



رصد فناوری توربین‌های آبی با تمرکز بر توربین فرانسسیس

علی صالحی شهبستری^{1*}

1- استادیار، گروه پژوهشی تجهیزات دوار مکانیکی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
* تهران، صندوق پستی 14665517، ashabestari@nri.ac.ir

چکیده

در حال حاضر نیروگاه‌های برق آبی یکی از به صرفه‌ترین روش‌های تولید برق بوده و بیشترین سهم را در تولید جهانی برق تجدیدپذیر دارند. به دلیل سابقه طولانی استفاده از توربین آبی در تولید برق، حوزه‌های فناوریانه مرتبط با آن در سطح بالایی از بلوغ قرار دارند. ولی با این حال همچنان تحقیقات متعددی به منظور افزایش راندمان، افزایش انعطاف پذیری در عملکرد، افزایش عمر و کاهش هزینه‌های نصب، بهره‌برداری و نگهداری توربین‌های آبی در جریان است. در این پژوهش مقالات و اختراعات مرتبط با فناوری توربین‌های آبی پیمایش شده و بر اساس آن حوزه‌های فناوریانه‌ای که در پژوهش‌های اخیر مورد تمرکز واقع شده‌اند، شناسایی گردیده است. با توجه به کاربرد گسترده توربین فرانسسیس در تولید برق آبی به ویژه در کشور ایران، پیمایش صورت گرفته عمدتاً مربوط به این نوع توربین می‌باشد. بر این اساس حوزه‌های فناوریانه توربین فرانسسیس شامل مباحث مرتبط با گردابه و جریان در لوله رانش، پرها، کاویتاسیون، محفظه حلزونی، دینامیک سیالات محاسباتی و ساخت و تولید می‌باشد. همچنین فناوری‌های مرتبط با افزایش محدوده عملکرد توربین آبی و نیز دیجیتالی‌سازی عملکرد توربین آبی مهمترین فناوری‌های در حال رشد در رابطه با برق آبی هستند.

کلیدواژه‌گان: رصد فناوری، توربین آبی، توربین فرانسسیس، حوزه‌های فناوریانه

Hydro-turbine technology observation with focus on Francis turbine

Ali Salehi-Shabestari^{1*}

1- Assistant Professor, Mechanical Rotary Equipment Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

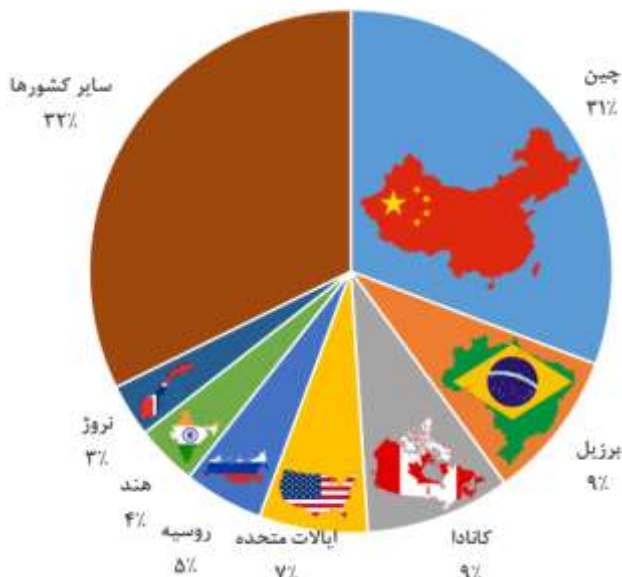
* P.O.B. 14665517 Tehran, Iran, ashabestari@nri.ac.ir

Received: 3 March 2022 Accepted: 10 August 2023

Abstract

Hydropower is one of the most cost-effective methods of generating electricity and have the largest share of global renewable electricity generation. Due to the long history of using Hydro-turbines in power generation, the related technologies are at a high level of maturity. However, still many researches are being conducted on this topic to increase efficiency, increase performance flexibility, increase life, and reduce the cost of installing, operating, and maintaining hydro-turbines. In the present work, research papers and inventions related to hydro-turbine technology have been surveyed and based on that, the technical fields that have been focused in recent researches have been identified. Due to the widespread use of Francis turbines in hydropower generation, especially in Iran, the survey is mainly focused to this type of turbine. Accordingly, the most cited technical domains of the Francis turbine include issues related to vortex and flow in draft tube, blades, cavitation, spiral case, computational fluid dynamics, and manufacturing. Also, technologies related to increasing the operating range of hydro-turbines as well as digitalization of hydro-turbine performance are the most important growing technologies related to hydropower generation.

Keywords: Technology observation, Hydroturbine, Francis Trubine, Technical domains



شکل 1 سهم کشورهای مختلف از تولید انرژی برق آبی در سال 2020 میلادی [2]

با توجه به اهمیت و نقش انرژی برق آبی به ویژه در ایران، در پژوهش حاضر فناوری‌های روز توربین آبی مورد بررسی واقع گشت. محدوده کاربری در نظر گرفته شده برای توربین آبی، شامل نیروگاه‌های برق آبی متوسط و بزرگ (با ظرفیت بیش از 10 مگاوات) و ارتفاع ریزش متوسط و زیاد (بیش از 25 متر) است، لذا رصد فناوری به طور خاص بر توربین‌های فرانسسیس² متمرکز خواهد بود.

2- جایگاه توربین فرانسسیس در میان انواع توربین‌های آبی

توربین‌های آبی به دو دسته اصلی ضربه‌ای و عکس العملی تقسیم می‌شوند: در توربین‌های ضربه‌ای یا بدون عکس العمل، فشار استاتیک در داخل چرخ³ ثابت بوده و این چرخ معمولاً در فشار اتمسفر قرار دارد. کل ارتفاع ریزش آب توسط یک یا چند نازل (هدایت کننده) به سرعت تبدیل گشته و برخورد آب با سرعت بالا به چرخ موجب دوران آن می‌گردد. توربین پلتن⁴ یکی از نمونه‌های پرکاربرد این نوع توربین‌ها است.

در توربین‌های عکس العملی فشار استاتیک آب در داخل چرخ ثابت نبوده و تنها بخشی از ارتفاع (هد) آن قبل از ورود به چرخ تبدیل به سرعت می‌گردد. فشار و سرعت آب در حین عبور از چرخ به تدریج کاهش یافته و در نتیجه انرژی موجود در آب به چرخ توربین واگذار می‌گردد. یک محفظه حلزونی و معمولاً دو هدایت کننده با پره‌های ثابت و متحرک⁵ وظیفه رساندن آب را به چرخ توربین عهده‌دار می‌باشند. چرخ همواره تحت فشار استاتیک سیال بین هدایت کننده و لوله خروجی آب کار می‌کند. از نمونه‌های پرکاربرد توربین‌های عکس العملی می‌توان به توربین‌های فرانسسیس و کاپلان⁶ اشاره نمود [5].

توربین‌های آبی معمولاً در محدوده‌ای از دی و هد آب راندمان و مشخصات هیدرولیکی مناسبی را ارائه می‌کنند. در شکل زیر محدوده عملکرد توربین‌های مختلف بر حسب سرعت مخصوص توربین و هد آب نشان داده شده است. به

1- مقدمه

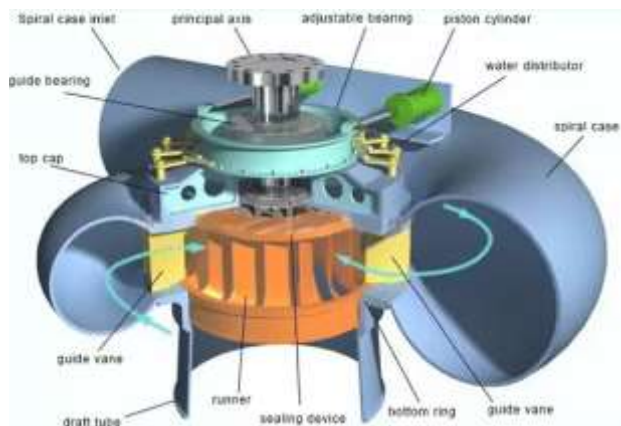
استفاده از نیروی آب برای بشریت به عنوان یک تحول بزرگ فناورانه محسوب می‌شد. تاریخچه استفاده از تأسیسات آبی برای آبیاری مزارع به هزاره چهارم پیش از میلاد در خاورمیانه و شرق آسیا بازمی‌گردد. تا پیش از انقلاب صنعتی از چرخ‌های آبی در فعالیت‌های مختلفی از جمله آسیا کردن غلات، برش، چکش کاری فلزات و غیره استفاده می‌شد. تولید برق از انرژی آبی به سال 1880 میلادی بازمی‌گردد. در این سال یک توربین آبی 7 کیلوواتی با هد آب 8/8 متر در انگلستان مورد بهره‌برداری قرار گرفت. از این تاریخ به بعد، نیروگاه‌های برق آبی به سرعت توسعه یافتند که در آن‌ها از انواع توربین‌های آبی استفاده می‌شد [1].

توربین‌های آبی انرژی آب را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند که به عنوان محرک اولیه در ژنراتورها به منظور تولید انرژی برق مورد استفاده قرار می‌گیرند. توربین‌های آبی دارای راندمان و قدرت تولیدی بالایی در هر واحد هستند. از بعد دیگر به علت مشکلات و مسائل زیست محیطی و ارزش مواد سوختی، امروزه در اغلب کشورهای جهان سعی می‌شود از حداکثر ممکن انرژی آب جهت تولید برق استفاده گردد. مهمترین اشکال نیروگاه‌های آبی در مقایسه با نیروگاه‌های بخاری و گازی، بالا بودن سرمایه اولیه و مدت زمان زیاد برای اجرای پروژه می‌باشد. اما در عوض عمر این نیروگاه‌ها طولانی بوده و نگهداری آن‌ها نیز کم هزینه می‌باشد. در حال حاضر نیروگاه‌های برق آبی یکی از به صرفه‌ترین روش‌های تولید برق هستند و در جاهایی که امکان نصب داشته باشند مرجح می‌باشند. به عنوان مثال در سال 2020 در کشور نروژ بیش از 91 درصد از برق مورد نیاز توسط نیروگاه‌های برق آبی تولید شد [2]. بزرگترین نیروگاه برق آبی جهان نیز نیروگاه سد سه دره¹ بر روی رود یانگ‌تسه در چین است که ظرفیت آن 22/5 گیگاوات می‌باشد. این نیروگاه سالانه بین 75 تا 115 تراوات ساعت برق تولید می‌کند [3].

طبق آمار سال 2020 میلادی آژانس بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر، ظرفیت نصب شده برق آبی در جهان 1332 گیگاوات است [4]. این نیروگاه‌ها با تولید 4297 تراوات ساعت برق، 16 درصد کل تولید برق و 58 درصد کل تولید برق تجدیدپذیر دنیا در سال 2020 میلادی را به خود اختصاص دادند. مطابق شکل 1، کشورهای چین، برزیل، کانادا، ایالات متحده، روسیه، هند و نروژ بزرگترین تولیدکنندگان انرژی برق آبی در سال 2020 میلادی بودند [2]. در ایران نیز طبق آمار سال 2020، ظرفیت نصب شده برق آبی کشور 13233 مگاوات بوده است [4] که با تولید حدود 21/2 تراوات ساعت از 331/6 تراوات ساعت برق تولیدی در این سال، سهم 6/4 درصدی در تولید برق کشور داشتند [2]. ایران دارای 14 نیروگاه برق آبی بزرگ با ظرفیت بیش از 100 مگاوات و 13 نیروگاه برق آبی متوسط با ظرفیت 10 تا 100 مگاوات است. اکثریت قریب به اتفاق توربین‌های آبی نیروگاه‌های سایز بزرگ و متوسط ایران (غیر از نیروگاه سد ارس) از نوع فرانسسیس عمودی هستند. گفتنی است که حداقل دو سوم از ظرفیت نصب شده برق آبی کشور در استان خوزستان واقع است [2،4].

4. Pelton
5. Wicket gates
6. Kaplan

1. Three Gorges Dam
2. Francis
3. Runner

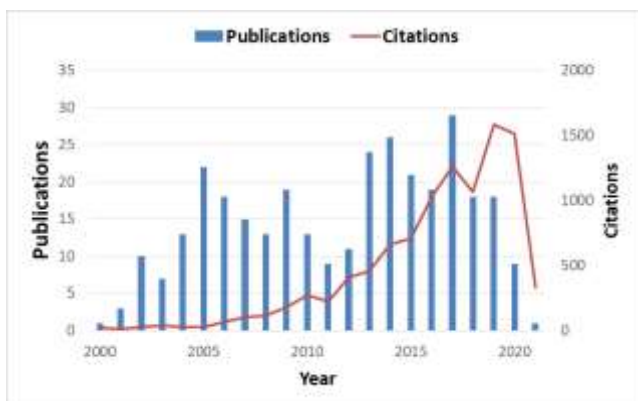


شکل 3 نمای توربین فرانسسیس و اجزای آن [7]

3- رصد فناوری

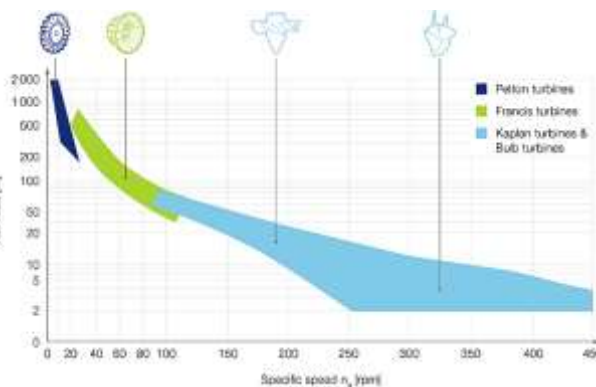
در این بخش از روش اکتشافی به منظور رصد فناوری توربین آبی (فرانسسیس) استفاده می‌شود. برای این منظور از تکنیک پیمایش محیطی شامل پیمایش مقالات و اختراعات ثبت شده در این زمینه استفاده شده است [8].

به منظور پیمایش مقالات منتشر شده طی سال‌های 2000 تا 2021 میلادی در حوزه مورد نظر، پایگاه داده مایکروسافت آکادمیک¹ مورد بررسی قرار گرفت. این پایگاه داده به این علت انتخاب شد که یک موتور جستجوی وب رایگان برای انتشارات علمی است و در سال 2016 مجدداً راه اندازی شده و از ساختار داده و موتور جستجوی کاملاً جدیدی با استفاده از فناوری های جستجوی معنایی (و نه صرفاً مبتنی بر کلمات کلیدی) برخوردار است. به علاوه با جستجوی یک موضوع در این پایگاه داده، می‌توان به طیف وسیعی از اطلاعات شامل سازمان‌ها و مؤسسات مرتبط، پژوهشگران و ... نیز دسترسی پیدا کرد. طبق بررسی انجام شده با استفاده از مایکروسافت آکادمیک، 746 عنوان مقاله ژورنالی و 44 عنوان مقاله کنفرانسی در رابطه با توربین فرانسسیس در بازه زمانی ذکر شده به چاپ رسیده است [9].



شکل 4 روند تغییرات تعداد انتشارات و تعداد ارجاعات در خصوص توربین فرانسسیس [9]

عنوان مثال توربین پلتن برای هد بیش از 400 متر، فرانسسیس برای هد بین 50 تا 500 متر و کاپلان برای هد زیر 50 متر استفاده می‌شوند. توربین‌های جریان محوری مانند کاپلان برای سرعت‌های مخصوص بالا، توربین‌های جریان مختلط مانند فرانسسیس برای سرعت‌های مخصوص متوسط و توربین‌های ضربه-ای مانند پلتن برای سرعت‌های مخصوص کم مورد استفاده قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که مقادیر شکل زیر تقریبی است و در مراجع مختلف این محدوده‌ها یکسان نیستند.



شکل 2 محدوده کارکرد توربین های آبی بر اساس سرعت مخصوص و هد [6]

همان طور که اشاره شد توربین فرانسسیس برای هد متوسط آب به کار می‌رود. این توربین شامل بخش‌های اصلی هدایت کننده (که خود شامل سه قسمت است: ظرف حلزونی ورودی، هدایت کننده با پره ثابت و هدایت کننده با پره‌های متحرک)، چرخ و لوله خروجی است. آب ابتدا وارد ظرف حلزونی می‌شود. وظیفه ظرف حلزونی تقسیم آب به دور تا دور چرخ است به طوری که سرعت آب در حلزونی با کم کردن تدریجی سطح مقطع آن ثابت بماند. سپس آب وارد هدایت کننده با پره‌های ثابت می‌شود. وظیفه این هدایت کننده تغییر جهت سیال و هدایت آن تحت زاویه معینی به طرف چرخ می‌باشد. آب بعد از عبور از این قسمت وارد هدایت کننده با پره‌های متحرک می‌گردد. وظیفه اصلی این هدایت کننده تأمین جهت سرعت مناسب آب به ازای تغییرات دبی برای ورود به پره‌های چرخ می‌باشد تا تلفات شوک به حداقل ممکن برسد و راندمان توربین در دبی‌های مختلف تا حد امکان حفظ گردد. ضمن این که با تغییر مقدار دبی ورودی، توان خروجی توربین را نیز می‌توان تغییر داد. آب سپس وارد چرخ می‌شود و بعد از واگذاری قسمت اعظم انرژی پتانسیل و جنبشی خود به چرخ از طریق لوله خروجی به خارج از توربین هدایت می‌گردد. چرخ توربین فرانسسیس می‌تواند به صورت جریان مختلط و یا شعاعی باشد. هر چقدر سرعت مخصوص بیشتر شود شکل چرخ به جریان شعاعی نزدیکتر می‌شود. تعداد پره‌های چرخ بین 11 تا 17 عدد انتخاب می‌گردد [5].

پره‌ها نمی‌دهند. سیستم پیش‌بینی تحلیلی به عنوان یک ابزار کمکی برای پیش‌بینی ظهور و رشد ترک‌های عملیاتی خطرناک پیشنهاد شده است. این سیستم یک الگوریتم تحلیلی را بر اساس ارزیابی استحکام خستگی پره‌های توربین آبی تحت شرایط عملیاتی در حال تغییر مکرر پیاده‌سازی می‌کند و امکان جمع‌بندی آسیب‌های ناشی از بارهای خارجی مختلف و در بازه‌های زمانی مختلف را فراهم می‌کند. اطلاعات اولیه برای این سیستم پیش‌بینی، اطلاعات مربوط به زمان کارکرد در هر حالت عملیاتی و پارامترهای رژیم مورد انتظار برای آینده است و خروجی سیستم مقدار عمر باقیمانده است [14].

بر اساس داده‌های به دست آمده از دینامیک سیالات محاسباتی و تحلیل اجزای محدود به منظور شناسایی تنش‌های وارده بر روی چرخ و پره‌های توربین فرانسسیس مشخص شده است که تنش‌های موجود در لبه انتهایی پره در نزدیکی تاج پره، می‌توانند به وضعیت بحرانی دچار شوند. نواحی پر تنش در حد فاصل بین دو پره و در قسمت بیرونی تاج قرار دارند که سبب ایجاد ترک‌های خستگی در این ناحیه می‌شود [15].

3-3- کاویتاسیون

توربین‌های عکس‌العملی از لحاظ ساختاری بسته بوده و تحت فشار متغیر کار می‌کنند لذا بیشتر در معرض کاویتاسیون قرار دارند. به طوری که ناحیه‌ای در محدوده عملیاتی این توربین‌ها، به خصوص در مورد توربین فرانسسیس، تحت تأثیر کاویتاسیون قرار گرفته و به عنوان منطقه ممنوع در نظر گرفته می‌شود. سایش توربین‌ها در هنگام کاویتاسیون از عوامل مهم افت کارایی آن‌ها است. طبق معادله برنولی، اگر سرعت جریان افزایش یابد، فشار کاهش می‌یابد. هرگاه فشار در هر قسمت توربین به زیر فشار بخار کاهش یابد، مایع می‌جوشد و تعداد زیادی حباب کوچک بخار تشکیل می‌شود. این حباب‌ها که عمدتاً به دلیل فشار کم تشکیل می‌شوند توسط جریان به مناطق فشار بالاتر منتقل می‌شوند که در آن نواحی بخارات متراکم شده و حباب‌ها ناگهان فرو می‌ریزند. این امر منجر به تشکیل یک حفره شده و مایع اطراف برای پر کردن آن هجوم می‌آورد. جریان مایع از جهات مختلف در مرکز حفره به یکدیگر برخورد کرده و فشار محلی را بسیار بالا می‌برد که اندازه آن ممکن است تا 7000 اتمسفر نیز باشد. تشکیل حفره و فشار زیاد هزاران بار در ثانیه تکرار می‌شود. این امر باعث ایجاد حفره روی سطح فلزی پره‌های چرخ یا لوله رانش می‌شود. پس از آن ماده به دلیل خستگی و یا حتی خوردگی دچار شکست می‌گردد. بعضی از قسمت‌های توربین مانند پره‌های چرخ ممکن است طی این فرآیند کاملاً شکافته شود. این پدیده که خود را به صورت سوراخ شدن سطوح فلزی قطعات توربین نشان می‌دهد به عنوان کاویتاسیون شناخته می‌شود [16].

اسکارلا و همکاران آزمایش‌های متعددی را به منظور تشخیص کاویتاسیون در هیدروتوربین‌ها انجام دادند. روش تشخیص آن‌ها مبتنی بر تحلیل ارتعاشات سازه، انتشار صوت و فشار هیدرودینامیک در چرخ بود. در شکل 5 انواع کاویتاسیون‌های مشاهده شده در آزمایش‌های مذکور بر روی توربین فرانسسیس نشان داده شده است [17]. جلوگیری از ایجاد کاویتاسیون در توربین‌های آبی دشوار است و نمی‌توان به طور کامل از آن جلوگیری کرد. اما آثار و تبعات اقتصادی آن می‌تواند تا سطح قابل قبولی کاهش یابد. بسیاری از محققان از طریق مطالعات تجربی و تحلیلی، روند کاویتاسیون را در توربین‌های آبی بررسی کرده‌اند. برخی از محققان گزارش کرده‌اند که علی‌رغم تغییرات طراحی در

با استناد به نتایج جستجوی صورت گرفته در مایکروسافت آکادمیک، موضوعات فناورانه‌ای که بیشترین تعداد مقالات این حوزه در مورد آن‌ها به چاپ رسیده است شامل لوله رانش¹، گردابه، کاویتاسیون و دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد [9].

به منظور پیمایش اختراعات به ثبت رسیده در حوزه توربین فرانسسیس به پایگاه داده پتنت اینسپایریشن² مراجعه شد که اطلاعات مختلفی درباره موضوع جستجو شامل کشورها و شرکت‌های ثبت‌کننده اختراع، مخترعین، دسته‌بندی موضوعی اختراع و ... ارائه می‌نماید. با استناد به این پایگاه داده، تعداد اختراعات ثبت شده در بازه زمانی 2000 تا 2021 میلادی در خصوص توربین فرانسسیس 319 عنوان می‌باشد [10]. بر اساس جستجوی صورت گرفته، بیشترین ثبت اختراع در این زمینه به ترتیب مربوط به کشورهای ژاپن، کانادا، آلمان، فرانسه و سوئیس می‌باشد. با استناد به پتنت اینسپایریشن، موضوعات فناورانه‌ای که بیشترین تعداد ثبت اختراعات این حوزه در مورد آن‌ها بوده شامل کاویتاسیون، پره‌ها، ساخت و تولید و محفظه حلزونی می‌باشد. در ادامه حوزه‌های فناورانه به دست آمده از پیمایش مقالات و اختراعات مورد بررسی قرار گرفته‌اند [10].

1-3- گردابه و جریان در لوله رانش

رفتار جریان چرخشی در کاربردهای مختلف فنی همواره یکی از موضوعات تحقیق بوده است. معمولاً آثار چرخش جریان یا به عنوان نتیجه مطلوب طراحی یا پدیده‌ای غیرقابل اجتناب و عارضه جانبی محسوب می‌شود [11]. با این حال، لوله رانش توربین آبی از یک طرف از چرخش جریان در خروجی چرخ سود می‌برد چرا که جدا شدن جریان در مخروط چرخ کاهش می‌یابد، اما از طرف دیگر ناپایداری جریان در لوله رانش منجر به نوسان فشار می‌گردد.

در لوله رانش با کاهش سرعت جریان، انرژی جنبشی به فشار تبدیل می‌شود. هنگام نوسازی نیروگاه‌های موجود، عمدتاً فقط چرخ و پره‌های هدایت‌کننده اصلاح شده و به دلیل مسائل اقتصادی و ایمنی، محفظه ماریچ و لوله رانش به ندرت بازطراحی می‌شوند. حتی اگر این اجزا عملکرد نامطلوبی از خود نشان دهند. با این حال، نصب یک چرخ ارتقا یافته نیازمند پیش‌بینی قابل اطمینانی از جریان در لوله رانش است. این امر منجر به تعریف و اجرای پروژه بررسی جریان در لوله رانش توربین فرانسسیس موسوم به پروژه فلیندنت³ گردید. هدف اصلی این پروژه بررسی جریان در لوله رانش به منظور درک بهتر فیزیک این نوع جریان و نیز جمع‌آوری بانک اطلاعاتی از داده‌های تجربی در محدوده وسیعی از نقاط کاری توربین بود تا به واسطه آن اطلاعات لازم برای ارزیابی نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی لوله رانش ایجاد شود [12]. شبیه‌سازی‌های عددی که پس از پروژه فلیندنت انجام شد حاکی از این بود که هنگام طراحی و بهینه‌سازی توربین آبی، می‌بایست از نرسیدن پارامتر چرخش در جریان گردابه‌ای لوله رانش به حد بحرانی اطمینان حاصل نمود. در غیر این صورت فشار در لوله رانش دچار افت ناگهانی شده و راندمان توربین آبی کاهش می‌یابد [13].

2-3- پره‌ها

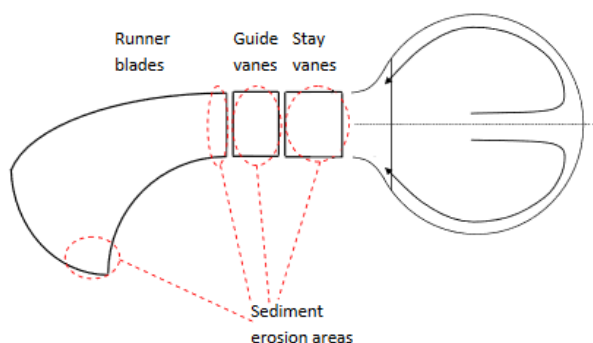
در سال‌های اخیر، توربین‌های آبی به طور تدریجی در حالت‌های کارکرد خارج از طراحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که باعث افزایش بار و تنش در پره‌ها، تسریع ظهور و رشد عیوب، خرابی‌های زود هنگام و در نهایت منجر به حوادث جدی با تلفات زیاد می‌شود. سیستم‌های تشخیصی مورد استفاده در حال حاضر برای توربین‌های آبی اغلب اجازه ردیابی ترک‌های خستگی را در

3. FLOW Investigation in a Francis Draft Tube (FLINDT)

1. Draft tube
2. Patent Inspiration

هدف از بکارگیری محفظه حلزونی، توزیع جریان به طور مساوی در اطراف چرخ است. بنابراین سطح مقطع این محفظه می‌بایست در پایین دست کاهش یابد. چرا که بخشی از جریان آب با گذر از پره‌های هدایت کننده از محفظه حلزونی خارج می‌شود. محفظه حلزونی از چند بخش، که تعداد آن توسط طراح تعیین می‌شود، ساخته شده است. تعداد زیاد بخش‌ها باعث کاهش بهتر و صحیح جریان از طریق محفظه حلزونی می‌شود اما به دلیل افزایش تعداد اتصالات جوشکاری، ساخت آن نیز گران‌تر است.

در طراحی محفظه حلزونی جلوگیری از ایجاد جریان ثانویه یا کاهش آن بسیار اهمیت دارد. چرا که فرسایش در پره‌های هدایت کننده ثابت ناشی از جریان ثانویه در محفظه حلزونی است که باعث تغییر زاویه جریان می‌گردد. فرسایش در مجاورت پوشش بالا و پایین توربین بیشتر از بقیه نقاط است [22].



شکل 6 محل اصلی وقوع سایش ناشی از رسوب که در اثر جریان ثانویه در محفظه حلزونی (پیکان‌های سمت راست) تشدید می‌شوند [22].

5-3- دینامیک سیالات محاسباتی

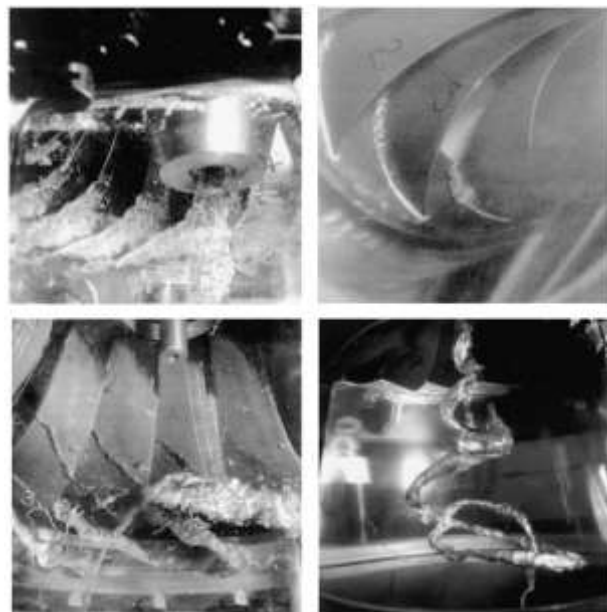
توربین‌های آبی معمولاً برای کار در بهترین نقطه کارایی طراحی می‌شوند، اما روند فعلی عملکرد نیروگاه‌ها اجازه نمی‌دهد توربین‌ها به طور انحصاری در آن نقطه کار کنند. لذا توربین‌ها مجبور به کار در شرایط دور از طراحی هستند. در این شرایط، توربین‌های آبی دچار ناپایداری جریان می‌شوند که به طور قابل توجهی بر پایداری دینامیکی آن‌ها اثر منفی می‌گذارد. دینامیک سیالات محاسباتی نقش مهمی در بررسی پیامدهای این امر و بهبود طراحی داشته است [23].

در یک دهه گذشته، شاهد رشد چشمگیری در استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی بوده‌ایم به طوری که طی این ده سال رویکردهای مختلف مدل‌سازی جریان، مدل‌سازی توربولانس و روش‌های عددی استفاده شده است. این که کدام یک از این رویکردها استفاده شود به میدان جریان، دقت مورد انتظار از نتایج، قدرت محاسباتی و زمان بستگی دارد. در این بین دسترسی به قدرت محاسباتی لازم برای شبیه‌سازی توربین‌های هیدرولیکی همواره چالش اصلی بوده است [24].

در حال حاضر سه روش برای مدل‌سازی توربین‌های آبی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به کار می‌رود. روش اول مدل‌سازی کامل توربین است که از آن به منظور مطالعه عملکرد کلی و برهمکنش میان توزیع کننده، چرخ و لوله رانش و نیز ارتقای طراحی استفاده می‌شود. روش دوم مدل‌سازی

اجزای توربین و استفاده از مواد و پوشش‌های مختلف در پره‌های توربین، پیشرفت در جلوگیری از وقوع کاویتاسیون در بیشتر موارد چندان قابل توجه نیست [18].

بنابراین، مطالعات تجربی و نظری بیشتری برای بررسی تأثیر کاویتاسیون در توربین آبی مورد نیاز است. تجزیه و تحلیل کاویتاسیون در توربین‌های عکس‌العملی با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، می‌تواند یک راه حل مقرون به صرفه باشد [19]. در این زمینه در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. گو و همکاران با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه بزرگ¹ و مدل‌های انتقال جرم ارائه شده برای رشد یا فروریختن حباب در حین کاویتاسیون، به این نتیجه رسیدند که زاویه برخورد منفی در ورودی چرخ توربین (که در شرایط کارکرد در بار کم رخ می‌دهد) سبب ایجاد سه نوع مختلف گردابه در فضای بین پره‌ها شده که منجر به ایجاد کاویتاسیون در موقعیت‌های مختلف چرخ توربین می‌گردد [20]. نتایج پژوهش سان و همکاران در رابطه با شبیه‌سازی عددی کاویتاسیون بین پره‌ای حاکی از این بود که محل ایجاد کاویتاسیون بین پره‌ها، نسبت به سرعت دورانی حساس‌تر است تا میزان بازشدگی پره‌های هدایت کننده. همچنین تشکیل کاویتاسیون بین پره‌ها به جدایی جریان در مجاورت ریشه پره مرتبط است و نوسانات فشار ناشی از کاویتاسیون بین پره‌ها به طور مستقیم با افزایش حجم بخار در چرخ مرتبط بوده و دارای دامنه بزرگ و فرکانس پایین می‌باشد [21].



شکل 5 انواع کاویتاسیون در توربین فرانسسیس، بالا سمت راست: کاویتاسیون روی لبه حمله پره‌ها، بالا سمت چپ: کاویتاسیون با حباب‌های در حال جابجایی، پایین سمت راست: کاویتاسیون به صورت جریان چرخشی در لوله رانش، پایین سمت چپ: کاویتاسیون به صورت گردابه در بین پره‌ها [17]

4-3- محفظه حلزونی

¹ Large Eddy Simulation

دوطرفه را در نظر بگیرد. این امر مطالعه جریان را همراه با رفتار مکانیکی اجزای توربین تسهیل می‌کند. از آن جا که اندازه گیری‌های مکرر روی نمونه های اولیه یا مدل توربین مقرون به صرفه نیستند تحلیل‌های کامل دینامیک سیالات محاسباتی ضروری است. بنابراین، یک تجزیه و تحلیل قابل اعتماد مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به توسعه توربین‌های آبی کمک کند [29].

6-3- ساخت و تولید

عمده‌ترین روش‌های تولیدی که برای ساخت توربین‌های آبی استفاده می‌شود شامل ریخته‌گری دقیق، ریخته‌گری، ماشینکاری کامپیوتری و آهنگری است. در حال حاضر، بیشتر تولید کنندگان بزرگ توربین در سراسر دنیا از فرایند ماشینکاری کامپیوتری برای تولید توربین‌های آبی استفاده می‌کنند. این فرایند شامل فرز کامپیوتری، سنگ‌زنی، پرداخت و بالانس استاتیکی و دینامیکی توربین‌ها است. ماشینکاری کامپیوتری یا به طور همزمان روی تمام بدنه چرخ انجام می‌شود و یا پره‌ها به صورت مستقل ساخته شده و به همراه سایر اجزای چرخ جوش داده می‌شوند. اجزای باقی مانده مانند محفظه حلزونی، پره‌های هدایت کننده و لوله رانش توسط سایر فرایندهای تولید مانند تراشکاری، آهنگری، نورد، خم‌کاری و غیره تولید شده و اتصالات نیز با جوشکاری انجام می‌گردد.

هزینه ساخت توربین آبی به پارامترهایی مانند ارتفاع ریزش آب و دبی وابسته است. از آنجا که هزینه و اندازه توربین به مشخصات پارامترهای موجود در نیروگاه‌های آبی بستگی دارد. تولید این توربین‌ها نیز باید بر اساس این پارامترها انجام شود. لذا هر روش ساخت ممکن را می‌توان در نظر گرفت و پارامترهای مختلف مورد نیاز از جمله پرداخت سطح، هزینه ابزار، هزینه هر توربین و اندازه ساخت را باید با خروجی مورد نظر مقایسه کرد تا بهترین روش ممکن را برای تولید انتخاب نمود.

نیروگاه آبی بزرگتر به معنای توربین‌های آبی بزرگتر است. ساخت توربین‌های آبی در اندازه‌های بزرگتر از نظر مقیاس و پیچیدگی برای تولیدکنندگان یک چالش است. تولید توربین‌های آبی با استفاده از فناوری ریخته‌گری می‌تواند گزینه مناسبی تلقی شود. توسعه شبیه‌سازی ریخته‌گری و نیز نمونه‌سازی سریع مهمترین مزیت این فناوری بوده است. البته تولید با این فناوری می‌تواند منجر به نقص‌های مختلفی گردد اما برنامه‌ریزی صحیح فرایند و شبیه‌سازی رایانه‌ای این فرایند می‌تواند به بهبود کیفیت محصول کمک کند. با وجود تمام این پیشرفت‌ها، در ساخت توربین‌های آبی با استفاده از فناوری ریخته‌گری می‌بایست در زمینه‌هایی مانند خنک‌کاری کارآمد، طراحی بهینه ریزرها و استفاده از قالب ماسه‌ای بهینه بهبود حاصل شود [30].

4- فناوری‌های در حال رشد

بیش از یک قرن است که از انرژی آبی به منظور تولید برق استفاده می‌شود. از دوران باستان نیز از آن در قالب آسیاب برای تأمین انرژی مکانیکی استفاده می‌شد. لذا در مقایسه با سایر منابع انرژی پاک، فناوری برق آبی در سطح بالایی از بلوغ قرار دارد. به همین دلیل نیز موارد کمتری از توسعه فناوری برق آبی را می‌توان یافت که نحوه کارکرد آن را دچار تحول اساسی کند. با این وجود هنوز هم پتانسیل قابل توجهی برای رویکردهای نو به برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق آبی وجود دارد. این پتانسیل نیز ناشی از نقش مهم

اجزای توربین است که از آن به منظور بررسی مفاهیم خاصی مانند برهمکنش روتور - استاتور و گردابه در لوله رانش استفاده می‌شود. در نهایت روش سوم مدل‌سازی مجرای عبور جریان است که از آن معمولاً در مطالعه میدان جریان و مدل‌سازی توربولانس و با استفاده از مش‌های ریز به کار می‌رود. مطالعات عددی نشان داده شده است که رویکرد مدل‌سازی مجرای عبور جریان که اخیراً به کار گرفته شده است در مقایسه با مدل‌سازی کامل توربین، سبب بیش از 50 درصد صرفه‌جویی در توان محاسباتی می‌شود. ضمناً تفاوت نتایج به دست آمده از این روش با روش مدل‌سازی کامل توربین بین دو تا پنج درصد است. البته این رقم بسته به شرایط جریان شبیه‌سازی شده ممکن است تغییر کند [25].

در پنج سال گذشته، مطالعات عددی بسیاری بر روی توربین فرانسسیس انجام شده است. در اغلب این شبیه‌سازی‌ها، مش محاسباتی استفاده شده بین 1 میلیون تا 50 میلیون گره داشته است. اکثر مطالعات عددی انجام شده است با استفاده از رویکرد مدل‌سازی اجزای توربین (تعداد گره مش محاسباتی کمتر از 10 میلیون) انجام شده است. این رویکرد امکان بررسی دقیق با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده¹ و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را فراهم می‌آورد. با این حال، مدل‌سازی عددی توربین‌ها همواره چالش‌های خود در رابطه با انتخاب مدل توربولانس، تعداد مش محاسباتی و شرایط مرزی مناسب دارد. تاکنون تلاش بسیاری برای بهبود نتایج عددی صورت گرفته اما هنوز هم جای کار برای بهبود روش‌های کاربردی دینامیک سیالات محاسباتی و رویکردهای مدل‌سازی توربین وجود دارد [26]. به عنوان نمونه هیدالگو و همکاران از مش سه‌بعدی چرخشی ساختاریافته برای شبیه‌سازی جریان پایا در توربین فرانسسیس استفاده کردند. در این پژوهش به منظور کاهش خطا، از رابط مش دلخواه² و چند قاب مرجع³ استفاده شد [27]. البته لازم به ذکر است که اکثر مطالعات عددی فاقد راستی‌آزمایی و اعتبارسنجی مناسب هستند. در صورت راستی‌آزمایی و اعتبارسنجی مناسب، روش‌های عددی می‌توانند راه حل‌های منطقی برای بهبود دقت حل ارائه کنند.

چالش دیگر، مدل‌سازی توربولانس در شرایط عملکرد دور از نقطه طراحی است. چرا که در این شرایط میدان جریان معمولاً ناپایدار است. تنها گزارش تفاوت بین نتایج عددی و تجربی، نیازهای مربوط به طراحی قابل اطمینان توربین و پایداری دینامیکی در تمام محدوده عملکردی آن را برآورده نمی‌کند. روش‌های عددی موجود در نقطه بهترین کارایی به خوبی جواب می‌دهند. به طوری که مدل‌های نویر - استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز⁴ در این شرایط خطای کمتر از 5 درصد دارند. اما همان تکنیک‌ها و رویکردها در شرایط دور از طراحی دقت بالایی ندارند. لذا نیاز به بهبود تکنیک‌های مدل‌سازی جریان با در نظر گرفتن توازن میان دقت عددی و توان محاسباتی وجود دارد. انتظار می‌رود که روش‌های عددی بتوانند میدان جریان را با در نظر گرفتن مواردی مانند کاویتاسیون، تراکم‌پذیری آب، گردابه لوله رانش، برهمکنش روتور - استاتور هیدروآکوستیک، پیش‌بینی دامنه فشار گذرا و ارتقای دقت حل کنند [28].

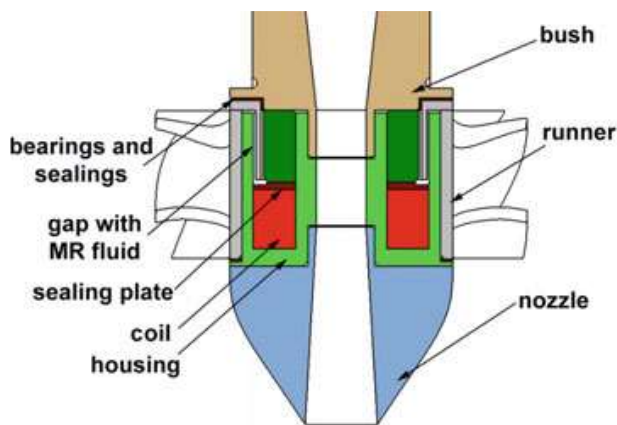
یک مطالعه عددی باید امکان تجزیه و تحلیل ساختار را چه در حالت پایدار و چه در شرایط گذرا گذرا فراهم آورد. یک مطالعه عددی آینده نگر می‌بایست چالش‌های مرتبط با تغییر در روند کار هیدرولیک توربین‌ها را در نظر بگیرد. تحلیل‌های عددی در آینده می‌بایست شبیه‌سازی گذرا همراه با کوپلینگ

³ Multiple Reference Frame (MRF)

⁴ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

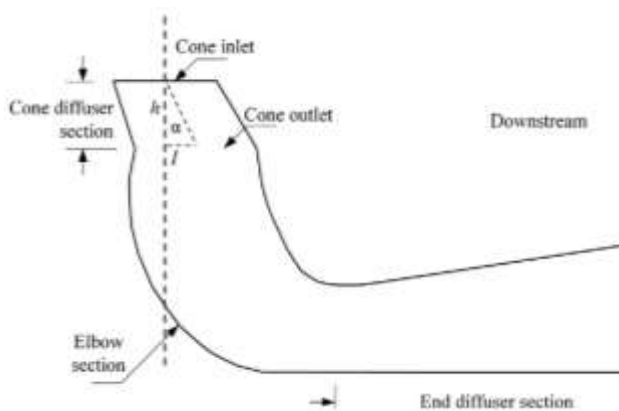
¹ Detached Eddy Simulation (DES)

² Arbitrary Mesh Interface (AMI)



شکل 7 نمای شماتیک سیستم کنترل مغناطیسی - رئولوژیکی [32]

در یکی از روش‌های جدید غیرفعال، از یک لوله رانش اصلاح شده با یک بخش مخروطی شبیدار برای جلوگیری از توسعه جریان چرخشی قوی و نیز کاهش دامنه نوسانات فشار استفاده می‌شود [33]. در موارد متعددی نیز استفاده از المان‌های هندسی خاص در مسیر لوله رانش به منظور کاهش جریان گردابی در آن توصیه شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از هندسه مارپیچی در جریان خروجی از چرخ [34] و تعبیه یک فین در مخروط ورودی لوله رانش [35] اشاره نمود.



شکل 8 لوله رانش با یک بخش مخروطی شبیدار در ورودی آن [33]

4-2- فناوری‌های مرتبط با دیجیتالی سازی عملکرد توربین آبی

اغلب نیروگاه‌های برق آبی در چندین دهه قبل طراحی شده‌اند که در آن زمان شرایط کاری متفاوت از زمان حال بوده است. نفوذ گسترده برق خورشیدی و بادی در شبکه که ماهیت متغیر دارند سبب ایجاد شرایط جدیدی در سیستم‌های برقی شده و پایداری آن‌ها را با ریسک مواجه کرده است. به همین دلیل چالش کلیدی نیروگاه‌های برق آبی جدید، افزایش انعطاف پذیری آن‌ها با ایجاد قابلیت ذخیره انرژی یا استفاده از سیستم‌های پیشرفته است تا به واسطه آن بتوان از یکپارچه شدن برق تجدیدپذیر با شبکه پشتیبانی نمود. البته باید توجه داشت که سیستم‌های هیدرودینامیکی اصولاً انعطاف کمتری در عملکرد دارند. به همین دلیل می‌بایست داده‌های فراوانی از شرایط کاری توربین‌ها جمع‌آوری

نیروگاه‌های برق آبی در دوره گذار برق است. چرا که این منبع انرژی قابلیت بالایی برای انعطاف پذیری شبکه برق ایجاد کرده و در حال حاضر اصلی‌ترین فناوری ذخیره انرژی در مقیاس بزرگ است.

نوآوری‌هایی که در عرصه فناوری برق آبی بروز می‌کنند عمدتاً به دنبال افزایش راندمان، افزایش انعطاف پذیری در عملکرد، افزایش عمر و کاهش هزینه‌های نصب، بهره‌برداری و نگهداری هستند. افزایش سهم منابع تجدیدپذیر در تولید برق نیز چالش‌های جدیدی را به نیروگاه‌های برق آبی تحمیل می‌کند. به صورت کلی و با نگاه سیستمی، سطح آمادگی فناوری برق آبی، به جز در موارد استثنائی، بسیار بالا است. با در نظر داشتن این نکته، مهم‌ترین فناوری‌هایی که هنوز به نوعی در حال رشد هستند را می‌توان در دو گروه فناوری‌های مرتبط با افزایش محدوده عملکرد توربین آبی و دیجیتالی‌سازی عملکرد توربین آبی دسته‌بندی نمود که در ادامه بیشتر مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

1-4- فناوری‌های مرتبط با افزایش محدوده عملکرد توربین آبی

همان‌طور که در مقدمه این بخش گفته شد، ماهیت متغیر برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) لزوم عملکرد توربین‌های آبی در محدوده وسیع‌تر و نیز تحت شرایط متغیر را ایجاد می‌کند. لذا این توربین‌ها می‌بایست انعطاف پذیری بیشتری در عملکرد خود داشته و در نقاط و شرایط دور از نقطه بهترین بازده به خوبی کار کنند. هنگامی که توربین‌های آبی در نقاط دور از طراحی خود کار کنند، جریان چرخشی باقیمانده در لوله رانش ایجاد می‌شود. علت این امر ناهمخوان بودن چرخش ایجاد شده توسط پره‌های هدایت‌کننده متحرک با اندازه حرکت زاویه‌ای جذب شده توسط چرخ توربین است. در چنین شرایطی توربین‌های پره ثابت مانند توربین فرانسسیس دچار افت شدید بازده شده و فشار در آن‌ها دچار نوسانات شدید می‌شود. نوسانات فشار باعث ایجاد ارتعاش شده و به قطعات مکانیکی توربین آسیب می‌رساند. علاوه بر این ممکن است نوسانات فشار منجر به خرابی چرخ شود. این حالت ناپایا در مواقعی مانند راه‌اندازی، خاموشی اضطراری یا پس زدن بار ممکن است رخ دهد [31]. روش‌های متعددی به منظور کاهش اثرات این حالت ناپایا مورد آزمایش قرار گرفته است که بسته به این که در این روش‌ها انرژی به جریان آب وارد شود یا خیر به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در یک نمونه از روش‌های جدید کنترل فعال، از ترمز مغناطیسی - رئولوژیکی برای کاهش سرعت چرخ استفاده می‌شود تا به واسطه آن جریان چرخشی در پایین دست چرخ و ناپایداری‌های ناشی از آن کنترل شود. به وسیله سیستم ترمز مغناطیسی - رئولوژیکی، افت در لوله رانش کاهش یافته و حداکثر فشار احیا می‌شود. در این روش توربین شامل دو چرخ هم‌محور است. چرخ اول با سرعت ثابت کار کرده و چرخ دوم که به آن چرخ کم فشار نیز گفته می‌شود سرعت متغیر خواهد بود. سیال مغناطیسی - رئولوژیکی در چرخ دوم بین قسمت ثابت و متحرک قرار می‌گیرد. ویسکوزیته این سیال با شدت میدان مغناطیسی که توسط یک کوئل ایجاد می‌شود تغییر پیدا می‌کند و همین امر سبب کاهش یا افزایش سرعت حرکت چرخ می‌شود. در شکل زیر نمای شماتیک این سیستم نشان داده شده است [32].

جدای از افزایش طول عمر و برطرف ساختن ریسک‌های مربوط به امنیت سایبری، نوسازی و دیجیتالی سازی سبب افزایش کلی راندمان و انرژی تولید شده نیز خواهد شد. برآورد شده است دیجیتالی سازی حدود 1225 گیگاوات ظرفیت نصب شده برق آبی جهان، سبب افزایش تولید سالانه برق به میزان 42 تراوات ساعت خواهد شد که معادله صرفه جویی سالانه 5 میلیارد دلار در هزینه‌های عملیاتی بوده و علاوه بر آن انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد. دیجیتالی سازی زمان پاسخ واحدهای تولید برق را کاهش داده و در عین حال، از استانداردهای سخت‌گیرانه ایمنی و قابلیت اطمینان نیروگاه‌های برق آبی نیز پشتیبانی می‌کند.

نیاز به گسترش محدوده عملکرد و نیز دینامیک سریع، بحث قابلیت اطمینان و ایمنی نیروگاه‌های برق آبی را پررنگ‌تر می‌کند. بنابراین در رویکرد جدید، مهندسی و علوم داده به گونه‌ای با هم یکپارچه می‌شوند تا یک آواتار دیجیتالی برای توربین و سیستم برق آبی را توسعه داده و صحت‌گذاری کنند و بدین وسیله دینامیک نیروگاه‌های برق آبی را مهار نمایند. بنابراین هدف از دیجیتالی سازی، توسعه روش‌ها و ابزارهای لازم برای ایجاد یک آواتار دیجیتال از دینامیک نیروگاه‌های برق آبی است تا به واسطه آن سرویس بهتری برای شبکه برق ارائه شود. برای این منظور یک رویکرد چندوجهی شامل هیدرولیک، سیستم قدرت، کنترل و مدل‌سازی خستگی مورد نیاز است [36].

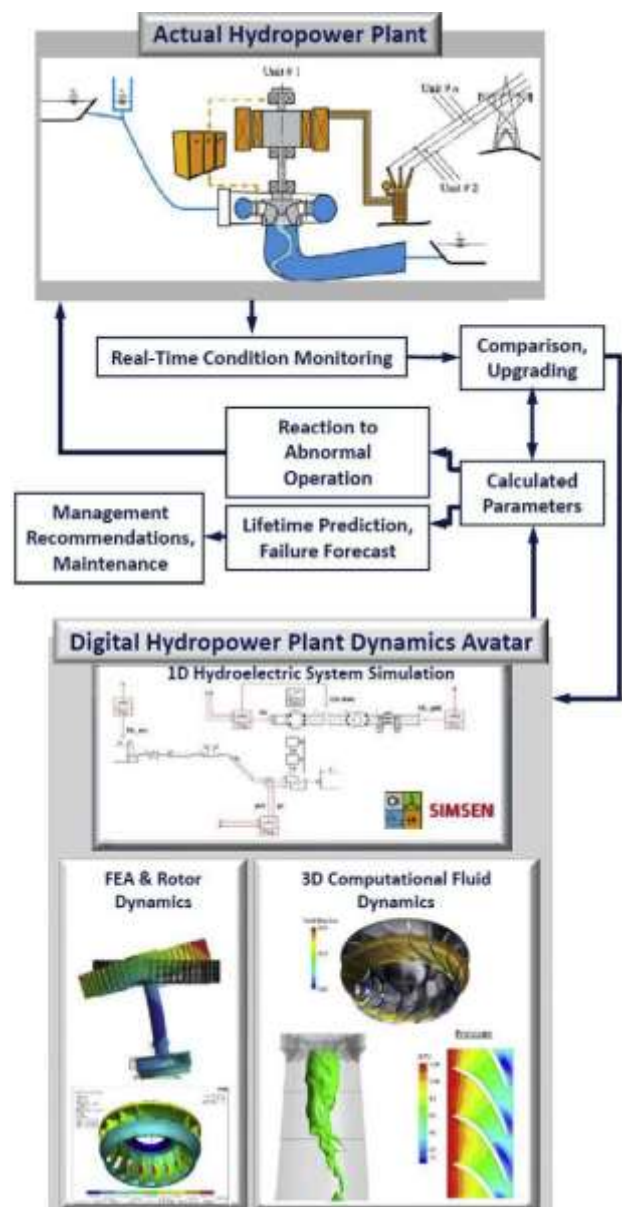
روشی که امروزه در مهندسی و بهره‌برداری توربین آبی به کار گرفته می‌شود شامل الکترومغناطیس پیشرفته و شبیه‌سازی‌های عددی جریان و سازه برای اجزای مختلف هیدرولیکی، مکانیکی و الکتریکی توربین است. به علاوه تست‌های متعددی نیز به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های ذکر شده و نیز حصول اطمینان از کارکرد مطمئن توربین انجام می‌گیرد. به همین دلیل جمع‌آوری تمامی اطلاعات به دست آمده در این فرآیند امکان توسعه آواتار دیجیتالی توربین را میسر می‌سازد. به وسیله این آواتار می‌توان انعطاف پذیری در عملکرد واحد را پشتیبانی و به طور مشخص، اثرات شرایط گذرا مانند راه‌اندازی و خاموشی را می‌توان در قالب تنش، خستگی و غیره ارزیابی نمود [37].

به این ترتیب زیرساخت‌های هیدرولیکی با معرفی طراحی‌های جدید و الگوهای جدید بهره‌برداری، با شرایط دینامیک (اقلیم، بازار و ملاحظات زیست محیطی) سازگاری بیشتری خواهند داشت. در حال حاضر سطح آمادگی فناوری دیجیتالی سازی 3 است ولی روش‌ها و ابزارهای در حال توسعه برای آن، بر اساس آخرین یافته‌ها و نیز پژوهش‌هایی است که هنوز در جریان هستند. توسعه این ابزارهای و روش‌ها ریسک مراحل بعدی توسعه فناوری توربین‌های آبی را کمتر می‌کنند. ابزارهای پیشرفته‌ای که برای ایجاد آواتار دیجیتالی استفاده می‌شوند شامل تحلیل داده، مدل‌سازی پیشرفته، تخمین طول عمر، تعمیر و نگهداری پیشگیرانه و پایش وضعیت است [38].

با وجود این که مفهوم توربین دیجیتال توجه زیادی را به خود جلب کرده است، هنوز دستاوردهای اندکی در راستای حل چالش‌های علمی مدل‌سازی و کنترل جریان آب در واحدهای هیدرولیکی حاصل شده است. به عنوان نمونه، یک سیستم کنترل پیش‌بینی کننده برای نیروگاه‌های برق آبی هیبرید پیشنهاد شده است. نیروگاه برق آبی هیبرید یک نیروگاه برق آبی معمولی است که دارای یک سیستم ذخیره انرژی باتری است تا به واسطه آن سایش قطعات حساس مکانیکی کاهش یافته و و قابلیت اطمینان و عملکرد نیروگاه بهبود یابد. وظیفه اصلی این سیستم کنترل، تعیین نحوه تقسیم توان بین سیستم ذخیره باتری و توربین آبی است. روش تقسیم بر فرموله کردن بارهای مکانیکی وارده بر مجرای آب ورودی به توربین استوار است، که می‌تواند به دلیل خستگی در

نمود تا به واسطه آن قابلیت پشتیبانی از شبکه، بدون این که ایمنی یا قابلیت اطمینان کاهش یابد، ارتقا یابد. این قابلیت‌های پشتیبانی در واقع قابلیت‌های رزرو به منظور مهار فرکانس، رزرو به منظور احیای فرکانس و راه‌اندازی سیاه هستند.

این قابلیت‌ها بر پایه دیجیتالی‌سازی برق آبی شکل می‌گیرند که در آن نحوه طراحی، توسعه، ارتقا، بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌های برق آبی متحول می‌شود. نیروگاه‌های برق آبی موجود ده‌ها سال قبل ساخته شده‌اند. لذا درجه دیجیتالی سازی ادوات آن‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های تجدیدپذیر مدرن (مانند توربین‌های بادی) پایین‌تر است. در واقع نوسازی و ارتقای ناوگان موجود فرصت مناسبی جهت دیجیتالی‌سازی نحوه عملکرد تجهیزات برق آبی است.



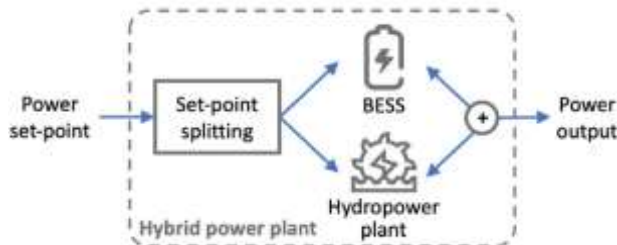
شکل 9 چگونگی جریان اطلاعات و تبادل داده با استفاده از آواتار دیجیتالی یک نیروگاه برق آبی در شرایط دینامیک [36]

افزایش محدوده عملکرد توربین آبی و دیجیتالی‌سازی عملکرد توربین آبی دسته‌بندی نمود.

هنگام تنظیم فرکانس شبکه آسیب ببیند. سیستم کنترل پیشنهادی با تنظیم توان توربین و سیستم ذخیره باتری، ضمن حفظ خروجی مورد انتظار آسیب‌های وارده به لوله‌های هیدرولیک را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد [39].

6- مراجع

- [1] P. L. Viollet, From the water wheel to turbines and hydroelectricity. Technological evolution and revolutions, *Comptes Rendus Mécanique*, Vol. 345, No. 8, pp. 570-580, 2017.
- [2] British Petroleum Company, *Statistical review of world energy*, London, 2021.
- [3] Britannica. *Three Gorges Dam*, Accessed 18 November 2021; <https://www.britannica.com/topic/Three-Gorges-Dam>.
- [4] International Renewable Energy Agency, *Renewable capacity statistics 2021*, Abu Dhabi, 2021.
- [5] S. A. Nourbakhsh, *Turbomachines*, Tehran: University of Tehran Press, 2008. (in Persian)
- [6] Voith. *Application range and development of our turbines*, Accessed 18 November 2021; <https://voith.com/ku-hu/products-services/hydropower-components/turbines.html>.
- [7] A. Kumar. *Francis turbine: Definition, construction or parts, working principle, efficiency, advantages, application*, Accessed 18 November 2021; <https://themechanicalengineering.com/francis-turbine/>.
- [8] Bonyad Tosef Farda, *Methods of technology foresight*, Tehran, 2005. (in Persian)
- [9] *Microsoft Academic*, Accessed 18 November 2021; <https://academic.microsoft.com/home>.
- [10] *Patent Inspiration*, Accessed 18 November 2021; <https://www.patentinspiration.com/>.
- [11] M. Escudier, Confined vortices in flow machinery, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 19, No. 1, pp. 27-52, 1987.
- [12] F. Avellan, Flow investigation in a Francis draft tube: the FLINDT project, *In Proceedings of the 20th IAHR Symposium*, Charlotte, North Carolina, USA, International Association For Hydraulic Research, pp. 1-18, 2000.
- [13] R. Susan-Resiga, G. Dan Ciocan, I. Anton, F. Avellan, Analysis of the swirling flow downstream a Francis turbine runner, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 177-189, 2006.
- [14] E. Georgievskaja, Analytical system for predicting cracks in hydraulic turbines, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 127, pp. 1-10, 2021.
- [15] R. A. Saeed, A. N. Galybin, V. Popov, Modelling of flow-induced stresses in a Francis turbine runner, *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, No. 12, pp. 1245-1255, 2010.
- [16] P. Kumar, R. P. Saini, Study of cavitation in hydro turbines - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 374-383, 2010.
- [17] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, M. Coussirat, Detection of cavitation in hydraulic turbines, *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 20, No. 4, pp. 983-1007, 2006.
- [18] M. Szkodo, Effect of laser heating on cavitation behavior of Fe-Cr-Mn coating, *Advances in Materials Science*, Vol. 1, No. 5, 2004.
- [19] T. Aschenbrenner, A. Otto, W. Moser, Classification of vortex and cavitation phenomena and assessment of CFD prediction capabilities, *in proceedings of the 23rd IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems*, 2006.
- [20] T. Guo, J. Zhang, Z. Luo, Analysis of Channel Vortex and Cavitation Performance of the Francis Turbine under Partial Flow Conditions, *Processes*, Vol. 9, No. 8, pp. 1-16, 2021.
- [21] L. Sun, P. Guo, X. Luo, Numerical investigation of inter-blade cavitation vortex for a Francis turbine at part load conditions, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 15, No. 6, pp. 1163-1177, 2021.
- [22] P. J. Gogstad, *Hydraulic design of Francis turbine exposed to sediment erosion*, MSc Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012.
- [23] H. Keck, M. Sick, Thirty years of numerical flow simulation in hydraulic turbomachines, *Acta mechanica*, Vol. 201, No. 1, pp. 211-229, 2008.
- [24] J. Meyers, B. Geurts, P. Sagaut, *Quality and reliability of large-eddy simulations*, Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.



شکل 10 نیروگاه برق آبی هیبرید [39]

در پژوهش دیگری یک سیستم در مقیاس آزمایشگاهی برای کنترل باز شدن پره‌های هدایت کننده ورودی تست شده است. پارامترهای لازم برای مدل‌سازی توربین با انجام آزمایش عملکرد (در حالت پایا) در سرعت نامی توربین همراه با شبیه‌سازی آن برآورد شده‌اند. سپس از این مدل برای استخراج میزان بازشدگی مورد نیاز پره‌های هدایت کننده ورودی در مواجهه با اختلالات توان و فشار مورد استفاده قرار گرفته است [40].

با توجه به دشواری پیش‌بینی رفتار توربین‌های آبی با استفاده از مدل‌های مرسوم، معماری جدیدی برای سیستم پیش وضعیت نیروگاه برق آبی مبتنی بر محاسبات ابری و اینترنت اشیا پیشنهاد شده است. به منظور توسعه این سیستم، داده‌های تاریخی نیروگاه جمع‌آوری شده و روابط و فرمول‌های لازم بر مبنای آن توسعه داده شده است. سپس این روابط با داده‌های برخط اعتبارسنجی شده است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که مدل توسعه‌یافته می‌تواند وضعیت توربین آبی را با دقت بالایی پیش‌بینی کند [41].

به طور خلاصه می‌توان گفت پیشرفت‌های اخیر در حوزه مدل‌سازی و کنترل ناپایداری‌های جریان توربین و کاویتاسیون مسیر توسعه تکنولوژی آینده در راستای گسترش محدوده عملکرد توربین‌های آبی را هموار می‌کند.

5- نتیجه‌گیری

انرژی برق آبی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تولید برق تجدیدپذیر است. لذا حوزه‌های فناوری آن در مقایسه با سایر فناوری‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر در سطح بالایی از بلوغ قرار دارند. با این حال همچنان تحقیقات متعددی به منظور افزایش راندمان، افزایش انعطاف پذیری در عملکرد، افزایش عمر و کاهش هزینه‌های نصب، بهره‌برداری و نگهداری توربین‌های آبی در جریان است.

با توجه به پیمایش به عمل آمده در خصوص توربین آبی فرانسس در مقالات منتشر شده (بر اساس پایگاه میکروسافت آکادمیک) و اختراعات ثبت شده (بر اساس پایگاه پتنت اینسپایریشن) حوزه‌های فناوریانه توربین آبی فرانسس که در پژوهش‌های اخیر مورد تمرکز واقع شده‌اند شامل گردابه و جریان در لوله رانش، پره‌ها، کاویتاسیون، محفظه حلزونی، دینامیک سیالات محاسباتی و ساخت و تولید می‌باشد. همچنین مهم‌ترین فناوری‌هایی که هنوز به نوعی در حال رشد هستند را می‌توان در دو گروه فناوری‌های مرتبط با

- [25] P. Mössinger, R. Jester-Zürker, A. Jung, Investigation of different simulation approaches on a high-head Francis turbine and comparison with model test data: Francis-99, in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2015.
- [26] J. Paik, F. Sotiropoulos, M. J. Sale, Numerical simulation of swirling flow in complex hydroturbine draft tube using unsteady statistical turbulence models, *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 131, No. 6, pp. 441-456, 2005.
- [27] V. Hidalgo, M. Velasco, E. Cando, E. Valencia, S. Simbaña, D. Puga, C. Mora, X. Escaler, Rotatory 3D structured mesh study using openFOAM to simulate the flow in francis turbine, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 49, pp. 142-148, 2022.
- [28] W. T. Su, X. B. Li, F. C. Li, W. F. Han, X. Z. Wei, J. Guo, Large eddy simulation of pressure fluctuations at off-design condition in a Francis turbine based on cavitation model. in *Materials Science and Engineering: Conference Series*, IOP Publishing, pp. 22-32, 2013.
- [29] C. Trivedi, M. J. Cervantes, O. G. Dahlhaug, Numerical techniques applied to hydraulic turbines: A perspective review, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 68, No. 1, pp. 1-18, 2016.
- [30] A. Kafle, P. L. Shrestha, S. Chitrakar, B. Thapa, B. S. Thapa, N. Sharma, A review on casting technology with the prospects on its application for hydro turbines, in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, pp. 1-11, 2020.
- [31] M. Nishi, S. Liu, An outlook on the draft-tube-surge study, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 33-48, 2013.
- [32] S. Muntean, A. I. Bosioc, R. A. Szakal, L. Vékás, R. F. Susan-Resiga, Hydrodynamic investigations in a swirl generator using a magneto-rheological brake, *Materials Design and Applications*, Vol. 65, No. 1, pp. 209-218, 2017.
- [33] X. Zhou, C. Shi, K. Miyagawa, H. Wu, Effect of modified draft tube with inclined conical diffuser on flow instabilities in Francis turbine, *Renewable Energy*, Vol. 172, pp. 606-617, 2021.
- [34] D. S. Semerci, T. Yavuz, Controlling Flow in Draft Tube of Francis Turbine by Vortex Preventing Element, *Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 34-43, 2022.
- [35] L. Zhu, R. Z. Zhang, A. Yu, L. Lu, X. W. Luo, Suppression of vortex rope oscillation and pressure vibrations in Francis turbine draft tube using various strategies, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 33, No. 3, pp. 534-545, 2021.
- [36] I. Kougias, G. Aggidis, F. Avellan, S. Deniz, U. Lundin, A. Moro, S. Muntean, D. Novara, J. I. Pérez-Díaz, E. Quaranta, P. Schild, N. Theodossiou, Analysis of emerging technologies in the hydropower sector, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 113, No. 1, pp. 1-18, 2019.
- [37] B. Nennemann, J. F. Morissette, J. Chamberland-Lauzon, C. Monette, O. Braun, M. Melot, A. Coutu, J. Nicolle, A. M. Giroux, Challenges in dynamic pressure and stress predictions at no-load operation in hydraulic turbines, in *Earth and Environmental Science: Conference Series*, IOP Publishing, pp. 32-55, 2014.
- [38] M. Eguisquiza, E. Eguisquiza, C. Valero, A. Presas, D. Valentín, M. Bossio, Advanced condition monitoring of Pelton turbines, *Measurement*, Vol. 119, pp. 46-55, 2018.
- [39] S. Cassano, F. Sossan, Model predictive control for a medium-head hydropower plant hybridized with battery energy storage to reduce penstock fatigue, *Electric Power Systems Research*, Vol. 213, pp. 1-7, 2022.
- [40] J. Vinod, B. K. Sarkar, D. Sanyal, Flow control in a small Francis turbine by system identification and fuzzy adaptation of PID and deadband controllers, *Renewable Energy*, Vol. 201, pp. 87-99, 2022.
- [41] K. Kumar, R. P. Saini, Data-driven internet of things and cloud computing enabled hydropower plant monitoring system, *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, Vol. 36, pp. 1-13, 2022.