروط خروجی توربین آغاز شده و بصورتی مارپیچ در محدوده مخروط لوله خروجی و حتی در قسمت های پایین‌تر و در زانویی لوله خروجی ادامه می‌یابد. با کمک تحلیل عددی این فرآیند، شکل ۲ (ب)، شناخت کاملتر و دقیقتری از ماهیت تشکیل و تداوم این پدیده در تحقیقات حاصل شده است.

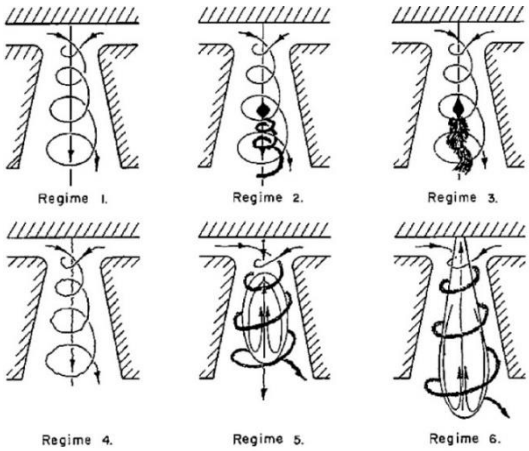


(الف) (ب)

شکل ۲: وقوع پدیده طناب گردابی در محدوده خروجی توربین و بعد از آن و تحلیل این پدیده بصورت، الف) تجربی و ب) عددی [۱۶]

بر اساس این تحقیقات، ساز و کار تشکیل طناب گردابی بر اساس رژیم های شش گانه‌ای دسته بندی می‌شود. این دسته بندیف بر اساس نحوه جریان در منطقه میانی طناب‌گردابی بوده و بر اساس برگشت جریان یا توقف جریان در این ناحیه و همچنین جریان آرام یا مغشوش برگشتی در این ناحیه دسته بندی می شود [۹]. 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 می شود. عمدتا از نظر کاربردی و اقتصادی، این رویکردها بر مبنای الف) ایجاد تغییرات هند سی [۲۰ و ۲۱] و یا ب) تزریقات سیالات به هر دو صورت تزریق آب یا هوا در محدوده خروجی جریان از توربین در تحقیقات گذشته پیشنهاد شده‌اند [۶، ۸، ۱۳ و ۱۴]. 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 [۱۴]. از جمله علل اصلی این مهم، ۱) عدم نیاز به انرژی برای تزریق هوا به علت مکش هوا توسط جریان ۲) عدم نیاز به تجهیزات خاص و یا تغییرات هندسی خاص در قلب نیروگاه ۳) تعمیرات آسان و سریع در صورت نیاز و ۴) عدم نیاز به تجهیزات کنترلی برای عملکرد صحیح این سامانه است.

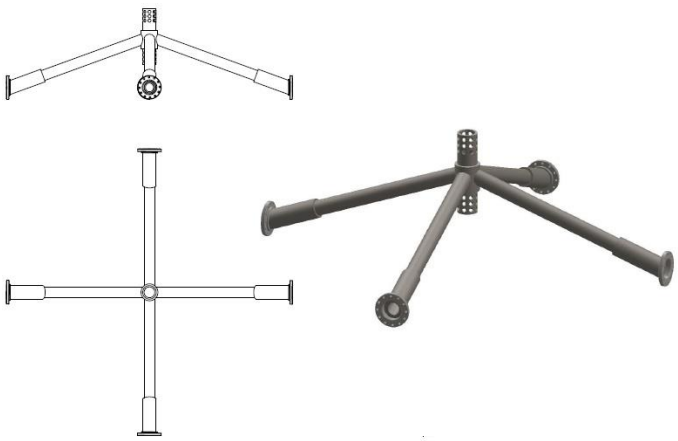
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۳: رژیم های مختلف ممکن برای تشکیل و توزیع جریان در منطقه میانی طناب گردابی[۹]

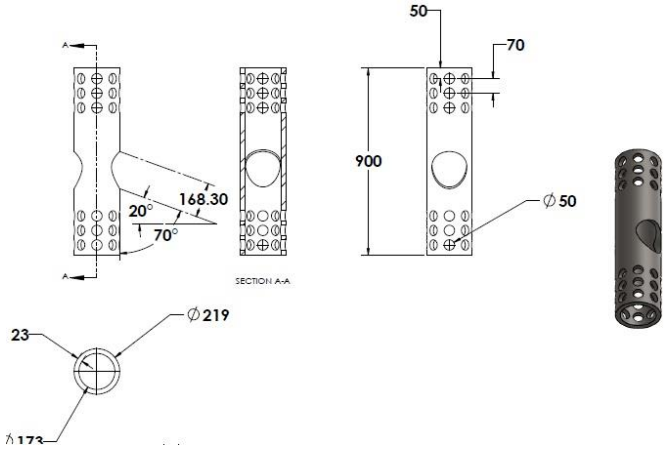
۳. جزئیات طرح اجرایی هوادهی

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 ۱۴]، محل دقیق ارسال هوا به این جریان مشخص گردید. ضمنا 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.



(الف)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۴: طرح کلی هوارسانی به خروجی توربین الف) آرایش لوله های هوارسانی و لوله های اتصال سامانه هوادهی ب) جزئیات لوله قائم با سوراخهای مشبک توزیع کننده هوا در جریان خروجی توربین ج و د) تصاویری از اجرای طرح و موقعیت آن نسبت به دهانه خروجی توربین

در شکل ۴ الف تا د نقشه و اجزای مختلف سامانه هوادهی اجرا شده در واحد ۳ نیروگاه برق آبی سد مسجد سلیمان نمایش داده شده است. بر اساس شکل ۱ و همچنین شکل ۴ ج، 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. بدیهی است که هر ترفندی که به بهبود فرآیند هوادهی، هم از نظر مقدار هوا انتقالی و هم از نظر گستردگی انتقال هوا به قسمت‌های لازم کمک نماید، مطلوب خواهد بود. در خلال این مسیر، شیرآلات لازم برای قطع یا وصل جریان هوا شکل ۵ الف و همچنین یک طرفه کردن جریان هوا در مواقع لازم، مطابق شکل ۵ ب، پیش‌بینی شد. به علت وجود جریانهای شدید گردابه‌ای در محل نصب سیستم هوادهی، از دو لوله شش اینچی، اضافه بر لوله‌های هوادهی سامانه، به منظور مهار هرچه بهتر این سامانه استفاده شد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

با توجه به جریان چرخشی، پرنوسان، مغشوش و آشفته با حجم عظیم در محدوده اجرای پروژه، دهانه خروجی توربین، شکل هندسی تجهیزات برای ایجاد کمترین مقاومت هیدرولیکی، جنس آنها به جهت جلوگیری از فرسایش و خودگی ناشی از بروز کاویتاسیون، نحوه نصب و جنس اتصالات جوشی و فلنجها، از جمله چالش‌های دیگر اجرای پروژه بود. برای این منظور تمامی قطعات شامل لوله ها و فلنج ها از جنس فولاد کربنی مطابق استاندارد API 5L x52 psl 2 انتخاب گردید.



(ب)



(الف)

شکل ۵: اتصالات و شیر یک طرفه نصب شده در مسیر هوای ورودی به سامانه هوادهی

بدیهی است برای جوشکاری قطعات، مطابق استاندارد مربوطه و با در نظر گرفتن احتمالات بروز لرزش و احتمال شکست خستگی، روش و استراتژی جوشکاری انتخاب گردید. در این راستا از الکترود و فیلر ۷۰۱۸ به همراه پیش گرم موضع جوشکاری و با تعداد پاس های لازم استفاده شد (شکل ۶). ضمنا انتقال هوا بصورت کاملا آزاد و بدون دخالت کمپرسور یا دمنده انجام شد.



شکل۶: نحوه اتصال یکی از لوله های سیستم هوادهی با کمک جوشکاری

۴. نتایج بدست آمده

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

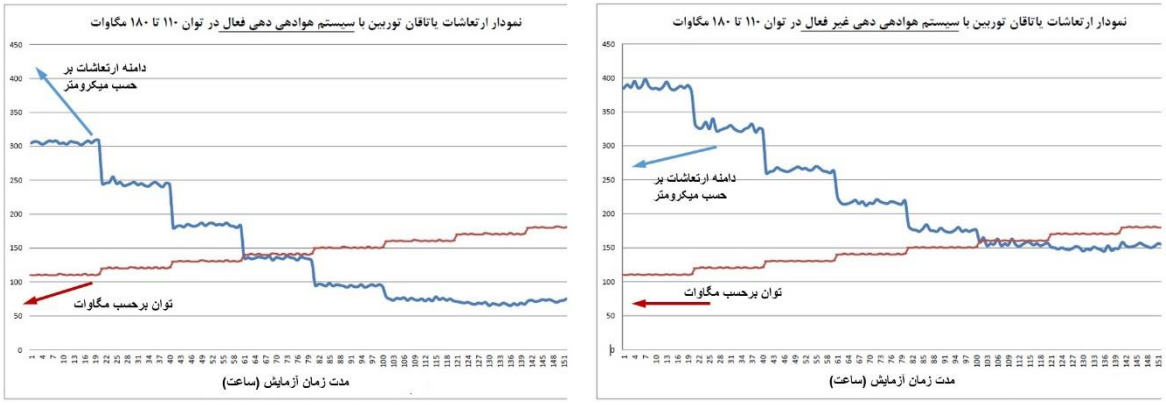
در این بخش، به بررسی نتایج حاصل از اجرای سامانه هوادهی در واحد ۳ نیروگاه سد مسجد سلیمان خواهیم پرداخت. برای این منظور بر اساس برداشت اطلاعات تغییرات انجام شده از سه روش مختلف استفاده شد. این روشها عبارتند از:

الف) روش پایش وضعیت دامنه نوسانات تکیه‌گاه توربین با کمک سیستم استاندارد شتاب سنج قرار گرفته در محل تکیه گاه

ب) روش صدا برداری و تعیین شدت صوت از تغییرات با کمک حسگرهای صوتی تعبیه شده در دیواره بیرونی دریچه بازدید توربین

د) روش سنجش تغییرات فشار در خروجی توربین با کمک سنسورهای فشار به کار رفته در دیواره مخروطی خروجی توربین

نتایج این داده برداری در شکل‌های ۷ تا ۹ و همچنین بصورت پردازش شده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ منعکس شده است. در شکل‌های ۷ تا ۹، تغییرات دامنه ارتعاشات تکیه‌گاه (شکل ۷)، شدت صدای برداشت شده (شکل ۸) و تغییرات فشار جریان خروجی توربین (شکل ۹)، 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 ۱۰ تا ۱۲، تغییرات بوجود آمده در هر توان خروجی نیروگاه، که بصورت نوسانی و در یک بازه زمانی در شکل های ۷ تا ۹ منعکس شده بود، بصورت مقادیر متوسط یا بیشینه و در قالب نقاطی برای هر توان خروجی نیروگاه ترسیم کرده است.



(ب) (الف)

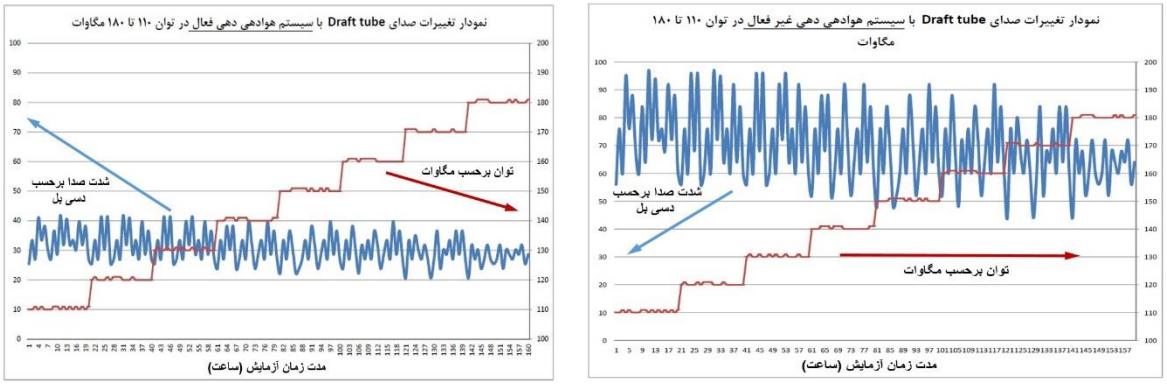
شکل ۷: تغییرات دامنه ارتعاشات تکیه گاه توربین به ازای توان گیری مختلف از نیروگاه در بازه ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات در حالت الف) بدون ب) با کمک سامانه هوادهی

در این شکل‌ها، میزان درصد تغییرات بوجود آمده ناشی از پدیده هوادهی، بر هر سه روش سنجش، یعنی الف) دامنه ارتعاشات ب)شدت صوت و در نهایت ج) فشار جریان خروجی را به ازای توان های مختلف خروجی نیروگاه ترسیم کرده است.

همانگونه که از شکل ۷ الف و همچنین شکل ۱۰ 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 طناب گردابی می‌باشد که رفته رفته با کاهش توان خروجی نیروگاه بحرانی‌تر شده و رژیم های مختلف جریانهای ایستا و

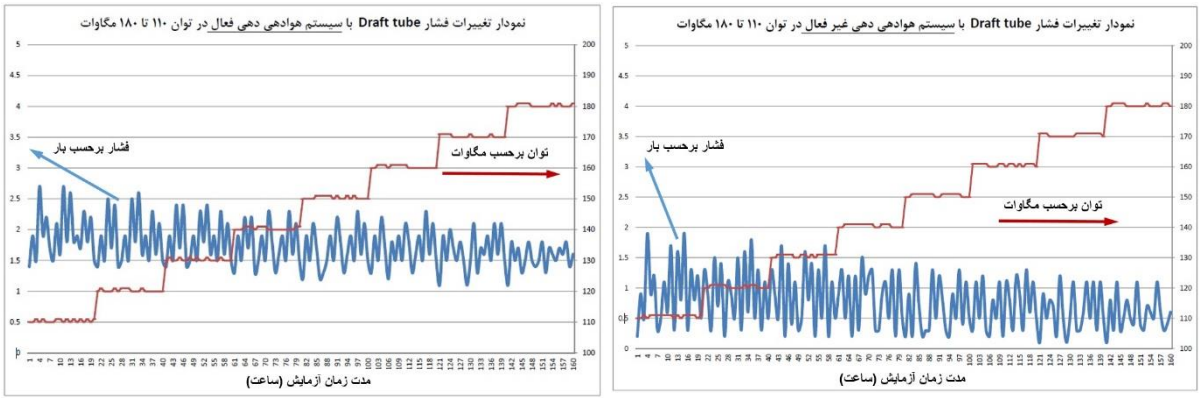
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

برگشتی مطابق شکل۳ در آن رخ می دهد. نکته مهمی که در نمودار۷ الف می‌توان مشاهده کرد، رشد دامنه نوسانات در هر توان همگام با کاهش توان خروجی بوده که می توان مشکلات و صدمات این افزایش دامنه نوسانات رو دوچندان کند. در این میان تاثیر شگرف و بی بدیل هوادهی در شکل ۷ ب و همچنین نمودار ۱۰ منعکس شده است. در این شکل‌ها به وضوح ضمن کاهش متوسط دامنه نوسانات تکیه‌گاه، شکل ۱۰، نوسانات این تغییرات هم در هر توان، شکل ۷ ب، به شدت کاهش یافته است. در شکل ۱۰، 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 می باشد.



(الف) (ب)

شکل ۸: تغییرات شدت صدای برداشت شده از مجاورت خروجی توربین به ازای توان گیری مختلف از نیروگاه در بازه ۱۱۰ تا ۱۸۰ مگاوات در حالت الف) بدون ب) با کمک سامانه هوادهی



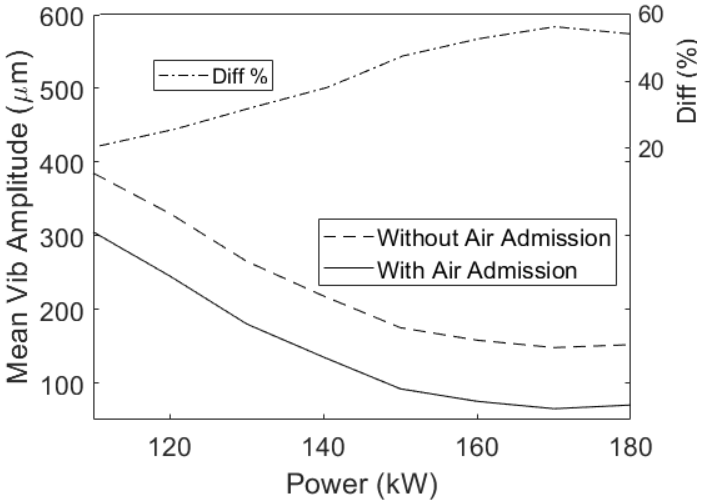
(الف) (ب)

شکل ۹: تغییرات دامنه فشار هیدرولیکی در مجاورت دریچه بازدید توربین به ازای توان‌گیری 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 ۱۱، تغییرات شدت صوت برداشت شده از نزدیک ترین نقطه به خروجی جریان توربین در توان‌های مختلف خروجی از نیروگاه، را نمایش می‌دهد. از مقایسه شکل های ۸ الف و ب به وضوح می‌توان کاهش مقدار

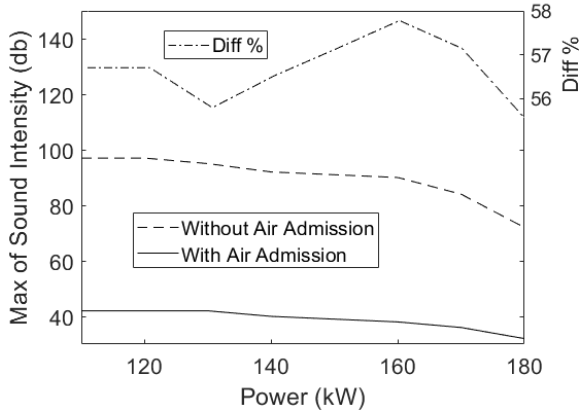
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

متوسط و دامنه نوسانات شدت صوت مشاهده نمود. دامنه نوسانات از حدود ۴۵ دسی‌بل به کمتر از ۱۵ دسی‌بل، یعنی حدود ۶۶,۷ درصد، کاهش یافته و همزمان در شکل ۱۱ مقدار ماکسیمم این شدت نیز حدود ۵۷ درصد کاهش نشان می‌دهد.



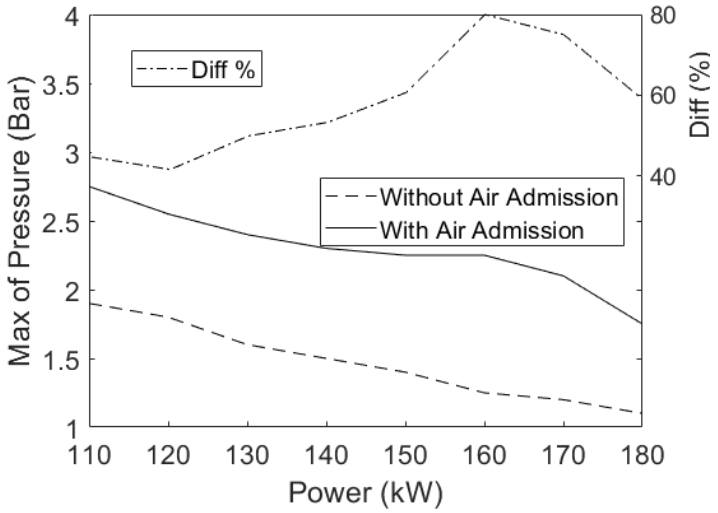
شکل ۱۰: تغییرات متوسط دامنه ارتعاشات تکیه گاه توربین به ازای توان‌گیری مختلف از نیروگاه در حالات بدون (--) و با کمک سامانه (__) هوادهی و همچنین درصد اختلاف تغییرات (-.)

با توجه به اهمیت مساله فشار جریان به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تاثیرگذار بر تشکل طناب گردابی، سنجش فشار جریان در محل وقوع این پدیده بسیار مهم است. اما به علت عدم دسترسی به میانه جریان خروجی از توربین این کار امکان پذیر نیست. بر اساس این نکته که به علت توزیع فشار سیال و پیوستگی جریان، فشار نقاط مختلف جریان از همدیگر تاثیر می‌پذیرند، در شکل ۹ الف و ب و همچنین شکل ۱۲، تغییرات فشار جریان در نزدیکی دریچه بازدید و در مجاورت دیواره آن نشان داده شده است. از مقایسه شکل‌های ۹ الف و ب و همچنین نتایج شکل ۱۲ به سادگی می‌توان افزایش متوسط فشار جریان در نقطه مذکور را در اثر هوادهی به جریان مشاهده کرد.



شکل ۱۱: تغییرات بیشینه شدت صوت ثبت شده در مجاورت دریچه بازدید توربین به ازای توان‌گیری مختلف از نیروگاه در حالت بدون (--) و با کمک (__) سامانه هوادهی و همچنین درصد اختلاف تغییرات (-.)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۱۲: تغییرات بیشینه دامنه فشار از مجاورت بدنه در آستانه خروجی جریان توربین به ازای توان‌گیری مختلف از نیروگاه در حالت بدون (--) با کمک سامانه هوادهی (__) و همچنین درصد اختلاف تغییرات (-.)

همچنین، از مقایسه شکل‌های ۹ الف و ب به کاهش محسوس دامنه نوسانات فشار جریان در همه توان‌های خروجی نیروگاه نیز می توان پی برد، طوری که این نوسانات از حدود ۱,۷ بار به حدود ۱ بار تقلیل یافته است. علاوه بر نتایج فوق باید به روند کاهشی اثرگذاری هوادهی بر تغییرات فشار جریان همگام با کاهش توان‌گیری از نیروگاه نیز اعتراف نمود. از شکل ۱۲ حداکثر تاثیرگذاری هوادهی بر فشار جریان، حدود ۸۰ درصد در توان خروجی ۱۶۰ مگاوات بوده که رفته رفته با کاهش توان خروجی نیروگاه این تاثیرگذاری نصف شده و به عدد ۴۰ درصد تقلیل می‌یابد.

جدول ۱: مقایسه تاثیرگذاری روش هوادهی بر درصد کاهش متغییرهای مختلف اندازه گیری شده در توان گیری های مختلف از نیروگاه

توان MW	تغییرات دامنه ارتعاشات تکیه گاه توربین ٪	تغییرات شدت صوت در جریان خروجی توربین ٪	تغییرات بیشینه دامنه فشار هیدرولیکی در جریان خروجی توربین ٪
۱۱۰	۲۰,۷۸	۵۶,۷۰	۴۴,۷۴
۱۲۰	۲۵,۷۶	۵۶,۷۰	۴۱,۶۷
۱۳۰	۳۲,۰۸	۵۵,۷۹	۵۰,۰۰
۱۴۰	۳۸,۰۷	۵۶,۵۲	۵۳,۳۳
۱۵۰	۴۷,۴۳	۵۷,۱۴	۶۰,۷۱
۱۶۰	۵۲,۵۳	۵۷,۷۸	۸۰,۰۰
۱۷۰	۵۶,۰۸	۵۷,۱۴	۷۵,۰۰
۱۸۰	۵۳,۹۵	۵۵,۵۶	۵۹,۰۹

جدول ۱ به منظور مقایسه میزان تاثیر فرآیند هوادهی در توان های مختلف توربین، بر پارامترهای اندازه‌گیری شده سه گانه در این تحقیق شامل، دامنه ارتعاشات، شدت صوت و بیشینه فشار هیدرولیکی، ارائه شده است. همانگونه که از این مقایسه بر می آید می توان دریافت که بیشترین حساسیت به اثرات هوادهی در توان های مختلف مربوط به اندازه گیری دامنه ارتعاشات یاتاقان توربین بوده و در مقابل کمترین حساسیت مربوط به شدت صوت خروجی جریان می باشد که تقریبا می توان گفت که

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

تغییرات چندانی در تمامی مقادیر ثبت شده در توان های مختلف نشان نمی دهد. در این میان تغییرات بیشینه دامنه فشار هیدرولیکی حساسیتی میانه نسبت به فرآیند هوادهی به جریان داشته و در عین حال روندی غیر یکنواخت را از توانهای پایین به بالا طی می‌کند.

۵. نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق مساله تاثیرات هوادهی به زیر رانر توربین فرانسیس 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 دقیقا در زیر مخروط تحتانی توربین و با فاصله معین استفاده گردید. ورودی هوای این مجموعه از هوای آزاد محیط نیروگاه تامین شد و این مسیر دارای شیرآلات لازم برای قطع یا وصل و همچنین یک طرفه کردن جریان هوا در مواقع لازم بود.

برای بررسی تاثیر هوادهی بر عملکرد نیروگاه در توانهای ۱۱۰، ۱۲۰ تا ۱۸۰ مگاوات که محدوده بحرانی توان‌گیری از نیروگاه بود، از سه روش مختلف برداشت اطلاعات استفاده شد که عبارتند از: الف) اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات یاتاقان توربین ب) اندازه‌گیری شدت صوت و ب) اندازگیری فشار هیدرولیکی نقاط مشخصی از جریان خروجی توربین. نتایج بدست آمده، در هر کدام از شرایط دامنه ارتعاشات یا شدت صوت و یا فشار جریان، 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

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 صوت و فشار جریان) کاهشی بوده و نشان از بهبود قابل توجه شرایط بحرانی توان‌گیری از نیروگاه است. این کاهش بخصوص در مورد شدت صوت بدست آمده بسیار چشم‌گیر بوده، طوری که در آن کاهشی 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. عموما تمامی شاخص‌های سه‌گانه ارتعاشی، صوتی و فشاری نشان از بهبود دارند. اما میزان این بهبود اساسا 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. درحالی که در مورد شدت صوت ثبت شده تغییرات کاهش متوسط این پارامتر بصورت تقریبا ثابت و حدود ۵۷ درصد بوده است. اما در مورد میزان بهبود شرایط فشار جریان باید گفت که این تغییرات بین ۴۰ تا ۸۰ درصد بوده که بازهم به مانند تغییرات دامنه ارتعاشات، به ترتیب از توان ۱۱۰ تا ۱۶۰ مگاوات اتفاق افتاده است. از آنجایی که شدت صوت اندازه‌گیری شده بدون تفکیک و فیلتر انجام شده است، می‌تواند تحت تاثیرات نویزو فرکانسهای صوتی تجهیزات اطراف و یا تحت تاثیر کاویتاسیون 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، تقریبا در همه محدوده‌های داده برداری و در هر سه شاخص ارتعاشی، صوتی و فشاری، کاهشی بوده 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 مختلف به کار رفته جهت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

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.

در یک جمع بندی عمومی از نتایج بدست امده در این تحقیق، می‌توان گفت که پروژه نصب سامانه هوادهی اجراشده در واحد ۳ نیروگاه سد مسجدسلیمان کاملا موفقیت آمیز بوده و اجرای این پروژه به بهره برداران این واحد نیروگاهی اجازه خواهد داد تا محدوده بحرانی ۱۱۰ مگاوات، یعنی حدود ۵۶ درصد زیر ظرفیت نامی تولید توان نیروگاه بدون بروز تخریب هیدرولیکی و یا تهدید خطرهای ناشی از تشدید روتور، بهره برداران این مجموعه ارزشمند به تولید توان ادامه دهند.

۶. تشکر و قدردانی

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 می نمایند. 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.

۷. مراجع

[1] Sun, L., Xu, H., Li, Ch., Guo, P. and Xu, Zh., "Unsteady Assessment and Alleviation of Inter-Blade Vortex in Francis Turbine", Appl. Energy, 358 (2024), 122616.

[2] Escaler, X., Egusquiza, E., Farhat, M., Avellan, F. and Coussirat, M., "Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines", Mech. Sys. and Signal Proc., 20 (2006), 983–1007.

[3] Kumar, P., Singal, S. K. and Gohil, P. P., "A Technical Review on Combined Effect of Cavitation and Silt Erosion on Francis Turbine", Ren. and Sus. Energy Rev., 190 (2024), 114096.

[4] Amini, A., Vagnoni, E., Favrel, A., Yamaishi, K., Müller, A. and Avellan, F., "Upper Part- Load Instability in a Reduced- Scale Francis Turbine: an Experimental Study", Exp. in Fluids, 64:110 (2023), 1-21.

[5] Zhang, T., He, G., Guang, W., Lu, J., Song, X., Zhu, D., Wang, Zh., "Investigation of the Internal Flow in a Francis Turbine for Comparing the Flow Noise of Different Operation Conditions", Water, 15 (2023), 3461.

[6] Mohammadi, M., Hajidavalloo, E. and Behbahani-Nejad, M.,"Investigation on Combined Air and Water Injection in Francis Turbine Draft Tube to Reduce Vortex Rope Effects", J. of Fluids Eng., 141 (2019), 051301-1.

[7] Sun, L., Liu, L., Xu, Zh. and Guo, P., "Numerical Investigation of No-Load Startup in a High-Head Francis Turbine: Insights into Flow Instabilities and Energy Dissipation", Phys. Fluids, 36 (2024), 035142.

[8] Shafa, M., Hajidavalloo, E., Riasi, A. and Sajadinia, A. H., "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 (2023), 117305.

[9] Kumar, S., Cervantes, M. J. and Gandhi, B. K., "Rotating Vortex Rope Formation and Mitigation in Draft Tube of Hydroturbines – A Review from Experimental Perspective", Ren. and Sus. Energy Rev., 136 (2021), 110354.

[10] Muntean, S., Susan-Resiga, R. F., Campian, V. C., Dumbrava, C. and Cuzmos, A., "In Situ Unsteady Pressure Measurements on the Draft Tube Cone of the Francis Turbine with Air Injection

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

over an Extended Operating Range", Conf. Paper in UPB Sci. Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, (2013).

[11] Kumara, S. and Gandhi, B. K., "Effect of Water Jet Area on Mitigation of Vortex Rope in a Francis Turbine", Phys. Fluids, 35 (2023), 105146.

[12] Xiao, Y., Wang, Z., Yan, Z. and Zhang, J., "Experimental and Numerical Analysis of Pressure Pulses Characteristics in a Francis Turbine with Partial load", IOP Conf. Series: Earth and Env. Sci., 12 (2010), 012023.

[13] Wang, L., Cui, J., Shu, L., Jiang, D., Xiang, Ch., Li, L. and Zhou, P., "Research on the Vortex Rope Control Techniques in Draft Tube of Francis Turbines", Energies, 15 (2022), 9280.

[14] Shtork, S., Suslov, D., Skripkin, S., Litvinov, I. and Gorelikov, E., "An Overview of Active Control Techniques for Vortex Rope Mitigation in Hydraulic Turbines", Energies, 16 (2023), 5131.

[15] Masoodi, F. A. and Goyal, R., "Efficacy of Ancillary Fluid Injection Technique for Mitigation of Vortex Rope in Hydraulic Turbines: A Review", Materials Today: Proc., 47 (2021), 3043–3053.

[16] Iliescu, M. S., Ciocan, G. D. and Avellan, F., "Analysis of the Cavitating Draft Tube Vortex in a Francis Turbine Using Particle Image Velocimetry Measurements in Two-Phase Flow", J. of Fluids Eng., 130 (2008), 021105-1.

[17] E. Ayli, "Cavitation in Hydraulic Turbines", Int. J. of Heat and Tech., 37:1 (2019), 334-344.

[18] Masoodi, F. A. and Goyal, R., "Aspects of Vortex Breakdown Phenomenon in Hydraulic Turbines", Exp. Thermal and Fluid Sci., 150 (2024), 111051.

[19] Khullar, S., Singh, K. M., Cervantes, M. J. and Gandhi, B. K., "Influence of Runner Cone Profile and Axial Water Jet Injection in a Low Head Francis Turbine at Part Load", Sus. Energy Tech. and Assessments, 50 (2022), 101810.

[20] Pang, Sh., Zhu, B., Shen, Y. and Chen, Zh., "Study on Suppression of Cavitating Vortex Rope on Pump-Turbines by J-Groove", Appl. Energy, 360 (2024), 122843.

[21] Kim, S.-J., Choi, Y.-S., Cho, Y., Choi, J.-W., Hyun, J.-J., Joo, W.-G. and Kim, J.-H., "Effect of Fins on the Internal Flow Characteristics in the Draft Tube of a Francis Turbine Model", Energies, 13 (2020), 2806.

[22] Sun, L., Li, Y., Guo, P. and Xu, Zh., "Numerical Investigation of Air Admission Influence on the Precessing Vortex Rope in a Francis Turbine", Eng. App. of Comp. Fluid mech., 17:1 (2023), 2164619.

[23] Unterluggauer, J., Maly, A. and Doujak, E., "Investigation on the Impact of Air Admission in a Prototype Francis Turbine at Low-Load Operation", Energies, 12 (2019), 2893.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

Controlling the vortex rope phenomenon with the help of installing an air admission system at the turbine outlet flow of Masjedsoleyman dam power plant

Ghasem Khajeh[1], Reza Poultangari [2*], Afshin Gholipur [3]

[1] PhD student, Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Branch, Islamic Azad University, Aligudarz, Iran.
[2*] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.
[3] MSc, Production and Operation Management Company, Masjedsoleyman Power Plant Dam, Masjedsoleyman, Iran

Received: June 2024 Accepted: September 2024

Abstract

In this research, the effects of direct and free air admission in the Francis turbine outlet flow region of the third unit of Masjedsoleyman Dam hydroelectric power plant with a nominal capacity of 250 MW of each unit in mid-load and low-load conditions have been investigated. This action is carried out in order to reduce or eliminate the destructive effect of the vortex rope, which appeared in the conditions of power generation, in the middle or low water levels of the dam lake. The importance of this issue lies in the fact that if the plan is successful, it will allow the related hydroelectric power plant complex to operate the power plant in a wider range of its rated power. In this research, based on the obtained results from literature, an air admission system is used with two air inlet paths with an initial diameter of 4 inches and a conversion diameter of 6 inches where connected to an open top and bottom vertical pipe with a length of 1200 mm, with a diameter of 8 inches.This vetical pipe has 60 number of holes with a diameter of 50 mm, in a position exactly under the lower cone of the turbine and at a distance of 54 cm from it. The air intake of this system was supplied from the free air of the power plant environment, and this air path had the necessary valves to cut off or connect or one-way the air flow when necessary. Due to the presence of strong eddy currents in the installation site of the air admission system, two 6-inch pipes were used in addition to the air transmission pipes of the system, in order to in order to strengthen this system as best as possible. In order to evaluate the effect of air admission, three different methods were used to collect power plant information, which included measuring the amplitude of turbine vibrations, the sound intensity from the turbine body, and finally the hydraulic pressure of the turbine output flow. The obtained results were measured in a stepped manner in power plant loads of 110 to 180 MW. The obtained results show the complete success of the project in all three measured indicators.

Keywords: Vortex rope, Francis turbine, air admission system, vibrations, sound intensity, hydraulic pressure.

.

*corresponding author: reza.poultangari@gmail.com

Cite this article as: Ghasem Khajeh, Reza Poultangari, Afshin Gholipur. Controlling the vortex rope phenomenon with the help of installing an air admission system at the turbine outlet flow of Masjedsoleyman dam power plant. Journal of Energy Conversion, 2024, 11(2), 103-118.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]